СВАРНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

В ТРЕХ ТОМАХ

Под редакцией
члена-корреспондента АН Украины
Л. М. ЛОБАНОВА

СВАРНЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

ТОМ 1

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

КИЕВ НАУКОВА ДУМКА 1993

Л. М. ЛОБАНОВ, В. И. МАХНЕНКО,
В. Н. ТРУФЯКОВ и др.

УДК 621.791 : 624.01/04 (045)

В книге изложены теоретические основы сварки, общие сведения о материалах и рекомендации по их применению для сварных конструкций. Рассмотрены способы сварки, современные технологии резки проката и оборудование для них, применяемые в строительстве. Большое внимание уделено исследованию механизма образования в конструкциях сварочных деформаций и напряжений, их изучению и оценке, мероприятиям по их регулированию с целью повышения надежности конструкций. Освещены современные и перспективные подходы к оценке прочности сварных соединений и узлов при статическом и циклическом нагружениях, особенности их работы и расчета при низких температурах, направления дальнейшего совершенствования норм проектирования.

Для научных и инженерно-технических работников, преподавателей вузов, аспирантов и студентов.

У книзі викладено теоретичні основи зварювання, загальні відомості про матеріали та рекомендації з їх застосування для зварних конструкцій. Розглянуто засоби зварювання, сучасні технології різання прокату та обладнання для них, що застосовуються у будівництві. Значну увагу приділено дослідженню механізму утворення у конструкціях зварювальних деформацій і напруг, їх вивченню та оцінці, заходам їх регулювання з метою підвищення надійності конструкцій. Висвітлено сучасні й перспективні підходи до оцінки міцності зварних з'єднань і вузлів при статичному та циклічному навантаженнях, особливості їх роботи і розрахунку при низьких температурах, напрямки подальшого удосконалення норм проектування.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, викладачів вузів, аспірантів і студентів.

Утверждено к печати ученым советом
Института электросварки им. Е. О. Патона АН Украины

Редакция технической литературы
Редакторы *Р. И. Гусячая, З. Л. Кобка*

С 2704060000-181 / 221-93 409-93

ISBN 5-12-004495-6 (т. 1),
ISBN 5-12-003341-5

Довідкове видання

Академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона

ЛОБАНОВ Леонід Михайлович,
МАХНЕНКО Володимир Іванович,
ТРУФЯКОВ Володимир Іванович та ін.

ЗВАРНІ БУДІВЕЛЬНІ КОНСТРУКЦІЇ

ТОМ 1

ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ

Київ, видавництво «Наукова думка»
Російською мовою

Художник В. Г. Самсонов
Художній редактор І. М. Галушка
Технічний редактор Т. С. Березяк
Коректори А. Н. Лихобаба, Л. М. Тищенко, С. Е. Ноткина

Здано до набору 02.02.93. Підп. до друку 19.07.93. формат 84×108/16. Пап. друк. № 1. Літ. гарн. Вис. друк. Ум. друк. арк. 43,68. Ум. фарбо-відб. 43,68. Обл. вид. арк. 60,08. Зам. 3—315.

Видавництво «Наукова думка».
252601 Київ 4, вул. Терещенківська, 3.

Віддруковано з матриць Головного підприємства республіканського виробничого об'єднання «Поліграфкнига». 252057 Київ, вул. Довженка, 3 в Жовківській міській друкарні, 292310 Жовква Львівської обл., вул. Василіанська, 8. Зам. 1641.

© В. М. Барышев, В. И. Галинич, В. С. Гиренко, Л. И. Гладштейн, В. И. Дворецкий, М. М. Жербин, Г. А. Иващенко, В. С. Игнатьева, В. В. Кныш, В. С. Ковальчук, В. С. Кустанович, Г. И. Лащенко, К. В. Михайлов, Л. М. Лобанов, Б. Д. Малышев, В. И. Махненко, П. П. Михеев, Л. И. Миходуй, В. А. Пермяков, В. И. Труфяков, А. М. Фридман, В. Ф. Чабуркин, А. И. Івертко, Б. М. Шинкарев, В. В. Шип, Я. М. Юзьків, И. А. Юхин, В. В. Якубовский, 1993

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора 7

Предисловие 8

Глава 1

Материалы для сварных строительных конструкций 11

1.1. Стали для сварных строительных металлоконструкций 11

1.2. Алюминиевые сплавы 42

1.3. Арматурные стали 44

Глава 2

Сварные соединения. Способы сварки и резки 50

2.1. Сварные соединения и швы 50

2.2. Способы сварки и их характеристика 57

2.3. Выбор способа и особенности технологии сварки отдельных классов сталей 82

2.4. Способы резки проката 96

Глава 3

Теоретические основы сварки 107

3.1. Тепловые процессы при сварке 107

3.2. Металлургические процессы при сварке плавлением 118

3.3. Свариваемость металлов 121

Глава 4

Оборудование для сварки, наплавки и резки 140

4.1. Источники питания сварочной дуги 140

4.2. Инструмент, аппаратура, установки и защитные приспособления для ручной дуговой сварки и резки 152

4.3. Оборудование для механизированной дуговой сварки и наплавки 157

4.4. Оборудование для автоматической дуговой и электрошлаковой сварки и наплавки 160

4.5. Оборудование для контактной, высокочастотной сварки и сварки трением 165

4.6. Оборудование для газовой, лазерной, плазменной резки и сварки, металлизации и газотермических покрытий 178

4.7. Механическое оборудование сварочного производства 194

Глава 5

Сварочные материалы 195

5.1. Электродные материалы 195

5.2. Проволоки, ленты и электроды для механизированной и ручной наплавки 215

5.3. Горючие и защитные газы для сварки, наплавки и резки 215

5.4. Сварочные флюсы 223

5.5. Материалы, рекомендуемые для сварки строительных стальных конструкций 228

Глава 6

Деформации и напряжения при сварке 229

6.1. Механизм образования сварочных напряжений и деформаций и их классификация 229

6.2. Расчетные методы определения сварочных напряжений и деформаций 232

6.3. Экспериментальные методы измерения напряжений и деформаций при сварке 241

6.4. Общие сведения о распределении остаточных сварочных напряжений 246

6.5. Сварочные деформации 254

6.6. Конструктивные и технологические мероприятия по регулированию напряжений и деформаций при сварке 261

Глава 7

Основные виды сварных соединений строительных металлоконструкций. Особенности их расчета при статических нагрузках 269

7.1. Классификация сварных соединений строительных металлических конструкций 269

7.2. Напряженно-деформированное состояние сварных соединений 269

7.3. Предельное состояние и расчетные характеристики сварных соединений 282

7.4. Проектирование сварных соединений с расчетными угловыми швами оптимального сечения. 290

7.5. Проектирование сварных соединений со стыковыми швами 294

7.6. Проектирование сварных соединений с конструктивными угловыми швами 297

7.7. Расчет на прочность сварных соединений с точечными и прорезными швами 302
7.8. Хрупкое разрушение сварных соединений и элементов конструкций при статическом нагружении 306
7.9. Слоистое разрушение сварных соединений . . . 313

Глава 8

Прочность при переменных нагрузках 315

8.1. Переменные напряжения и усталость металлов 315
8.2. Роль факторов, обусловленных сваркой . . . 320
8.3. Долговечность соединений при малоцикловом нагружении 327
8.4. Сопротивление усталости сварных соединений в многоцикловой области 333
8.5. Влияние на долговечность дефектов сварки . . 345
8.6. Циклическая трещиностойкость сварных соединений 349
8.7. Долговечность соединений при случайном нагружении 353
8.8. Сопротивление усталости соединений при двухчастотном нагружении 356
8.9. Способы повышенияс опротивления усталости . . 361

Глава 9

Основные положения расчета и проектирования сварных строительных конструкций 371

9.1. Основы расчета стальных конструкций 371
9.2. Расчет элементов стальных конструкций . . . 376
9.3. Проектирование стальных конструкций 402

Список литературы 406

ОТ РЕДАКТОРА

Создание сварных конструкций, наиболее полно отвечающих своему назначению, экономичных в изготовлении и надежных в эксплуатации, является комплексной задачей, включающей этапы проектирования, исследования прочности, оптимальной организации технологического процесса изготовления, контроля качества сварных соединений и диагностики состояния конструкции в процессе ее эксплуатации.

Сварка как технологический процесс стала поистине революционной технологией, обеспечивающей качественный скачок в создании металлических и неметаллических конструкций, существенное снижение их массы, улучшение технологичности и снижение трудоемкости изготовления, способствовала наращиванию объемов производства, открыла пути создания новых форм металлических конструкций. Конструкции с использованием трубчатых сечений и замкнутых гнутосварных профилей получили широкое распространение благодаря успехам в области технологии сварки.

Применение электросварки в строительных конструкциях началось более полувека назад. Однако в начальный период в связи с малой изученностью сварки качество и надежность сварных конструкций зачастую не соответствовали предъявляемым к ним требованиям. Происходили разрушения сварных соединений, следствием которых нередко являлись аварии, прекращения эксплуатации конструкций, что вызывало недоверие к новому технологическому процессу, исключало его использование в ответственных сооружениях. Предпочтение отдавалось испытанному многолетним опытом соединению элементов в конструкциях заклепками.

Обладая большими знаниями и неординарной инженерной интуицией, Е. О. Патон, Г. А. Николаев и другие выдающиеся ученые, стоящие у истоков сварного металлостроения, сумели в те годы увидеть возможности и перспективы, которые открывал новый технологический процесс совершенствования конструкций. Вместе с тем использование сварочных технологий при производстве конструкций имеет ряд особенностей, без учета которых не могут быть получены надежные и экономичные сварные конструкции. Это характерная форма сварных соединений, вызывающая неравномерность распределения деформаций и напряжений, влияние термического цикла сварки на свойства основного металла, образование различных зон термического влияния, создающих механические, физические и химические неоднородности, возможность образования при сварке дефектов, высокие сварочные остаточные напряжения, значительные пластические деформации. Применение сварки в ряде случаев вызывает необходимость учитывать анизотропию проката. Сварка требует особого внимания к выбору конструктивных решений соединений и узлов.

Как видно, создание современных сварных строительных конструкций требует глубоких знаний не только в области проектирования, но и в области сварочного производства. Обширная информация по различным аспектам сварочной науки и техники, не всегда доступная проектировщикам, неизбежная необходимость узкой специализации проектировщиков, технологов и научных работников в области прочности предопределяет некоторый разрыв в комплексном подходе к созданию современных сварных строительных конструкций, что тормозит их совершенствование.

Публикация настоящего справочного издания, в котором обобщены современные сведения, необходимые для создания сварных конструкций, будет способствовать повышению уровня проектирования и изготовления строительных конструкций различного назначения.

Член-корреспондент АН Украины
Л. М. ЛОБАНОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сварка является доминирующим технологическим процессом в тяжелом, транспортном и сельскохозяйственном машиностроении, автомобилестроении, сооружении трубопроводных систем и т. д. Строительная промышленность традиционно занимает ведущее место в использовании сварочных технологий. Развитие научных знаний и практического опыта определяет прогресс в формообразовании конструкций, выдвигает требования к конструкционным материалам, оказывает влияние на принципы разработки сортамента.

Первый том «Основы проектирования конструкций» включает в себя круг вопросов, связанных с общими проблемами проектирования сварных конструкций, общие сведения по технологии сварки, включая теоретические основы, знание которых необходимо при выборе оптимального технологического процесса, обеспечивающего в каждом конкретном случае выполнение комплекса требований по экономичности, надежности, функциональному назначению конструкции.

Представлена широкая номенклатура сварочного оборудования и оборудования для резки металлов, применяемого при производстве конструкций в условиях предприятий и на монтажных площадках.

Приведена обширная информация по материалам для сварных конструкций, а также сварочным материалам, правильное применение которых при производстве и монтаже конструкций также призвано обеспечить их надежность с учетом конкретных условий эксплуатации сооружений.

Применение сварки как способа неразъемного соединения элементов связано с введением в конструкцию внутренних сварочных напряжений, а следовательно, и деформаций. В книге представлены методы количественной оценки напряжений и деформаций в конструкциях, меры по предотвращению их отрицательного влияния на эксплуатационные показатели конструкций и их работоспособность. Значительное внимание уделено учету особенностей, привносимых в конструкцию сваркой и связанными с ней концентрацией напряжений, образованием различных зон термического влияния, механической, физической и химической неоднородностью в зоне сварного соединения, и их влиянию на прочность сварных соединений и узлов при статическом и циклическом нагружении конструкции.

В завершение даны основные положения проектирования сварных строительных конструкций, отражающие современный уровень знаний в области сварки и строительства.

В подготовке публикации приняли участие специалисты ведущих организаций в области проектирования и исследования сварных строительных конструкций: Института электросварки им. Е. О. Патона АН Украины, УкрНИИПроектстальконструкции, Киевского инженерно-строительного института, Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, ЦНИИПроектстальконструкции им. Н. П. Мельникова, ЦНИИ строительных конструкций им. В. А. Кучеренко, Московского инженерно-строительного института им. В. В. Куйбышева и ряда других организаций. Основным материалом для подготовки книги послужили нормативно-технические документы, результаты многолетнего опыта проектирования и научных исследований. Использованы также публикации отдельных авторов, документы Международного института сварки. Авторы попытались рассмотреть перспективы развития сварных строительных конструкций и технологии их производства.

Первая глава написана Л. И. Гладштейном, Г. А. Иващенко, К. В. Михайловым, А. М. Фридманом и В. С. Кустановичем, вторая — Я. М. Юзыкиным, Г. И. Лащенко и Л. И. Миходуем, третья — В. В. Шипом и В. Ф. Чабуркиным, четвертая — Б. Д. Малышевым, А. И. Чвертко и Н. А. Юхиным, пятая — Б. М. Шинкаревым и В. И. Галиничем, шестая — Л. М. Лобановым и В. И. Махненко, седьмая — В. И. Махненко, В. М. Барышевым и В. С. Гиренко, восьмая — В. И. Труфяковым, П. П. Михеевым, В. В. Якубовским, В. В. Кнышом, В. И. Дворецким и В. С. Ковальчуком, девятая — М. М. Жербиным, В. А. Пермяковым и В. С. Игнатьевой.

Приведенные в книге данные могут служить справочным материалом при проектировании сварных строительных конструкций, организации их изготовления на заводах металлоконструкций, выборе оптимальной технологии сварки, оборудования и сварочных материалов.

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ВЛ	— высоковольтная линия
ВНИИЭСО	— ВНИИ электросварочного оборудования
ДУР	— диаграмма усталостного разрушения
ЗТВ	— зона термического влияния
ИМЕТ	— Институт металлургии им. А. А. Байкова
ИЧМ	— Институт черной металлургии
ИЭД	— Институт электродинамики АН Украины
ИЭС	— Институт электросварки им. Е. О. Патона АН Украины
МГТУ	— Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
МИС	— Международный институт сварки
ОСН	— остаточные сварочные напряжения
ПГМ	— порошково-присадочный материал
РЗМ	— редкоземельные металлы
САПР	— системы автоматического проектирования
ТИХ	— температурный интервал хрупкости
ЦНИИСК	— ЦНИИ строительных конструкций им. В. А. Кучеренко
ЦНИИЧМ	— ЦНИИ черной металлургии
ЭЛС	— электронно-лучевая сварка
ЭШС	— электрошлаковая сварка

ГЛАВА 1

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВАРНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

1.1. СТАЛИ ДЛЯ СВАРНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Строительство — одна из самых металлоемких отраслей народного хозяйства. Значительная часть стали в строительстве расходуется на изготовление металлоконструкций, из которых монтируются автодорожные и железнодорожные мосты, каркасы промышленных и гражданских зданий, мачты и башни антенных устройств, опоры линий электропередачи, резервуары и газгольдеры для хранения нефти, нефтепродуктов и газов, трубопроводы и многое другое. Все эти конструкции изготовляются на заводах металлоконструкций индустриальным методом из стального проката массового применения с использованием для соединений наиболее производительных способов сварки.

Возможность индустриального изготовления конструкций, надежность и долговечность их в эксплуатации, технико-экономическая эффективность во многом зависят от правильного выбора материала [1]. В последние годы усовершенствованы существующие и разработаны новые марки стали и виды проката с улучшенными служебными характеристиками, значительно расширяющие возможности проектирования.

Размеры поперечных сечений многих элементов металлоконструкций, а следовательно, и их масса определяются расчетом, учитывающим прочностные свойства материала — предел текучести и временное сопротивление разрыву [2]. Поэтому повышение прочности стали — наиболее действенное средство снижения металлоемкости и стоимости таких конструкций. При существующем сортаменте металлопроката повышение прочности стали позволяет также увеличить максимальный пролет и высоту сооружений, повысить расчетные нагрузки, что создает благоприятные предпосылки для дальнейшего развития новых прогрессивных конструктивных и архитектурных форм.

При изготовлении конструкций и монтаже сталь подвергается действию технологических операций: сварке, резке огневым и механическим способами, механической обработке, правке, гибке, вальцовке. При этом она не должна разрушаться, сохраняя по возможности стабильность микроструктуры и механических свойств. В сварных конструкциях, изобилующих концентраторами напряжений, сталь при эксплуатации должна длительное время выдерживать большие нагрузки — статические, динамические и переменные, часто при низких климатических температурах. Наконец, сталь, а также изготовление конструкций из нее не должны иметь чрезмерную стоимость, т. е. в условиях конкурентной возможности применения в конструкциях разных материалов сталь должна быть экономически эффективной.

1.1.1. Требования к свойствам строительных сталей

Можно выделить пять основных свойств, которыми в той или иной мере должна обладать строительная сталь: прочность, свариваемость, сопротивление хрупкому разрушению, сопротивление вязкому разрушению, технико-экономическая эффективность.

Рассмотрим каждое из этих свойств, их контролируемые признаки, регламентируемые уровни этих признаков и в отдельных случаях способы контроля.

Прочность. Эффективность повышения прочности стали с целью снижения массы конструкции может быть иллюстрирована на примерах элементов тяжелого пролетного строения моста, растянутых элементов конструкций каркаса промышленного здания (рис. 1.1) [3]. За основу для сравнения принята наименее прочная углеродистая сталь обыкновенного качества с пределом текучести 230 МПа и временным сопротивлением 380 МПа. Из графика следует, что особенно интенсивное снижение массы конструкций наблюдается при относительно небольшом повышении прочности — до 2—3-кратного уровня. При этом максимальное снижение массы достигается в сооружениях, в которых значительная часть несущей способности конструкции расходуется на поддержание собственного веса, например в элементах тяжелого пролетного строения; хорошие результаты дает использование высокопрочной стали в элементах, испытывающих растяжение, несколько худшие — в конструкциях, включающих сжато-изогнутые элементы. Не удается достичь снижения массы при повышении прочности стали в элементах с малой жесткостью и большой деформативностью, рассчитываемых по второй группе предельных состояний, а также в сжато-изогнутых элементах с большой гибкостью. Не достигается оно и в элементах сварных конструкций, испытывающих интенсивные переменные силовые воздействия с большим числом циклов нагружения и малой асимметрией циклов. Поэтому наиболее эффективны по снижению массы (и стоимости) комбинированные конструкции, включающие элементы из сталей разной прочности, которые выбираются исходя из конкретных условий нагружения и конструктивных особенностей элементов.

На основании приведенных представлений для проката строительных сталей с учетом возможности упрочнения (при удовлетворении требований к другим служебным свойствам) были выбраны семь основных унифицированных уровней прочности, которым соответствует предел текучести не менее 225, 285, 325, 390, 440, 590 и 735 МПа и временное сопротивление разрыву не менее 375, 430, 450, 510, 590, 685 и 830 МПа соответственно.

Свариваемость. Традиционный способ повышения прочности стали заключается в увеличении содержания в ней углерода и легирующих элементов. Установлено, однако, что

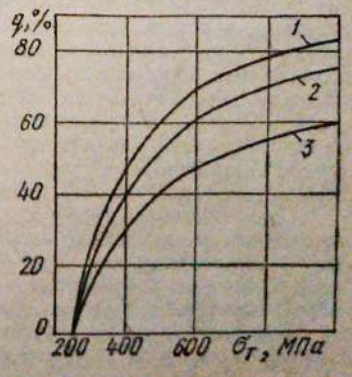


Рис. 1.1. Снижение массы элементов металлоконструкций при замене углеродистой стали Ст3 сталью с более высоким пределом текучести:

1 — тяжелое пролетное строение; *2* — растянутые элементы конструкций; *3* — каркас промышленного здания; *q* — экономия стали

при этом увеличивается опасность возникновения при сварке закалочных микроструктур и хрупких трещин в околошовной зоне. Действие углерода в этом отношении наиболее отрицательно.

Влияние легирующих элементов и примесей выражают количественным сравнением с влиянием углерода. Предложено несколько десятков формул углеродного эквивалента $C_э$ для оценки свариваемости стали. Наиболее признанными являются формула МИС [4]

$$C_э = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (1.1)$$

и формула стандарта WES 135 Японского общества сварщиков [5]

$$C_э = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2}, \quad (1.2)$$

где C, Mn, Si и т. д.— содержание углерода и соответствующих легирующих элементов, % (по массе).

Полагают, что при $C_э \leqslant 0{,}35$ % сварка стали не вызывает затруднений, при $0{,}35 \leqslant C_э \leqslant 0{,}60$ % требуются технологические меры предосторожности, при $C_э > 0{,}60$ % вероятность появления трещин опасно увеличивается.

На правильность оценки $C_э$ с помощью формул (1.1) и (1.2) влияет содержание углерода в стали: при содержании его выше 0,16 % использование указанных формул приводит к заметной ошибке [6]. Поэтому предлагается видоизмененная формула, учитывающая это влияние:

$$C_э = C + A(C) \cdot \left(\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + V + Nb}{5} + 5B \right). \quad (1.3)$$

Здесь сомножитель A (C), отражающий влияние углерода, имеет значение $A(C) = 0{,}75 + 0{,}25\text{th}[20(C - 0{,}12)]$.

Влияние элементов в формулах (1.1) и (1.2) зависит от скорости охлаждения металла соединения. В частности, формула МИС дает хорошие результаты только в том случае, если длительность остывания от 800 до 500 °С превышает 6 с [7]. Для случая более интенсивного охлаждения предлагается другая формула:

$$C_э = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{34} + \frac{Cu}{19} + \frac{Cr}{11} + \frac{Mo}{12} + \frac{V}{6} + \frac{Si}{23}. \quad (1.4)$$

Образование закалочных микроструктур и связанных с ними трещин зависит также от скорости охлаждения металла шва и околошовной зоны, на которую влияют тепловые параметры сварки (тепловложение, начальная температура) и конструктивные особенности соединения (форма, толщина). При сварке стали с одним и тем же углеродным эквивалентом с увеличением скорости охлаждения увеличивается вероятность образования закалочных микроструктур, а это, в свою очередь, вызывает монотонное возрастание максимальной твердости в околошовной зоне. Поэтому ограничение максимальной твердости некоторым критическим значением может служить критерием для выбора стали и условий ее применения. Так, в стандартах Японии на сталь для сварных конструкций помимо ограничений по углеродному эквиваленту с 70-х годов введено ограничение твердости в околошовной зоне не выше 350 *HV*.

Следует также иметь в виду, что в прокате каждой стали содержание элементов может изменяться в определенном (часто весьма широком) диапазоне. В соответствии с этим и углеродный эквивалент стали каждой марки также может изменяться в весьма широких пределах (табл. 1.1).

Все стали по технологической пригодности к сварке для данной конструкции с учетом ограничений по углеродному эквиваленту и максимальной твердости в околошовной зоне условно могут быть разделены на следующие группы: 1) стали, свариваемые без ограничений (без подогрева и термообработки); 2) стали, ограниченно свариваемые, для которых назначаются предварительный и сопутствующий подогревы, проковка швов, промежуточная и последующая термообработка в зависимости от тепловых режимов сварки и конструктивных особенностей соединений (тепловложения, формы соединения, толщины); 3) трудносвариваемые стали, для которых во всех случаях необходима дополнительная страховка: подогрев, промежуточная и последующая термообработка, проковка швов и др.; 4) стали, не применяемые для изготовления данных сварных конструкций.

От качества строительной стали помимо вероятности образования разрушений в околошовной зоне, получивших название холодных трещин и трещин задержанного разрушения, зависит также вероятность образования при сварке так называемых горячих (кристаллизационных) трещин в металле шва и ламелярных (слоистых) трещин в окружающем шов основном металле. На образование кристаллизационных трещин в швах влияет состав основного металла и его количество, переходящее в металл шва. Наибольшая доля основного металла попадает в металл шва при автоматической сварке под флюсом и в углекислом газе. Кристаллизационные трещины в угловых швах при сварке под флюсом образуются, если в металле шва содержатся элементы в количестве: углерод — более 0,14 %, кремний — более 0,25 %, сера — более 0,045 %, фосфор — более 0,05 %. Для получения сварных швов без трещин очень важно, чтобы элементы распределялись в прокате равномерно. При сегрегациях, например, в кипящей стали, образование кристаллизационных трещин наиболее вероятно.

На образование кристаллизационных и ламелярных трещин влияет также загрязненность неметаллическими включениями и форма последних. Наибольший вред наносят сернистые включения. В США, например, с целью предупреждения образования горячих трещин содержание серы в высокопрочных сталях для конструкций общего назначения ограничивают пределом 0,03 %, в сталях для сосудов давления — 0,025 %, в высокопрочных сталях с пределом текучести 900 МПа и выше — 0,010 %. О возникновении и предупреждении образования ламелярных трещин более подробно говорится на стр. 14, 15 и в параграфе 1.8.

Значительная роль в инициировании образования при сварке холодных трещин, трещин задержанного разрушения и ламелярных принадлежит водороду. Поэтому склонность сварных соединений к трещинам может быть понижена также уменьшением содержания водорода в металле шва. Это достигается применением низководородистых электродов и флюса, тщательной очисткой свариваемых кромок и проволоки, прокалкой электродов и флюса непосредственно перед сваркой, сопутствующим и последующим подогревом. Чем выше предел текучести стали и прочности металла шва, тем ниже допустимое содержание влаги в электродном покрытии. Так, согласно американским источникам, если при

Таблица 1.1. **Пределы изменения углеродного эквивалента для сталей, подсчитанные по формуле (1.1)**

Марка стали	$C_э$, %		
	минимальный	максимальный	средний
Ст3	0,24	0,42	0,33
09Г2С	0,33	0,52	0,42
15ХСНД	0,33	0,53	0,43
09Г2	0,35	0,52	0,44
10ХСНД	0,35	0,52	0,44
17Г1С	0,37	0,56	0,47
14Г2АФ	0,36	0,58	0,47
15Г2АФДпс	0,37	0,57	0,47
16Г2АФ	0,40	0,62	0,51

сварке стали нормальной и повышенной прочности содержание влаги может не оговариваться, то для высокопрочной стали с пределом текучести около 400, 800 и 1000 МПа оно не должно превышать соответственно 0,6; 0,2 и 0,1 %.

Не менее острая проблема при получении качественных сварных соединений возникает из-за склонности стали под влиянием сварки к ухудшению сопротивления хрупкому разрушению (хладостойкости). Оно выражается в смещении температуры хрупкости (в сравнении с исходным, основным металлом) в сторону положительных температур и бывает обусловлено несколькими причинами. Среди них — образование грубой неоднородной микроструктуры в зоне перегрева у границы сплавления, динамическое деформационное старение, твердение из-за выделения дисперсных карбонитридных частиц и др. Пониженная хладостойкость может наблюдаться на любом участке металла шва и околошовной зоны. Однако наиболее заметно она обычно проявляется в зоне перегрева у границы сплавления.

Уровень хладостойкости существенно зависит от тепловых режимов сварки. Поэтому важной задачей оценки свариваемости стали является определение области тепловых параметров процесса (скорости охлаждения, длительности пребывания при температуре выше некоторой критической), обеспечивающих оптимальные механические свойства металла околошовной зоны и сварного шва.

При сварке термически или механически упрочненной строительной стали возможно локальное разупрочнение в околошовной зоне. Оно обусловлено совместно протекающими процессами отпуска и фазовой перекристаллизации. Локальное разупрочнение выявляется изменением твердости и составляет 10—30 % от твердости исходного основного металла [8]. Его влияние на снижение агрегатной прочности соединения зависит от протяженности разупрочненного участка, а следовательно, и от тепловых режимов сварки и вида нагружения (растяжение, изгиб, срез) [9].

Для экспериментальной оценки свариваемости строительных сталей предложено несколько способов. Среди них пробы Лихайского университета и «окно» (США), пробы «Теккен» и ТР (Япония), способы клиновидных образцов, образцов Коммереля и др. Весьма эффективными являются (развитые преимущественно в МГТУ им. Н. Э. Баумана) механизированные способы оценки свариваемости в условиях имитированных термодеформационных циклов сварки (способы ЛТП-2, ЛТП-4 и др.) [10, 11]. Более подробная информация по технологическим пробам содержится в 3.3.6. Однако большинство из этих способов требует значительного количества металла, что делает их пригодными в основном для оценки качества стали промышленных партий.

Большой градиент температур при сварке делает целесообразным использование методов локального определения структуры и свойств соединений. К таким методам относятся металлографическое исследование с помощью оптического и электронного микроскопов, измерение твердости по Виккерсу, определение ударной вязкости (и вязкости разрушения) с заданным расположением надреза (или трещины усталости). Полезно также исследовать характер полиморфных превращений в условиях имитированных термических циклов сварки. Эти методы целесообразно использовать для оценки свариваемости лабораторного металла в связи с ограниченным его количеством.

Проверка свариваемости, как и всесторонняя оценка других служебных свойств стали специальными способами, необходима только при разработке новых сталей или при решении вопроса об использовании существующей стали для той области конструкций, для которой она ранее не применялась. Для проката распространенных свариваемых сталей марок Ст3, 09Г2С, 15ХСНД, 10ХСНД при их обычном использовании достаточной гарантией свариваемости является соответствие химического состава и механических свойств нормам технических условий и стандартов.

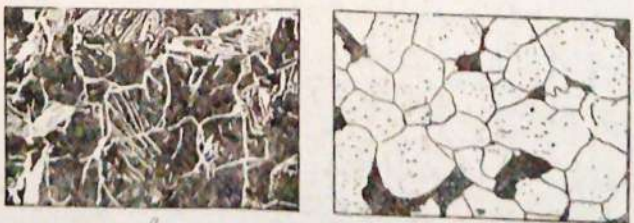
Сопротивление хрупкому разрушению. Другим требованием, ограничивающим выбор стали для сварных металлоконструкций и, в частности, препятствующим дальнейшему повышению ее прочности обычным легированием (например, кремнием), является хладостойкость. Для строительной стали с ней ассоциируется сопротивление хрупкому разрушению микросколом. При этом виде разрушения зерна металла раскалываются по определенным кристаллографическим плоскостям с образованием в изломе характерных «кристаллических» фасеток и «ручьистого узора» (рис. 1.2). Размер фасеток близок к размеру зерен в плоском сечении шлифа. Хладостойкость стали и элементов конструкций обычно определяют температурой хрупкости $T_к$, при которой возможен переход от вязкого разрушения к хрупкому микросколом. На эту температуру влияют как физические свойства стали — предел текучести, микроструктура, так и условия нагружения — уровень напряжения, жесткость напряженного состояния, величина и скорость пластической деформации. Большинство факторов, повышающих предел текучести,— увеличение содержания легирующих элементов в твердом растворе, наклеп, старение, дисперсионное твердение, радиационное упрочнение и др.— повышают $T_к$, т. е. охрупчивают сталь. Напротив, измельчение микроструктуры снижает $T_к$, т. е. повышает хладостойкость. Следовательно, непременным условием сохранения хладостойкости при повышении прочности стали является измельчение ее микроструктуры.

Очень велика роль жесткости напряженного состояния; так, переход от условий растяжения гладкого образца к растяжению или изгибу образца с острым надрезом повышает температуру хрупкости на 170—200 °С.

Предложено много способов экспериментальной оценки хладостойкости стали и металла соединений, в том числе с использованием методов механики разрушения. Однако наибольшее распространение при поставке металлопроката и производстве сварных соединений получили испытания на динамический изгиб призматических образцов по ГОСТ 9454—78 с полукруглым ($r = 1$ мм) или треугольным ($r = 0{,}25$ мм) надрезами. Показателем хладостойкости служит температура, при которой ударная вязкость или доля волокнистой поверхности в изломе достигают нормируемой величины. Более подробную информацию о природе хрупкого разрушения сварных конструкций см. в параграфе 7.8.

На практике требования к материалу конструкции по хладостойкости обычно устанавливаются на основе накопленного опыта, а также путем сравнения результатов стандартных испытаний на динамический изгиб с результатами испытаний натурных образцов, по возможности полно имитирующих поведение конструкции. Так, например, обусловлены опытом действующие нормы ударной вязкости углеродистой стали для строительных, эксплуатируемых в обычных условиях при расчетных температурах не ниже —40 °С, металлоконструкций $KCU^{-20°C} \geqslant 29$ Дж/см² и низколегированной стали $KCU^{-40°C} \geqslant 0{,}29...0{,}49$ Дж/см², а также низколегированной стали для конструкций «северного исполнения» $KCU^{-70°C} \geqslant 29$ Дж/см². Нормы ударной вязкости $KCV^t \geqslant 78$ Дж/см² и доли волокна в изломе $B^t \geqslant 80$ % (t — температура эксплуатации) низколегированной стали для труб магистральных газопроводов установлены сравнением результатов стандартных испытаний на динамический изгиб и испытаний натурных образцов труб.

Сопротивление вязкому разрушению выражается такими характеристиками, как предельная пластичность ($\varepsilon_к$, ψ,



а *б*

Рис. 1.2. Строение поверхности излома при хрупком разрушении микросколом (*а*) и микроструктура феррито-перлитной строительной стали (*б*). Электронный сканирующий и оптический микроскопы соответственно. ×500.

Рис. 1.3. Строение поверхности излома при вязком разрушении строительной стали. Электронный сканирующий микроскоп.

δ), ударная вязкость при вязком разрушении (KC^{max}), анизотропия вязкости и пластичности, истинное сопротивление разрыву ($S_к$). Оно очень важно для обеспечения надежной эксплуатации ряда ответственных сооружений типа оболочек, нагруженных пневматическим давлением: газопроводов большого диаметра и высокого давления, газгольдеров и резервуаров большого объема, крупногабаритных сосудов давления в виде кожухов доменных печей, оболочек аэродинамических труб, корпусов воздухонагревателей, особенно при изготовлении их из сталей повышенной и высокой прочности. Кроме того сопротивление вязкому разрушению определяет возможность выполнения операций холодной гибки, штамповки, вальцовки, правки и сварки.

Вязкое разрушение зарождается и распространяется путем образования, роста и объединения микроскопических пустот (пор). В чистых металлах и сплавах поры образуются на заключительной стадии деформирования на критических дефектах решетки, подготовленных деформированием. В технических сплавах значительную роль в образовании пор играют также неметаллические включения и выделения избыточных фаз. Неметаллические включения из-за их слабого сцепления с матрицей или хрупкости приводят к возникновению несплошностей уже на ранних этапах деформирования. Они являются причиной образования наиболее крупных пор. Более мелкие поры, как и в чистых металлах, развиваются на заключительных стадиях деформирования, по-видимому, непосредственно перед вершиной формирующейся вязкой магистральной трещины. Считают, что заключительный акт роста и слияния пор аналогичен развитию внутренних шеек, причем окончательный разрыв фибр происходит при уменьшении их поперечного сечения до нуля.

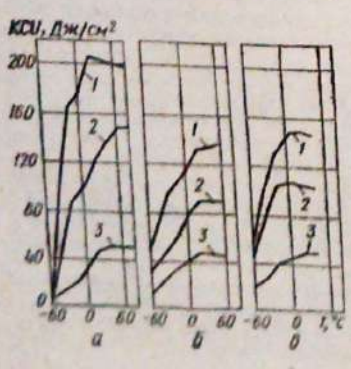


Рис. 1.4. Зависимость ударной вязкости от температуры для образцов, вырезанных в продольном направлении (*1*), в поперечном направлении (*2*) и в направлении толщины (*3*) из толстых листов строительных сталей типа Ст3 (*а*), 14ГС (*б*) и 16Г2АФ (*в*).

В результате возникает характерная микроструктура поверхности вязкого разрушения, состоящая из округлых ямок (или чашек), разделенных острыми гребнями (рис. 1.3). Полагают, что размеры чашек, их однородность и, главное, глубина отражают энергоемкость вязкого разрушения: чем больше размеры чашек, однороднее их распределение и больше глубина, тем больше локальная пластическая деформация и выше энергоемкость.

Как и при хрупком разрушении, измельчение зерна микроструктуры повышает сопротивление вязкому разрушению строительной стали. Однако определяющую роль в сопротивлении вязкому разрушению все же играют неметаллические включения. При этом разрозненные включения компактной или глобулярной формы даже при высоком их содержании (до 0,5—1 % по объему) слабо изменяют вязкость и пластичность стали. Значительно сильнее отрицательное влияние вытянутых и строчечных включений [18].

Наибольшее влияние на качество металлопроката строительной стали имеют образующиеся при раскислении и затвердевании сульфидные и кислородные неметаллические включения (эндогенные сульфиды и оксиды). В хорошо раскисленной стали это в основном включения сульфида марганца (II и III типа по классификации Симса) и глинозема. Горячая прокатка придает пластичным при высокой температуре включениям сульфида марганца сильно вытянутую в плоскости и направлении деформирования форму. Сегрегации мелких включений глинозема, представляющих, как полагают, обломки первичных выделений развитой дендритной формы, также преобразуются прокаткой в плоские или вытянутые скопления, часто весьма большой протяженности. Эти вытянутые и строчечные включения являются главной причиной анизотропии вязкости и пластичности металлопроката, которая выражается в заметном ухудшении этих свойств при переходе от испытаний в продольном направлении к испытанию в поперечном, а также при переходе к испытанию в направлении вдоль толщины изделия (рис. 1.4). На рис. 1.5 показано влияние вытянутых включений MnS и строчечных (плоских) скоплений глинозема на характер разрушения образца, вырезанного из листа горячекатаной низколегированной стали в направлении толщины.

Особенно сильно анизотропия пластичности проявляется в металлоизделиях, полученных контролируемой прокаткой и термомеханической обработкой. В этой новой технологии горячее деформирование при пониженных температурах сообщает сульфидам марганца максимальную вытянутость. При разрушении таких изделий образуются слоистые изломы, которые хотя и понижают температуру хрупкости, определяемую по характеру излома (так называемый сульфидный парадокс), однако резко снижают энергоемкость вязкого разрушения. Это особенно нежелательно для конструкций типа оболочек, нагруженных пневматическим давлением, от которых требуется высокое сопротивление распространению протяженных вязких разрушений.

Анизотропия пластичности сильно ограничивает пригодность стали к операциям холодной гибки, штамповки, глубокой вытяжки, завальцовки, приводя к преждевременному образованию трещин. Но чаще всего она сказывается на образовании ламелярных (пластинчатых) или слоистых трещин при сварке. Они возникают в основном металле вблизи сварных швов под воздействием напряжений и термодеформационных циклов сварки и имеют характерное ступенчатое строение (рис. 1.6.) Эти трещины часто поражают участки конструкции большой протяженности вдоль сварных швов, нередко приводя в негодность все изделие. Устранение ламелярных трещин требует больших затрат.

Для уменьшения анизотропии вязкости и пластичности следует добиваться по возможности более низкого содержания в стали серы (например, не выше 0,01 %) и кислорода. Когда этого недостаточно, прибегают к направленному воздействию на химический состав, форму, размеры и распределение неметаллических включений — модифицированию [19]. Равномерно распределенные сульфидные включения компактной формы, слабо деформируемые при прокатке, образуются при введении в сталь небольших добавок металлов-модификаторов: циркония, титана, редко-

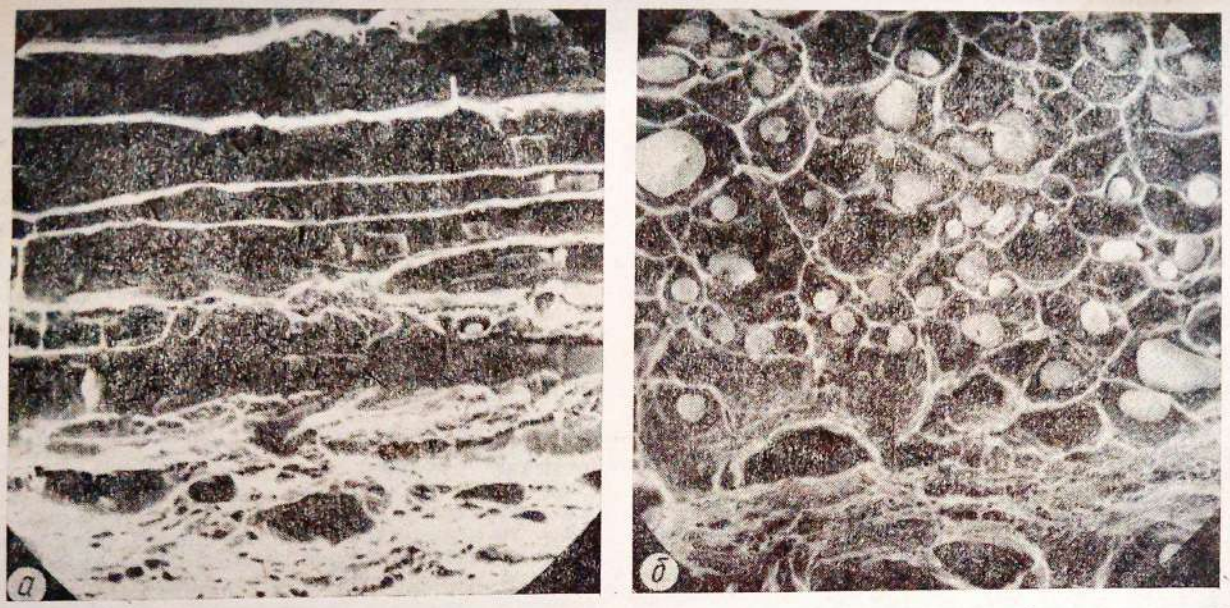


Рис. 1.5. Поверхность разрушения образца, вырезанного из листа низколегированной стали в направлении толщины: *а* — сульфидные вытянутые пластинчатые включения; *б* — строчечные оксидные включения. Электронный сканирующий микроскоп (×1000).

земельных металлов или кальция, а также модификаторов-металлоидов: теллура или селена. Наиболее благоприятны результаты при модифицировании кальцием и его соединениями, а также Са в сочетании с РЗМ, так как одновременно с модифицированием сульфидных включений достигается наиболее полное удаление включений глинозема.

Для экспериментальной оценки сопротивления стали вязкому разрушению пригодны предельная пластичность ($\varepsilon_к$, δ, ψ) и истинное сопротивление разрыву ($S_к$), получаемые при испытании на растяжение, в том числе на образцах, вырезанных из проката в направлении толщины, полные диаграммы деформирования в координатах истинные напряжения — истинные деформации, а также уровень ударной вязкости при вязком разрушении (верхний горизонтальный участок на температурной зависимости ударной вязкости).

Технико-экономическая эффективность применения строительной стали в металлоконструкциях определяется в основном двумя показателями: изменением массы конструкций и изменением их стоимости. Снижение массы конструкции в большинстве случаев не является достаточным стимулом для применения более прочной стали. Другое непременное условие — получение экономического эффекта.

Стоимость стали повышенной и высокой прочности, как правило, выше стоимости традиционной углеродистой стали, поэтому замена рентабельна только в том случае, если возможное удорожание металла перекроется экономией путем снижения массы конструкции.

Экономический эффект от применения нового материала в конструкциях обычно подсчитывают методом приведенных затрат, включающим три следующих этапа [20, 21]: 1) определение удельного (и общего) изменения массы металла, обусловленного применением более эффективной новой стали вместо традиционной; 2) расчет удельной стоимости металлоконструкций «в деле» при изготовлении их из традиционной и новой стали; 3) определение изменения стоимости металлоконструкций «в деле» для эквивалентного количества традиционного и нового материалов (собственно экономический эффект).

Правильно оценить технико-экономическую эффективность как характеристику данного материала, мало зависящую от его относительного количества, можно путем отнесения полученной экономии к массе элемента, в котором эта сталь применена, причем методически удобно брать массу элемента, получаемую при изготовлении его из нового материала (стали повышенной или высокой прочности). При этом снижение массы конструкции определяется коэффициентом приведения $k_н$ или коэффициентом экономии массы $q_н$, зависящими от расчетных сопротивлений традиционного (т) и нового (н) материалов:

$$k_н = G_т/G_н; \tag{1.5}$$

$$q_н = (G_т - G_н)/G_н = k_н - 1. \tag{1.6}$$

Применительно к конструкциям, в которых можно пренебречь влиянием изменения массы элементов на расчетную нагрузку, для элементов, испытывающих растяжение или сжатие,

$$k_н = R_н/R_т; \tag{1.7}$$

для поперечно-изогнутых элементов компактного квадратного или круглого сечения

$$k_н = \sqrt[3]{(R_н/R_т)^2}; \tag{1.8}$$

то же, но для элементов прямоугольного сечения с одинаковой шириной

$$k_н = \sqrt{R_н/R_т}; \tag{1.9}$$

для сжато-изогнутых (продольно-изогнутых) элементов

$$k_ц = \varphi_н R_н/\varphi_т R_т. \tag{1.10}$$

В этих формулах G — масса элемента; R — основное расчетное сопротивление материала; φ — коэффициент продольного изгиба.

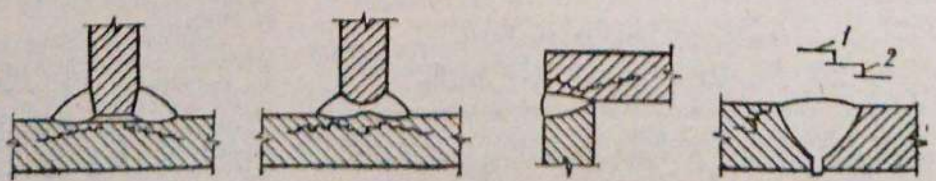


Рис. 1.6. Схема расположения ламелярных или слоистых трещин в сварных соединениях разной формы:
1 — террасы; *2* — разрывы.

Таблица 1.2. Технико-экономическая эффективность применения в строительных металлоконструкциях сталей разных уровней прочности [21]

Марка стали	ТУ или ГОСТ	Предел текучести/основное расчетное сопротивление, МПа, по СНиП II-23—81	Средневзвешенные значения		Относительная удельная стоимость металлоконструкций «в деле» *, %	Экономический эффект по отношению к базовой удельной стоимости «в деле», %
			$k_н$	$q_н$		
Ст3сп5 (база)	ГОСТ 380—88	235/225	1,00	0	100	0
Ст3сп5-1	ТУ 14-1-3023—80	235/230	1,02	0,02	101	0,7
Ст3сп5-2	То же	265/260	1,12	0,12	103	8,9
09Г2С-6-1	»	325/315	1,24	0,24	112	11,6
09Г2С-6-2	»	345/335	1,37	0,37	114	22,8
14Г2АФ	ГОСТ 19282—73	390/370	1,46	0,46	123	23,4
16Г2АФ	То же	440/400	1,55	0,55	127	28,4
12Г2СМФ	ТУ 14-1-1308-75	590/515	1,92	0,92	156	35,8

* При одинаковом коэффициенте трудоемкости изготовления (сложности конструкции) $k_{т.и} = 1,3$.

В ЦНИИПроектстальконструкций определены коэффициенты $k_н$ и $q_н$ для различных элементов конструкций из сталей разных уровней прочности с учетом вида нагрузок и сопоставлены с аналогичными коэффициентами для элементов из углеродистой стали Ст3сп по ГОСТ 380—88. Например, для элементов конструкций промышленных зданий из высокопрочной стали марки 16Г2АФ с пределом текучести 440 МПа при различных видах нагружения — растяжении, сжатии с продольным изгибом, поперечном изгибе — коэффициент приведения имеет значения соответственно 1,87; 1,25 и 1,42. С учетом доли растянутых, сжатых и изогнутых элементов в металлоконструкциях подсчитаны также средневзвешенные значения $k_н$ и $q_н$ для стали каждого уровня прочности. Некоторые из них приведены в табл. 1.2 (для листовой стали толщиной 11—20 мм).

Общая экономия металла (в тоннах) может быть подсчитана умножением массы примененной новой стали на соответствующее значение $q_н$:

$$\Delta G = q_н G_н. \qquad (1.11)$$

В частном случае, когда одна прочная сталь («1») заменяется другой, более прочной сталью («2»), коэффициент приведения

$$k_{н2-1} = k_{н2}/k_{н1}; \qquad (1.12)$$

а общая экономия металла

$$\Delta G = (k_{н2}/k_{н1} - 1)\, G_{н2}. \qquad (1.13)$$

Удельная стоимость металлоконструкций «в деле» $c_д$ представляет собой совокупность затрат на основные материалы $c_{о.м}$, изготовление $c_н$, перевозку $c_т$ и монтаж $c_м$ конструкций:

$$c_д = 1,325\,(c_{о.м} + c_н) + 1,153c_т + 1,145c_м \text{ (руб/т)}. \qquad (1.14)$$

Здесь 1,325; 1,153 и 1,145 — коэффициенты, учитывающие заготовительно-складские расходы и нормативную рентабельность при изготовлении, а также накладные расходы и плановые накопления при монтаже конструкций. Они взяты для условий конкретных предприятий и зависят от структуры производства, существовавшей до 1990 г.

Каждую из указанных затрат можно подсчитать по формулам

$$c_{о.м} = 1,035k_{отх}\,(Ц_м k_{доп} + N); \qquad (1.15)$$

$$c_н = k_{у.и}\,(k_2 k_{т.и} T + c_{вн}); \quad c_м = k_{у.м} c'_м,$$

где $k_{отх}$ — расходный коэффициент металла (в среднем по отрасли составляет 1,04—1,05); $Ц_м$ — оптовая цена прокатной стали, руб./т; $k_{доп}$ — коэффициент приплат за дополнительные требования к прокатной стали; N — средняя стоимость доставки металлопроката от станции назначения до завода металлоконструкций, руб/т; 1,035 — коэффициент стоимости прочих основных материалов; $k_{у.и}$, $k_{у.м}$ — коэффициенты удорожания изготовления и монтажа, которые в зависимости от прочности стали изменяются соответственно от 1 до 1,6 и от 1 до 1,3; k_2 — коэффициент, учитывающий основную зарплату производственных рабочих и долю накладных расходов, $k_2 \approx 4,11$; $k_{т.и}$ — коэффициент трудоемкости изготовления, обусловленный сложностью конструкции; T — время изготовления 1 т конструкции с единичной трудоемкостью ($k_{т.и} = 1$), чел.-ч; $c_{вн}$ — стоимость непроизводственных расходов, руб/т; $c'_м$ — удельная стоимость монтажа конструкций из традиционной стали, руб/т.

Значения $k_{т.и}$, $c_т$ и $c'_м$ принимаются по действующим прейскурантам оптовых цен на строительные металлоконструкции и на их монтаж, значения $Ц_м$ и $k_{доп}$ — по прейскурантам оптовых цен на стальной прокат.

Экономический эффект от применения новой стали вместо традиционной определяется путем сопоставления приведенных затрат по известной формуле, учитывающей капитальные вложения в производственные фонды и их эффективность. Однако в связи с тем, что при получении и использовании новой и традиционной стали капитальные вложения в производственные фонды практически одинаковы, определение удельного экономического эффекта $Э_{уд}$ сводится к сравнению стоимости металлоконструкций «в деле» для эквивалентных количеств традиционного и нового материалов:

$$Э_{уд} = c_{д.т} k_н - c_{д.н}. \qquad (1.16)$$

Общий экономический эффект получают умножением удельного экономического эффекта на массу примененной новой стали:

$$Э = Э_{уд} G_н. \qquad (1.17)$$

Эти формулы показывают, что экономический эффект определяется, во-первых, снижением металлоемкости ($q_н$, $k_н$), т. е. прочностными характеристиками нового материала, и, во-вторых, стоимостью «в деле» изготовленных из него конструкций ($c_{д.н}$). При этом основное значение имеет стоимость проката новой стали (оптовая цена и приплаты $Ц_м k_{доп}$), достигающая 50 % и более от стоимости металлоконструкций «в деле».

Удельная экономическая эффективность для ряда строительных сталей разной прочности показана в табл. 1.2. Видно, что возможный экономический эффект от использования сталей заметно возрастает по мере повышения их прочности. Приведенные данные показывают, что существуют большие резервы экономии металла и снижения стоимости конструкций вследствие упрочнения строительной стали.

1.1.2. Классификация сталей

Стали, используемые в сварных строительных металлоконструкциях, различаются по ряду признаков, зависящих от технологии их изготовления, служебных свойств и области применения. Важнейшими из этих признаков являются способ выплавки и разливки, степень раскисленности, химический состав, состояние поставки, уровень (класс) прочности и категория (группа) качества по хладостойкости.

По способу выплавки применяемую в сварных металлоконструкциях сталь можно разделить на мартеновскую, кислородно-конвертерную и электросталь. Кроме того для особо ответственных конструкций перспективной является сталь из железа прямого восстановления и после рафинирующего, преимущественно электрошлакового, переплава.

До 1960 г. для строительных металлоконструкций использовали почти исключительно сталь, выплавленную в мартеновских печах. Сейчас во всем мире получил большое распространение наиболее производительный способ выплавки в кислородных конвертерах. Качество кислородно-конвертерной стали не уступает качеству мартеновской, и с 1971 г. сталь, выплавленную в мартеновских печах или в кислородных конвертерах, по нормам на поставку и применение стального проката не разделяют. Необходимым условием высокого качества стали является высокая чистота используемого для продувки конвертерной плавки кислорода — не менее 99,5 %; при меньшей чистоте в сталь попадает азот воздуха, вызывающий механическое старение и снижение хладостойкости.

С пуском крупных электродуговых печей с массой плавки 100—250 т и более увеличилась выплавка строительной стали в электропечах. Эта сталь отличается пониженным содержанием вредных примесей — серы и фосфора. Еще меньше этих нежелательных элементов, а также примесей металлов — олова, сурьмы, висмута, способствующих отпускной хрупкости,— в стали из железа прямого восстановления. Для этого материала исходным продуктом служит не передельный чугун, выплавленный в доменных печах, а губчатое железо, получаемое обработкой рудного концентрата в специальных восстановительных печах. Окончательный продукт выплавляют в электродуговых печах и (или) кислородных конвертерах.

В процессе электрошлакового переплава исходные плоские заготовки (слябы), используемые в качестве вертикальных электродов, последовательно переплавляются в ванне из жидкой шлаковой смеси специального химического состава, нагреваемой электрическим током [22]. При этом содержание серы и кислорода в металле уменьшается в 2—3 раза. Неметаллические включения, еще остающиеся в слитке, имеют малые размеры и равномерно распределены. В настоящее время этим способом получают слитки массой по 15—25 т, подвергаемые обычной прокатке.

Уменьшению содержания вредных примесей и более однородному их распределению служит также внепечная обработка жидкой стали. Сталь после внепечной обработки по содержанию примесей и однородности их распределения часто не уступает металлу электрошлакового переплава; при этом стоимость ее меньше.

По степени раскисленности сталь делят на кипящую, полуспокойную и спокойную. При выплавке стали в печи или конвертере из передельного чугуна, содержащего 3—4 % С, окисление углерода (до содержания в стали 0,06—0,25 %) связано с образованием газообразных продуктов CO и CO_2, вызывающих кипение металлической ванны. Если не проводить раскисления, то кипение продолжается после выпуска плавки в ковш и после разливки ее в изложницы до затвердевания слитка. Такая сталь называется кипящей. Выделение газообразных продуктов при кристаллизации слитка кипящей стали приводит к резкому усилению его неоднородности по химическому составу, особенно по содержанию углерода, серы и фосфора, называемой ликвацией. Головная часть и сердцевина слитка загрязнены примесями. Наблюдаются также почти вертикальные полосы ликвации, называемые «усами». Зона максимального содержания ликвирующих элементов в слитке кипящей стали расположена на расстоянии 0,05—0,15 высоты слитка от его верха; ликвация по углероду достигает 400 % и по сере — 900 % от среднего содержания этих элементов в плавке. Идущая в отход при прокатке головная часть слитка (обрезь) кипящей стали составляет 4—10 % от его массы. При такой обрези из обычного слитка массой 8—25 т возможно получение проката, в котором имеются обширные зоны ликвации с содержанием углерода до 0,3—0,4 % и серы до 0,15 % при среднеплавочном содержании 0,12—0,22 % С и не более 0,05 % S. В результате листы или профили одной партии (плавки) кипящей стали, изготовленные из разных частей слитка (головной, средней или донной), неодинаковы по содержанию углерода, серы и фосфора. По сечению готового проката углерод и примеси также распределены неравномерно: центральные слои загрязнены ими, наружные значительно чище. Неоднородность химического состава проката вызывает неоднородность микроструктуры и механических свойств.

Другими особенностями кипящей стали являются высокое содержание кислорода, низкое содержание кремния, марганца, алюминия и повышенная склонность к образованию крупнозернистой микроструктуры. Вследствие этого кипящая сталь характеризуется пониженными прочностью и сопротивлением хрупкому разрушению, особенно в прокате толщиной не менее 20 мм.

Спокойная сталь раскисляется в сталеплавильном агрегате, а также в ковше при выпуске из печи. Для этого в жидкий металл вводятся энергичные раскислители: марганец, кремний, алюминий, иногда кальций или титан. Эти элементы обладают бо́льшим сродством к кислороду, чем углерод, поэтому окисление углерода прекращается и сталь перестает кипеть. Благодаря этому слитки спокойной стали гораздо однороднее по химическому составу. Ликвация по углероду лишь на 60 %, а по сере — на 110 % превышает среднеплавочное содержание этих элементов.

Содержание кислорода в спокойной стали меньше, чем в кипящей или полуспокойной. Наличие в химическом составе элементов-раскислителей и, главное, остаточного алюминия делает спокойную сталь менее склонной к росту зерна. Поэтому прочность и сопротивление хрупкому разрушению более однородного и мелкозернистого проката спокойной стали выше, чем таковые проката кипящей стали.

Затвердевание слитка спокойной стали связано с образованием большой усадочной раковины. Для получения здорового тела слитка сталь разливают в изложницы с теплоизолирующими прибыльными надставками. Усадочная раковина образуется в верхней утепленной части слитка — прибыли, которую при прокатке удаляют. Обрезь составляет 12—16 % массы слитка. Поэтому выход годного проката из слитков спокойной стали меньше, чем из слитков кипящей. Вследствие этого, а также большей продолжительности плавки из-за операции раскисления, дополнительного расхода ферросплавов и алюминия спокойная сталь дороже кипящей.

Низкое качество кипящей стали и низкая технико-экономическая эффективность спокойной послужили поводом для разработки стали с промежуточной степенью раскисленности — полуспокойной [23, 37, 38]. Она выплавляется как кипящая, но в ковше или при разливке в изложницы обрабатывается меньшим количеством раскислителей, чем при выплавке спокойной стали. Обычно применяют комплексное раскисление ферросилицием и алюминием. Быстрое прекращение кипения и затвердевание головной части слитка предотвращают развитие большой химической неоднородности. При этом для ликвации в слитках полуспокойной стали характерно превышение среднеплавочного содержания углерода на 80 % и серы на 150 %. Расстояние осевой ликвационной зоны от верха слитка составляет 0,15—0,3 его высоты, головная обрезь — 3—5 % от массы слитка.

Производство полуспокойных сталей характеризуется высокой технико-экономической эффективностью. По сравнению с производством спокойной стали выход годного проката из слитков выше на 8—10 %, расход ферросилиция на раскисление снижен в 2—5 раз, алюминия — в 5 раз, существенно уменьшается число изложниц и трудоемкость их подготовки. Себестоимость и цена проката из полуспокойной стали на 2—9 % ниже, чем из спокойной. Однако по

Таблица 1.3. **Классы прочности и категории качества по хладостойкости проката стоительных сталей [3]**

Класс прочности *	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	Температура, °С, при которой гарантируется $KCU \geqslant 0{,}3$ МДж/м², для категории качества по хладостойкости		
	не менее			I	II	III
1 (С38/23)	225	375	25	Не гарантируется	—20	Не применяется
2 (С44/29)	285	430	21	Не применяется	—40	—70
3 (С46/33)	325	450	21	То же	—40	—70
4 (С52/40)	390	510	19	»	—40	—70
5 (С60/45)	440	590	16	»	—40	—70
6 (С70/60)	590	685	12	»	—40	—70
7 (С85/75)	735	830	10	»	—40	—70

* В скобках — прежнее обозначение.

однородности химического состава, микроструктуры и механических свойств, сопротивлению хрупкому разрушению и показателям прочности прокат из полуспокойной стали уступает прокату из спокойной стали, занимая между ним и прокатом из кипящей стали промежуточное положение.

Способ разливки. Существуют разные способы разливки на слитки в изложницы, но они не вносят принципиальных различий в структуру и свойства готового проката. Значительно большие изменения возникают при переходе на новый прогрессивный способ получения слитков на машинах непрерывного литья заготовок [35]. Новый способ позволяет избежать прокатки слитков на обжимных заготовительных станах, резко увеличивает выход годного проката из слитков, уменьшает энергетические и материальные затраты производства. Вместе с тем особая структура слитка, обусловленная условиями формирования непрерывно-литой заготовки в полом водоохлаждаемом кристаллизаторе при непрерывном вытягивании, может служить причиной появления специфических дефектов. Основные из них — осевая рыхлость, осевая химическая неоднородность, осевые трещины. В поперечном сечении листовой заготовки (сляба) эти дефекты располагаются в зоне, имеющей вид прямолинейной полосы, проходящей по центру сечения параллельно большим граням слитка. В готовом прокате осевая химическая неоднородность проявляется в сильно обогащенном углеродом, серой и фосфором (а иногда и марганцем) центральном слое толщиной 0,5—3 мм в срединной плоскости листа. Этот слой служит местом образования неблагоприятной микроструктуры, что снижает пластичность и прочность при растяжении в направлении толщины; в нем концентрируются неметаллические включения, трещины и другие нарушения сплошности. Часто нарушения сплошности в виде трещин слоистого разрушения в зоне осевой ликвации листов из непрерывно-литых заготовок образуются при сварке, огневой резке, рубке на ножницах, штамповке и гибке.

Согласно многочисленным, главным образом зарубежным, исследованиям исключить или уменьшить осевую химическую неоднородность и вероятность образования связанных с ней дефектов удается комплексом мероприятий, обеспечивающих повышение чистоты стали по неметаллическим включениям, например внепечной обработкой, снижением температуры литья, точным регулированием зазора между роликами, вытягивающими заготовку из кристаллизатора, применением устройств для электромагнитного перемешивания затвердевающего расплава в слитке и др.

Разливка на машинах непрерывного литья заготовок применяется в основном для спокойных сталей, реже — для полуспокойных. Разливка этим способом кипящих сталей затруднена образованием в слитках крупных газовых пор.

Химический состав стали — главная характеристика, определяющая ее марку. При этом содержание химических элементов для данной марки стали задается не дискретно, а с некоторым интервалом, в пределах которого изменение химического состава не должно сопровождаться ухудшением свойств ниже гарантируемых уровней. Ширина интервала связана с возможностью сталеплавильного производства соблюдать заданную композицию.

Стали, в которых отсутствуют легирующие элементы или имеется лишь небольшое их количество, обусловленное технологией выплавки, называются углеродистыми. По содержанию углерода различают стали низкоуглеродистые (до 0,25 % С), среднеуглеродистые (0,3—0,6 % С) и высокоуглеродистые (свыше 0,6 % С). Для сварных строительных металлоконструкций используют преимущественно стали с низким содержанием углерода. Они поставляются по ГОСТ 380—88, ГОСТ 14637—79 и ГОСТ 27772—88. В отдельных случаях используется углеродистая сталь по ГОСТ 1050—74, главным образом в виде труб.

Стали, в которые вводятся добавки легирующих элементов для обеспечения требуемых свойств, называются легированными. Они могут содержать один, два, три и более легирующих элементов. Так, различают марганцовистую, хромистую, кремнемарганцовистую, хромоникельмолибденовую и другие легированные стали.

Легированные стали с небольшим содержанием легирующих элементов, обычно в сумме не превышающим 2—3 % по массе, и с низким содержанием углерода, используемые в строительстве, машиностроении, судостроении для изготовления сварных металлоконструкций, называют низколегированными. Эти стали применяются потребителем, как правило, в состоянии поставки, без дополнительной термической обработки. Прокат низколегированных сталей для строительных металлоконструкций поставляется по ГОСТ 19281—89, ГОСТ 6713—75, ГОСТ 27772—88 и ряду технических условий.

Стали с общим содержанием легирующих элементов более 10 % по массе при содержании одного из элементов не менее 8 % называются высоколегированными. Они обладают особыми свойствами: коррозионной стойкостью, жаростойкостью, жаропрочностью, хладостойкостью при низких отрицательных (криогенных) температурах и др. Их используют в строительных металлоконструкциях только для специальных целей. Эти стали поставляются по ГОСТ 5632—72 и специальным техническим условиям.

Состояние поставки является важным показателем качества, так как обычно в строительных конструкциях металлопрокат используется в том виде, в котором он выпускается металлургическими заводами. В большинстве случаев металлопрокат поставляется непосредственно после обычной горячей прокатки. В этом состоянии он редко обладает оптимальным сочетанием свойств. Возможна также поставка стали в термообработанном состоянии, причем различают два основных вида термической обработки проката: нормализацию и термическое улучшение. Нормализация — нагрев до 890—950 °С с последующим охлаждением на воздухе — измельчает микроструктуру и делает ее более однородной, повышает вязкость и пластичность. Термическое улучшение включает закалку — резкое охлаждение проката в воде или под водяным душем после нагрева до 890—950 °С и отпуск — нагрев и выдержку при 550—700 °С. Термическое улучшение существенно измельчает микроструктуру стали, повышает прочность и хладостойкость. Различают термическое улучшение с закалкой после специального нагрева (в камерной или методической печи) и с закалкой с использованием тепла прокатного нагрева.

В последнее время находит применение технология производства проката, при которой измельчение микроструктуры, повышение прочности и хладостойкости достигаются непосредственно в процессе горячей деформации путем выбора надлежащих температурно-деформационных режимов, снижением температуры конца прокатки и увеличением обжатий при этих пониженных температурах. Такой процесс носит название контролируемой прокатки [25].

Еще более благоприятный комплекс свойств прочности и хладостойкости удается получить с помощью технологии, в которой контролируемая прокатка сочетается с принуди-

тельным ускоренным охлаждением, близким по скорости к закалке в процессе термического улучшения. Этот технологический процесс называют термомеханической обработкой или высокотемпературной термомеханической обработкой.

Классы прочности и категория качества по хладостойкости. Применяемые в строительных металлоконструкциях стали по гарантированным значениям предела текучести и временного сопротивления разрыву разделены на семь основных уровней (классов) прочности (табл. 1.3) [3]. Сталь первого класса ($\sigma_т \geqslant 225$ МПа) условно принято называть сталью нормальной прочности, сталь трех следующих классов ($\sigma_т \geqslant 285$, $\sigma_т \geqslant 325$ и $\sigma_т \geqslant 390$ МПа) — сталью повышенной прочности и сталь остальных трех классов ($\sigma_т \geqslant \geqslant 440$, $\sigma_т \geqslant 590$ и $\sigma_т \geqslant 735$ МПа) — сталью высокой прочности. Первому классу прочности соответствует прокат из углеродистой стали обыкновенного качества в горячекатаном состоянии, классам прочности от второго до пятого — прокат из низколегированной стали в горячекатаном или нормализованном состоянии, шестому и седьмому классам — прокат из экономнолегированной стали, поставляемой, как правило, в термоулучшенном состоянии. Прокат второго и третьего классов получают также путем термического и термомеханического упрочнения или контролируемой прокатки.

Наряду с требованием гарантированной прочности к строительным сталям предъявляется требование гарантированного сопротивления хрупкому разрушению (хладостойкости). Оно регламентируется показателями ударной вязкости при отрицательной температуре и при 20 °С после механического старения. Все строительные стали по хладостойкости можно условно разделить на три группы: I — без гарантированной хладостойкости; II — с гарантированной хладостойкостью для металлоконструкций, эксплуатируемых в обычных температурных условиях (расчетная температура не ниже — 40 °С); III — с гарантированной хладостойкостью, но для конструкций, эксплуатируемых при расчетных температурах ниже —40 °С (так называемое северное исполнение).

В табл. 1.3 приведена температура испытаний, при которой должна быть гарантирована ударная вязкость стали каждой группы качества по хладостойкости. Указанным группам соответствуют определенные марки стали и категории качества, предусмотренные стандартами. Так, по ГОСТ 27772—88 группе I соответствует сталь С235; группе II — стали С255 и С285, стали С345 и С375 категорий 1 и 3, сталь С590; группе III — стали С345 и С375 категорий 2 и 4, сталь С590К.

Температуры испытаний в табл. 1.3, как и в ГОСТ 27772—88, указаны для условий определения ударной вязкости *KCU* на стандартных образцах с полукруглым надрезом (радиус 1,0 мм) типа I по ГОСТ 9454—78, вырезаемых из листов и широкой полосы в направлении поперек направления прокатки, а из фасонных профилей и сортовой стали — вдоль направления прокатки. В последнее время намечается переход при аттестации стали к более жестким условиям определения ударной вязкости *KCV* на образцах с острым треугольным надрезом (радиус 0,25 мм) типа 11 по ГОСТ 9454—78. Использование этих образцов соответствует международной практике.

Согласно имеющимся методическим исследованиям единый переход от норм *KCU* к нормам *KCV*, общий для всех металлоизделий, отсутствует, и необходимо учитывать ряд индивидуальных особенностей, включающих как вид металлопроката, так и качество стали. Все же для такого перехода необходимо повышение температуры испытания образцов с острым надрезом, которое для металлопроката строительной стали эквивалентной хладостойкости при прочих равных условиях (те же направление вырезки образцов и метрологически обоснованное значение ударной вязкости — 0,3 МДж/м²) составляет примерно 40 °С. Таким образом, нормам *KCU* при —40 и —70 °С близки нормы *KCV* при 0 и — 30 °С.

Под влиянием колебаний содержания элементов в интервале марочного состава, неоднородности слитка и условий прокатки прочностные характеристики ($\sigma_т$, $\sigma_в$) каждой марки стали варьируют в весьма широких пределах. Стремление более полно использовать фактическую прочность проката в конструкциях привело к идее селективного разделения при поставке металлопродукции данной марки на отдельные группы прочности, отличающиеся гарантируемыми значениями предела текучести и временного сопротивления разрыву. Такое разделение на группы прочности осуществлено для строительных углеродистых и низколегированных сталей первого, второго и третьего классов прочности и нашло отражение в ТУ 14-1-3023—80 и ГОСТ 27772—88 [26]. По этим нормам каждая марка углеродистой и низколегированной стали разделена на две группы прочности, причем для второй группы гарантируемые значения предела текучести и временного сопротивления на 10—40 МПа выше, чем для первой. Высокая надежность соблюдения норм прочности и пластичности (с вероятностью не ниже 95 %) обеспечивается специальными статистическими процедурами приемки и контроля. Металлопрокат, поставляемый по этим нормам, получил название стали с гарантированным уровнем механических свойств, дифференцированным по группам прочности.

1.1.3. Сталь углеродистая обыкновенного качества

Прокат из углеродистой стали обыкновенного качества является материалом, наиболее широко применяемым в строительных металлоконструкциях [27]. По имеющимся данным доля такого проката составляет около 80 % всего проката, используемого в сварных конструкциях, и в ближайшие 10—15 лет может уменьшиться лишь незначительно.

Таблица 1.4. **Нормирование показателей для проката углеродистых сталей группы В по ГОСТ 380—71***

Категория стали	Химический состав	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ_5	Изгиб в холодном состоянии	Ударная вязкость при температуре, °С: 20	Ударная вязкость при температуре, °С: —20	Ударная вязкость после механического старения
1	+	+	—	+	+	—	—	—
2	+	+	+	+	+	—	—	—
3	+	+	+	+	+	+	—	—
4	+	+	+	+	+	—	+	—
5	+	+	+	+	+	—	+	+
6	+	+	+	+	+	—	—	+

Примечания: 1. Сталь категорий 3—6 поставляется полуспокойной и спокойной. По соглашению сторон допускается поставлять кипящую сталь марки ВСт3кп категории 3, при этом нормы ударной вязкости при 20 °С принимаются в соответствии с нормами табл. 1.8 для спокойной и полуспокойной стали ВСт3сп и ВСт3пс. 2. Знак «+» означает, что показатель нормируется, знак «—» — не нормируется. 3. Для стали категорий 1, 2 и 3, поставляемой для изготовления труб, изгиб в холодном состоянии не нормируется. 4. Сталь марки ВСт3Гсп изготовляют 4—6 категорий.

Таблица 1.5. Химический состав, % (по массе) при плавочном контроле углеродистых сталей по ГОСТ 380—71*

Марка стали	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	As
				не более					
ВСт3кп	0,14—0,22	0,30—0,60	Не более 0,07	0,04	0,05	0,30	0,30	0,30	0,08
ВСт3пс	0,14—0,22	0,40—0,65	0,08—0,17	0,04	0,05	0,30	0,30	0,30	0,08
ВСт3сп	0,14—0,22	0,80—1,10	0,12—0,30	0,04	0,05	0,30	0,30	0,30	0,08
ВСт3Гпс	0,14—0,22	0,80—1,10	Не более 0,15	0,04	0,05	0,30	0,30	0,30	0,08
ВСт3Гсп	0,14—0,22	0,80—1,10	0,12—0,30	0,04	0,05	0,30	0,30	0,30	0,08

Примечания: 1. В стали, выплавленной на базе керченских руд, допускается содержание мышьяка до 0,15 %, фосфора до 0,05 %. 2. При раскислении полуспокойной стали алюминием, титаном или другими раскислителями, не содержащими кремний, а также несколькими раскислителями (ферросилицием и алюминием, ферросилицием и титаном и др.) допустимое содержание кремния в стали менее 0,05 %. Раскисление титаном, алюминием и другими раскислителями, не содержащими кремний, указывается в сертификате. 3. Для проката из стали всех степеней раскисления толщиной до 12 мм включительно допускается снижение содержания марганца на 0,10 %. 4. Содержание азота в готовом прокате, а также в слитках, блюмсах, слябах, сутунках и заготовках, предназначенных для дальнейшей прокатки, из кислородно-конвертерной и мартеновской стали должно быть не более 0,008 %.5. Для кипящей химически закупоренной стали в готовом прокате допускается наличие кремния до 0,15 %, за исключением случаев, когда сталь предназначена для холодной высадки и вытяжки или штамповки, что должно быть оговорено в заказе. 6. В стали, изготовленной скрап-процессом, допускается содержание меди до 0,40 % при содержании углерода не более 0,20 % и хрома, никеля и меди в сумме не более 0,80 %.

Марки и общие технические требования к углеродистым сталям содержатся в ранее действовавшем ГОСТ 380—71*, новых действующих ГОСТ 380—88 и ГОСТ 27772—88 и ТУ 14-1-3023—80. Сталь изготовляется горячекатаной — сортовой, фасонной, толсто- и тонколистовой, широкополосной и холоднокатаной — тонколистовой. Из стали изготовляются трубы, поковки и штамповки, лента, проволока и метизы.

По ГОСТ 380—71* в зависимости от назначения поставляемая сталь разделяется на три группы: А — с нормируемыми механическими свойствами; Б — с нормируемым химическим составом; В — с нормируемыми механическими свойствами и химическим составом. По нормируемым показателям сталь каждой группы подразделяется на категории: группа А — 1, 2, 3; группа Б — 1, 2; группа В — 1, 2, 3, 4, 5, 6. Сталь имеет следующие марки: группа А — Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5, Ст6; группа Б — БСт0, БСт1, БСт2, БСт3, БСт4, БСт5, БСт6; группа В — ВСт1, ВСт2, ВСт3, ВСт4, ВСт5. Увеличение номера марки означает увеличение содержания углерода в марочном составе: от 0,06—0,12 % в марке стали с номером 1 до 0,38—0,49 % в марке с номером 6. Соответственно изменяются и гарантируемые механические свойства: предел текучести и временное сопротивление повышаются, а относительное удлинение и деформация при изгибе падают. Сталь всех групп с номерами марок 1—4 изготовляют кипящей, полуспокойной и спокойной; с номерами 5 и 6 — полуспокойной и спокойной. Соответственно в обозначение марки стали добавляют индексы: кп — кипящая, пс — полуспокойная, сп — спокойная (Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп). Полуспокойная сталь с номерами марок 1—5 производится как с обычным, так и с повышенным содержанием марганца. В последнем случае в обозначение марки добавляется буква Г (Ст3Гпс, Ст5Гпс).

Таблица 1.6. Допускаемые отклонения, %, по химическому составу в готовом прокате углеродистых сталей группы В по ГОСТ 380—71*

Элемент	Сталь	
	кипящая	полуспокойная и спокойная
Углерод	—	—
Марганец	+0,05;	+0,05;
Кремний	—0,04	—0,03
	—	+0,05;
Фосфор		—0,02
Сера	+0,005	+0,005
	+0,005	+0,005

Примечания. 1. Отклонение от нижнего предела содержания углерода не является браковочным признаком. В готовом прокате плюсовые отклонения по углероду от норм для стали ВСт3 всех степеней раскисленности и для стали ВСт3Г (сп, пс) не допускаются. 2. В готовом прокате стали, выплавленной на базе керченских руд, содержание фосфора не должно превышать 0,045 % для категорий 4, 5, 6 и 0,055 % — для категорий 1, 2, 3; серы должно быть не более 0,055 % для всех категорий.

Согласно СНиП II-23—81 для сварных строительных металлоконструкций из сталей, предусмотренных ГОСТ 380—71*, используются только стали, поставляемые по группе В с номером марки 3: ВСт3кп, ВСт3пс, ВСт3Гпс и ВСт3сп. При этом в целях унификации кипящая сталь используется только категории 2, полуспокойная — только категории 6, спокойная и полуспокойная с повышенным содержанием марганца — только категории 5; им соответствуют марочные обозначения ВСт3кп2, ВСт3пс6, ВСт3Гпс5 и ВСт3сп5. В табл. 1.4 приводятся нормируемые показатели для этих сталей, а также для стали ВСт3Гсп, в табл. 1.5 и 1.6 — нормы их химического состава при плавочном контроле ковшовой пробы и в готовом прокате, в табл. 1.7 и 1.8 — требования по механическим свойствам.

По ТУ 14-1-3023—80 прокат с гарантированным уровнем механических свойств, дифференцированным по группам прочности, изготовляют из углеродистых сталей марок Ст3кп, Ст3пс, Ст3Гпс, Ст3сп группы В всех категорий в соответствии с ГОСТ 380—71*. При этом прокат из сталей марок Ст3пс, Ст3Гпс и Ст3сп делится на группы по прочности (временное сопротивление для второй группы на 10—20 МПа, а предел текучести на 20—30 МПа выше, чем для первой). Нормы механических свойств проката при растяжении приведены в табл. 1.9; прочие требования — по ГОСТ 380—71* в зависимости от категории стали. В марочном обозначении стали группа прочности 1 или 2 указывается в конце обозначения: ВСт3кп2-1, ВСт3пс6-1, ВСт3пс6-2, ВСт3Гпс5-1, ВСт3Гпс5-2, ВСт3сп5-1, ВСт3сп5-2.

По ГОСТ 27772—88 требования к прокату углеродистых сталей для строительных металлоконструкций, по существу, повторяют с некоторыми изменениями нормы химического состава и механических свойств, предусмотренные ГОСТ 380—71* и ТУ 14-1-3023—80. Введены наименования стали, которые в соответствии с международной практикой отражают уровень гарантируемого предела текучести: С235, С245, С255, С275 и С285. Устранены нормы нижнего предела содержания химических элементов в марочных составах.

В табл. 1.10—1.12 приведены требования к прокату углеродистых сталей по новому стандарту, а в табл. 1.13 — соответствие марок стали по ТУ 14-1-3023—80 и ГОСТ 380—71*, с одной стороны, и наименований стали по ГОСТ 27772—88 — с другой.

Таблица 1.7. Механические свойства при растяжении и условия испытания на изгиб проката углеродистых сталей по ГОСТ 380—71*

Марка стали	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа, для толщины проката, мм				δ_5, %, для толщины проката, мм			Изгиб до параллельности сторон для толщины проката, мм	
		до 20	свыше 20 до 40	свыше 40 до 100	свыше 100	до 20	свыше 20 до 40	свыше 40	до 20	свыше 20
		не менее								
ВСт3кп	360—460	235	225	215	195	27	26	24	$d = a$	$d = 2a$
ВСт3пс	370—480	245	235	225	205	26	25	23	$d = a$	$d = 2a$
ВСт3сп										
ВСт3Гпс	370—490	245	235	225	205	26	25	23	$d = a$	$d = 2a$
ВСт3Гсп	390—570	—	245	—	—	—	24	—	—	$d = 2a$

Примечания: 1. Допускается превышение верхнего предела временного сопротивления на 50 МПа по сравнению с указанным при условии выполнения остальных норм, а при согласии заказчика — без ограничения верхнего предела. 2. Для листов универсальной стали всех толщин и фасонной толщиной свыше 20 мм значение $\sigma_т$ допускается на 10 МПа ниже по сравнению с указанным. 3. Для листовой стали толщиной от 8 до 4 мм допускается снижение δ_5 на 1 % (абс.) на каждый 1 мм уменьшения толщины. Нормы относительного удлинения для листов толщиной менее 4 мм устанавливаются соответствующими стандартами. 4. Допускается снижение δ_5 для листовой, универсальной и фасонной стали всех толщин на 1 % (абс.). 5. Сталь марки Ст3Гсп предназначена для листового проката толщиной 21—40 мм группы В категорий 4, 5, 6. 6. Здесь и в последующих таблицах a — толщина образца, d — диаметр оправки.

Таблица 1.8. Ударная вязкость проката углеродистых сталей по ГОСТ 380—71*

Марка стали	Вид проката	Толщина проката, мм	Расположение образца относительно оси прокатки	Тип образца по ГОСТ 9454—78	Ударная вязкость, Дж/см², не менее		
					при температуре, °С		после механического старения
					+20	—20	
ВСт3пс, ВСт3сп	Листовой	5—9	Поперек	3	78	39	39
		10—25		1	69	29	29
		26—40		1	49	—	—
	Универсальный	5—9	Вдоль	3	98	49	49
		10—25		1	78	29	29
		26—40		1	69	—	—
	Сортовой и фасонный	5—9	»	3	108	49	49
		10—25		1	98	29	29
		26—40		1	88	—	—
ВСт3Гпс	Листовой	5—9	Поперек	3	78	39	39
		10—30		1	69	29	29
		31—40		1	49	—	—
	Универсальный	5—9	Вдоль	3	98	49	49
		10—30		1	78	29	29
		31—40		1	69	—	—
	Сортовой и фасонный	5—9	»	3	108	49	49
		10—30		1	98	29	29
		31—40		1	88	—	—
ВСт3Гсп	Листовой	21—40	Поперек	1	—	29	29

Примечания. 1. Знак «—» означает, что испытание не проводится. 2. Ударную вязкость листовой и универсальной стали толщиной 5; 7,5 и 10 мм, прокатной с отклонением на минусовый допуск определяют на образцах толщиной, равной толщине проката 3. Ударная вязкость стали круглого сечения определяется с диаметра 12 мм, квадратного сечения — начиная со стороны квадрата 11 мм, фасонной стали — с толщины, из которой может быть вырезан образец для испытаний в соответствии с ГОСТ 9454—78. 4. При испытании стали на ударную вязкость допускается снижение последней на одном образце на 10 Дж/см² при 20 °С и на 5 Дж/см² при — 20 °С и после механического старения, при этом среднее значение не должно быть ниже норм, указанных в таблице.

В сварных строительных металлоконструкциях кипящую сталь применяют только в наименее ответственных элементах (связях, прогонах, фахверках), а также в элементах, испытывающих при эксплуатации преимущественно сжатие, при котором хрупкое разрушение менее вероятно, например в колоннах промышленных и гражданских зданий. Другая возможная область применения кипящих сталей — элементы конструкций из проката малой толщины (менее 5 мм), так как с уменьшением толщины вероятность хрупкого разрушения резко снижается.

Трещины при сварке в соединениях спокойной стали обычно не образуются, так как сера распределяется равномерно. Поэтому выбор электродов для сварки спокойных сталей значительно проще, чем для сварки кипящих сталей: пригодны электроды с рутиловым, рудно-кислым и фтористо-кальциевым покрытиями. Однако спокойная сталь имеет более высокую цену, обусловленную рядом дополнительных затрат в металлургическом производстве.

Спокойная сталь применяется в ответственных элементах сварных металлоконструкций, подвергающихся при эксплуатации динамическим и переменным силовым воздействиям (подкрановых балках, элементах мостов и эстакад, балках рабочих площадок металлургических цехов) или находящихся в сложном напряженном состоянии (узловых фасонках стропильных и подстропильных ферм).

Наиболее широко в сварных строительных металлоконструкциях применяется полуспокойная сталь [23, 28].

Таблица 1.9. Механические свойства проката углеродистой стали по ТУ 14-1-3023—80 (с изменениями № 6)

Марка стали	Группа прочности	Толщина листа или полки, мм	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ_5, %
Фасонный и полосовой прокат					
Ст3кп	1	До 10	360	235	27
		10—20	360	235	27
		20—30	360	225	28
Ст3пс	1	До 10	370	245	26
		10—20	370	245	26
		20—30	370	235	25
	2	До 10	390	275	24
		10—20	380	275	23
Ст3сп	1	До 10	380	255	26
Ст3Гпс		10—20	370	245	26
		20—30	370	235	25
	2	До 10	400	285	24
		10—20	390	275	23
Листовой прокат и гнутые профили					
Ст3кп	1	До 10	360	235	27
		10—20	360	235	27
Ст3пс	1	До 10	370	245	26
		10—20	370	245	26
	2	До 10	380	275	24
		10—20	370	265	23
Ст3сп	1	До 10	380	245	26
Ст3Гсп		10—20	370	245	26
	2	До 10	390	275	24
		10—20	380	265	23

Механические свойства углеродистых спокойной, полуспокойной и кипящей сталей в различных профилях проката в большой мере определяются толщиной проката: с уменьшением толщины и, следовательно, с увеличением степени обжатия, снижением температуры конца прокатки и повышением скорости охлаждения измельчается зерно феррита горячекатаной стали всех трех степеней раскисления. Это существенно повышает предел текучести и, особенно, ударную вязкость при отрицательных температурах и после механического старения. С уменьшением толщины листов различие свойств проката сравниваемых сталей значительно уменьшается.

Сопротивление усталости сварных соединений из сталей Ст3пс, Ст3сп и Ст3кп практически одинаково. По сопротивлению зарождению хрупких трещин сталь Ст3пс существенно превосходит кипящую сталь Ст3кп, приближаясь к спокойной Ст3сп. Аналогичная последовательность наблюдалась и при склонности стали к распространению хрупких трещин. При этом на работоспособность сварных образцов при ударных нагрузках большое влияние оказывает не только степень раскисления основного металла, но и тип сварочных материалов. При сварке одинаковыми электродами стойкость сварных соединений из полуспокойной и спокойной стали против разрушений при ударной нагрузке и отрицательных температурах практически одинакова (табл. 1.14).

Изучение коррозионной стойкости в различных агрессивных средах, проведенное в НИИХиммаше, не выявило каких-либо преимуществ спокойной углеродистой стали перед полуспокойной и кипящей. Как в малоактивных, так и в агрессивных средах стойкость углеродистой стали против общей коррозии не зависела от степени раскисления.

Действующими строительными нормами и правилами СНиП II-23—81 применение проката углеродистой полуспокойной стали регламентировано для широкой области элементов сварных строительных металлоконструкций (стропильных и подстропильных ферм покрытий, балок и ригелей рамных конструкций и др.), эксплуатируемых в обычном диапазоне климатических температур (расчетные температуры не ниже —40 °С).

Еще более высокое качество проката углеродистой полуспокойной стали, не уступающей по основным показателям качеству проката спокойной стали, удается получить при дополнительном легировании полуспокойной стали марганцем. В ИЧМ разработаны, исследованы и внедрены в производство экономичные полуспокойные стали с повышенным содержанием марганца [23]. Однородность химического состава, размер действительного зерна, полосчатость микроструктуры, загрязненность неметаллическими включениями в прокате аналогичных профилей полуспокойной стали Ст3Гпс и спокойной стали Ст3сп практически одинаковы. Установлено также, что при одинаковом содержании углерода в стали Ст3Гпс прочностные свойства листового (толщиной до 50 мм), фасонного (уголок, швеллер, двутавр с толщиной полок 11—20 мм) и сортового (круг диаметром до 28 мм) проката выше (предел текучести на 10—20 МПа, временное сопротивление — на 10—40 МПа) таковых соответствующего проката из стали Ст3сп. Относительное удлинение сравниваемых сталей одинаково. По ударной вязкости и количеству волокна в изломе в состоянии поставки и после механического старения сталь Ст3Гпс существенно превосходит сталь Ст3сп. Критические температуры хрупкости ($T_{к1}$ и $T_{к2}$) и коэффициенты чувствительности к механическому старению (c_1 и c_2) для стали Ст3Гпс обычно на 10—20 °С и 20 % (абс.) соответственно ниже, чем для стали Ст3сп в аналогичном прокате.

По показателям свариваемости сталь Ст3Гпс не уступает спокойной стали Ст3сп. Поэтому для сварки полуспокойной стали Ст3Гпс можно применять те же режимы и сварочные материалы, что и для сварки стали Ст3сп. Строительными нормами и правилами СНиП II-23—81 предусмотрено применение проката углеродистой полуспокойной стали с повышенным содержанием марганца марки Ст3Гпс5 в тех же конструкциях и при тех же расчетных температурах, что и проката углеродистой спокойной стали марки Ст3сп5.

Значительное повышение предела текучести и временного сопротивления разрыву проката углеродистых сталей, являющееся резервом снижения металлоемкости и стоимости конструкций, при сохранении и даже улучшении других служебных свойств, может быть достигнуто термическим (термомеханическим) упрочнением или контролируемой прокаткой. Более подробно эти возможности рассматриваются в 1.1.6.

Таблица 1.10. Химический состав, % (по массе) при плавочном контроле углеродистых сталей по ГОСТ 27772—88

Сталь	C, не более	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
				не более				
C235	0,22	Не более 0,60	Не более 0,05	0,040	0,050	0,30	0,30	0,30
C245, C275	0,22	Не более 0,65	0,05—0,15	0,040	0,050	0,30	0,30	0,30
C255, C285	0,22	То же	0,15—0,30	0,040	0,050	0,30	0,30	0,30
	0,22	0,8—1,10	0,05—0,15	0,040	0,050	0,30	0,30	0,30
	0,20	0,8—1,10	0,15—0,30	0,040	0,050	0,30	0,30	0,30

Примечание. В стали С245, С275, С255 и С285 допускается увеличение массовой доли марганца до 0,85 %.

Таблица 1.11. **Механические свойства фасонного проката углеродистых сталей по ГОСТ 27772—88**

Сталь	Толщина полки, мм	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	Изгиб до параллельности сторон	KCU, Дж/см² при −20 °С	KCU, Дж/см² после механического старения
		не менее				не менее	
С235	4—20	235	360	26	$d = a$	—	—
	20—40	225	360	25	$d = 2a$	—	—
С245	4—20	245	370	25	$d = a$	—	29 *
	20—25	235	370	24	$d = 2a$	—	29
	25—30	235	370	24	$d = 2a$	—	—
С255	4—10	255	380	25	$d = a$	29 *	29 *
	10—20	245	370	25	$d = a$	29	29
	20—40	235	370	24	$d = 2a$	29	29
С275	4—10	275	390	24	$d = a$	—	29 *
	10—20	275	380	23	$d = a$	—	29
С285	4—10	285	400	24	$d = a$	29 *	29 *
	10—20	275	390	23	$d = a$	29	29

* Для профиля толщиной 5 мм норма ударной вязкости 49 Дж/см².

Таблица 1.12. **Механические свойства листового и широкополосного универсального проката по ГОСТ 27772—88 для строительных стальных конструкций**

Сталь	Толщина листа, мм	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	Изгиб до параллельности сторон	KCU, Дж/см² при −20 °С	KCU, Дж/см² после механического старения
		не менее				не менее	
С235	2—3,9	235	360	20	$d = a$	—	—
	4—20	235	360	26	$d = 1{,}5a$	—	—
	20—40	225	360	26	$d = 2a$	—	—
	40—100	215	360	24	$d = 2a$	—	—
	100	195	360	24	$d = 2a$	—	—
С245	2—3,9	245	370	20	$d = a$	—	—
	4—10	245	370	25	$d = 1{,}5a$	—	29 *
	10—20	245	370	25	$d = 1{,}5a$	—	29
С255	2—3,9	255	380	20	$d = 1{,}5a$	—	—
	4—10	245	380	25	$d = 1{,}5a$	29 *	29 *
	10—20	245	370	25	$d = 1{,}5a$	29	29
	20—40	235	370	25	$d = 2{,}0a$	29	—
С275	2—3,9	275	380	18	$d = 1{,}5a$	—	—
	4—10	275	380	24	$d = 1{,}5a$	—	29 *
	10—20	265	370	23	$d = 1{,}5a$	—	29
С285	2—3,9	285	390	17	$d = 1{,}5a$	—	—
	4—10	275	390	24	$d = 1{,}5a$	29 *	29 *
	10—20	265	380	23	$d = 1{,}5a$	29	29

* Для профиля толщиной 5 мм норма ударной вязкости 39 Дж/см².

1.1.4. Низколегированные стали повышенной прочности

До последнего времени основным материалом для изготовления строительных металлоконструкций служила «мягкая» углеродистая сталь, которая по своим механическим характеристикам весьма близка к железу технической чистоты.

С целью повышения эффективности металлоконструкций созданы свариваемые низколегированные стали повышенной прочности. Они появились в конце первой половины текущего столетия, первоначально в виде многокомпонентных композиций марок ДС, НЛ-2, 15ХСНД, 10ХСНД, затем в виде более простых по составу и экономичных кремнемарганцовых сталей марок 14Г2, 09Г2С, 10Г2С1. В этих обозначениях (кроме ДС и НЛ-2) цифры и буквы означают: цифры слева — примерное среднее содержание углерода в сотых долях процента; буквы справа от цифры: Г — марганец, С — кремний, Х — хром, Н — никель, Д — медь, М — молибден, Ф — ванадий, Ю — алюминий, Б — ниобий, А — азот, П — фосфор, Р — бор; цифры после букв — примерное содержание соответствующего элемента в целых единицах процентов.

Для получения стали этого вида используют легирующие элементы, в большей степени упрочняющие твердый раствор α-железа и в меньшей степени образующие специальные карбиды или нитриды: кремний, марганец, медь, никель, хром, реже молибден. Прокат из стали поставляется, как правило, в состоянии непосредственно после горячей прокатки и имеет феррито-перлитную микроструктуру, хотя возможна поставка и в состоянии после термической обработки — нормализации или термического улучшения.

Предел текучести и временное сопротивление в прокате большинства марок низколегированной стали повышенной прочности обычно не превышают соответственно 350 и 500 МПа. Этот уровень обусловлен ограниченностью легирования, которое сдерживается тремя факторами: ухудшением свариваемости, снижением сопротивления хрупкому разрушению и экономической эффективности (см. 1.1.1).

При упрочнении строительной стали для сохранения или повышения сопротивления хрупкому разрушению необходимо одновременное существенное измельчение ее микроструктуры. Величина зерна феррита в прокате горячекатаной низколегированной стали зависит от толщины последнего. Она минимальна для тонкого проката, остывающего с наибольшей скоростью, и увеличивается с увеличением его толщины. Все же в широком диапазоне толщин применяемого проката зерно феррита в прокате низколегированной стали большинства марок остается более мелким, чем в прокате углеродистой стали. Именно этим обусловлена более высокая хладостойкость низколегированной стали.

Экономическая эффективность применения низколегированной стали зависит от оптовой цены, повышающейся с увеличением содержания легирующих элементов, особенно таких, как никель, медь, молибден.

В табл. 1.15 и 1.16 приводится химический состав, а в табл. 1.17 — механические свойства некоторых отечественных низколегированных сталей. Механические свойства приводятся только для листового проката, так как для фасонного проката при одинаковой толщине они имеют близкие значения.

Следует отметить, что в новый ГОСТ 19282—89 внесены существенные изменения, препятствующие его использованию при проектировании конструкций по СНиП II-23—

Таблица 1.13. **Соответствие наименований стали по ГОСТ 27772—80 и их марок по ГОСТ 380—71* или ТУ 14-1-3023—80**

Сталь	Марка стали	ГОСТ или ТУ
С235	ВСт3кп2	ГОСТ 380—71
С245	ВСт3пс6-1	ТУ 14-1-3023—80*
С255	ВСт3сп5-1	ТУ 14-1-3023—80
	ВСт3Гпс5-1	ТУ 14-1-3023—80
	ВСт3Гсп5	ГОСТ 380—71*
С275	ВСт3пс6-2	ТУ 14-1-3023—80
С285	ВСт3сп5-2	ТУ 14-1-3023—80
	ВСт3Гпс5-2	ТУ 14-1-3023—80
	ВСт3Гсп5	ГОСТ 380—71*

Таблица 1.14. Влияние типа электрода и степени раскисления стали на работоспособность сварных балок при ударных нагрузках

Температура испытания, °С	Число ударов до разрушения листа толщиной, мм																	
	8 мм									10 мм				20 мм				
	Ст3сп			Ст3пс			Ст3кп			Ст3сп		Ст3пс		Ст3сп		Ст3пс		
	АН-348А	УОНИ 13/45	ОММ-5	АН-348А	УОНИ 13/45	ОММ-5	АН-348А	УОНИ 13/45	ОММ-5	УОНИ 13/45	АНО-4	УОНИ 13/45	АНО-4	УОНИ 13/45	АНО-4	УОНИ 13/45	АНО-4
—10	18	18	11	20	22	11	16	12	7	Не испытывались								
—20	20	13	10	21	15	10	15	13	8	7	8	7	7	7	8	7	7
—30	18	15	9	13	9	4	13	14	6	4	3	5	3	4	3	5	3
—40	13	5	4	15	11	3	14	9	2	5	4	7	2	5	4	7	2

Таблица 1.15. Химический состав низколегированных сталей повышенной прочности, % (по массе)

Марка стали	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	ГОСТ или ТУ
				не более					
09Г2 (Д)	Не более 0,12	0,17—0,37	1,4—1,8	0,040	0,035	Не более 0,30	Не более 0,30	(0,15—0,30)	ГОСТ 19282—73
09Г2С (Д)	Не более 0,12	0,5—0,7	1,3—1,7	0,040	0,035	То же	То же	(0,15—0,30)	ГОСТ 19282—73
14Г2	0,12—0,18	0,17—0,37	1,2—1,6	0,040	0,035	»	»	Не более 0,30	ГОСТ 19282—73
10Г2С1(Д)	Не более 0,12	0,8—1,1	1,3—1,65	0,040	0,035	»	»	(0,15—0,30)	ГОСТ 19282—73
15ХСНД	0,12—0,18	0,40—0,70	0,40—0,70	0,035	0,035	0,60—0,90	0,30—0,60	0,20—0,40	ГОСТ 6713—75
10ХСНД	Не более 0,12	0,80—1,10	0,50—0,80	0,035	0,035	0,60—0,90	0,50—0,80	0,40—0,60	ГОСТ 6713—75
17ГС	0,14—0,20	0,4—0,6	1,0—1,4	0,040	0,035	Не более 0,30	Не более 0,30	Не более 0,30	ГОСТ 19282—73
17Г1С	0,15—0,20	0,4—0,6	1,15—1,6	0,040	0,035	То же	То же	То же	ГОСТ 19282—73
17Г1С-У	0,15—0,20	0,4—0,6	1,15—1,55	0,020	0,025	»	»	»	ТУ 14-1-1950—77

Примечания: 1. В скобках указано количество меди, вводимой в сталь только по требованию заказчика; при отсутствии этого требования содержание меди не должно превышать 0,3 %, и буква Д из марки исключается. 2. По требованию заказчика для сталей по ГОСТ 19282—73 содержание фосфора может быть не более 0,030 %, серы — не более 0,035 %, а для сталей по ГОСТ 6713—75 — не более соответственно 0,025 и 0,030 %. 3. Допускается добавка алюминия и титана из расчета содержания в прокате алюминия не более 0,05 %, титана не более 0,03 %. 4. Содержание остаточного азота в стали не должно превышать 0,008 %.

81*. Поэтому здесь и ниже приводятся данные ранее действовавших ГОСТ 19281—73 и ГОСТ 19282—73.

Стали, марки которых условно даны с буквой Д в скобках (см. табл. 1.15), по требованию заказчика могут быть дополнительно легированы медью с целью повышения коррозионной стойкости. В этом случае буква Д, означающая медь, вводится в марочное обозначение. При отсутствии меди буква Д в марочное обозначение не вводится.

Таблица 1.16. Отклонения по химическому составу в готовом прокате низколегированных сталей по ГОСТ 19282—73

Элемент	Допускаемое отклонение	Элемент	Допускаемое отклонение
Углерод	±0,02	Ванадий	+0,02; −0,01
Кремний	±0,05		
Марганец	±0,10	Ниобий	+0,010; −0,005
Хром	±0,05		
Никель	±0,05	Азот	+0,005
Медь	±0,05	Сера	+0,005
		Фосфор	+0,005

Приведенный в табл. 1.15 химический состав относится к результатам плавочного контроля (ковшовая проба при разливке стали). В химическом составе готового проката по ГОСТ 19282—73 допускаются отклонения (см. табл. 1.16).

Для собственно сварных строительных конструкций при проектировании регламентировано использование только сталей марок 09Г2(Д), 09Г2С(Д), 14Г2, 10Г2С1(Д), 15ХСНД и 10ХСНД. Стали марок 17ГС и 17Г1С применяются для электросварных труб нефте- и газопроводного сортамента. Однако вследствие производства большого количества штрипса (листовых заготовок для труб) прокат из этих сталей часто предлагается в качестве замены листового проката низколегированной стали других марок. Применение сталей марок 17ГС и 17Г1С, а также 10Г2С1 в наиболее ответственных конструкциях, подвергающихся динамическому или переменному нагружению, эксплуатируемых при низких расчетных температурах, не рекомендуется из-за пониженного сопротивления хрупкому разрушению сварных соединений из них, обусловленного высоким содержанием кремния.

Индустриализация капитального строительства требует максимальной унификации материалов и, в частности, сокращения количества применяемых марок низколегированной стали. Поэтому основным материалом данного уровня прочности, характеризующимся оптимальным сочета-

Таблица 1.17. Механические свойства низколегированных сталей повышенной прочности

Марка стали	Толщина проката, мм	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	KCU, Дж/см², при температуре, °С					Изгиб до параллельности сторон
					—40	—60	—70	20 после механического старения	—20 после механического старения	
09Г2 (Д)	До 5	305	440	21	—	—	—	—	—	$d = 2a$
	5—10	305	440	21	34	—	—	29	—	$d = 2a$
	10—20	305	440	21	29	—	—	29	—	$d = 2a$
	20—32	295	440	21	39	—	—	29	—	$d = 2a$
09Г2С (Д)	До 5	345	490	21	—	—	—	—	—	$d = 2a$
	5—10	345	490	21	39	—	34	29	—	$d = 2a$
	10—20	325	470	21	34	—	29	29	—	$d = 2a$
	20—32	305	460	21	34	—	29	29	—	$d = 2a$
	32—60	285	450	21	34	—	29	29	—	$d = 2a$
	60—80	275	440	21	34	—	29	29	—	$d = 2a$
	80—160	265	430	21	34	—	29	29	—	$d = 2a$
14Г2	До 5	335	460	21	—	—	—	—	—	$d = 2a$
	5—10	335	460	21	34	—	—	29	—	$d = 2a$
	10—20	325	450	21	29	—	—	29	—	$d = 2a$
	20—32	325	450	21	29	—	—	29	—	$d = 2a$
10Г2С1(Д)	До 5	355	490	21	—	—	—	—	—	$d = 2a$
	5—10	345	490	21	39	—	29	29	—	$d = 2a$
	10—20	335	480	21	29	—	24	29	—	$d = 2a$
	20—32	325	470	21	29	—	24	29	—	$d = 2a$
	32—60	325	450	21	29	—	24	29	—	$d = 2a$
	60—80	295	430	21	29	—	24	29	—	$d = 2a$
	80—100	295	430	21	29	—	24	29	—	$d = 2a$
15ХСНД	8—32	345	490—687	21	29	29	29	29	29	$d = 2a$
	32—50	335	470—667	19	—	29	29	29	29	$d = 2a$
10ХСНД	8—15	392	530—687	19	39	29	29	29	29	$d = 2a$
	15—32	392	530—667	19	—	29	29	29	29	$d = 2a$
	32—40	392	510—667	19	—	29	29	29	29	$d = 2a$
17ГС	До 5	345	510	23	—	—	—	—	—	$d = 2a$
	5—10	345	510	23	44	—	—	29	—	$d = 2a$
	10—20	335	490	23	34	—	—	29	—	$d = 2a$
17Г1С	До 5	355	510	23	—	—	—	—	—	$d = 2a$
	5—10	355	510	23	44	—	—	29	—	$d = 2a$
	10—20	345	510	23	39	—	—	29	—	$d = 2a$
17Г1С-У * ТУ 14-1-1950—77	Свыше 9,5	362—461	510—628	23	49	—	—	—	—	—

* Гарантируется также ударная вязкость KCV при 0 °С не менее 39 Дж/см² и содержание волокна в изломе образцов в ДВТТ при 0 °С не менее 55 %.

нием значений свариваемости, хладостойкости и технико-экономической эффективности, признана сталь марки 09Г2С. Ее применение рекомендовано для всех видов строительных металлоконструкций. Недостаток этой стали состоит в существенном снижении показателей прочности — предела текучести и временного сопротивления разрыву — с увеличением толщины проката. Эта особенность служит также причиной частых отбраковок по указанным характеристикам при сдаточных механических испытаниях на металлургических заводах. Для устранения этого недостатка корректируется химический состав стали путем небольшого увеличения содержания углерода (сталь марки 12Г2С).

Требование унификации марочного сортамента стали отражено в стандарте на прокат для строительных стальных конструкций ГОСТ 27772—88, в котором предусмотрены лишь два варианта низколегированной стали — повышенной и высокой прочности с химическим составом, соответствующим маркам 09Г2С и 12Г2С. Ниже приведены нормы химического состава этих сталей (% по массе), включенных в стандарт с наименованием С345 и С375:

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
Не более 0,15	1,30—1,70	Не более 0,80	Не более 0,040	Не более 0,035	Не более 0,30	Не более 0,30	Не более 0,30

Допускается добавка алюминия и титана из расчета получения в прокате титана 0,01—0,03 %; по требованию заказчика фосфора может быть не более 0,03 %, серы — не более 0,035 %.

Механические свойства сталей С345 и С375 представлены в табл. 1.18.

Изготовляемая сталь делится на четыре категории в зависимости от требований по испытаниям на ударный изгиб. Нормируемые показатели ударной вязкости для проката разных категорий приведены в табл. 1.19.

Для элементов металлоконструкций автодорожных и железнодорожных мостов основным материалом является низколегированная сталь марки 10ХСНД по ГОСТ 6713—75, обладающая повышенным сопротивлением атмосферной коррозии, которое достигается многокомпонентным легированием (см. 1.1.8).

В зависимости от требований по ударной вязкости поставляемые низколегированные стали по ГОСТ 19282—73 делятся на пятнадцать категорий, причем для строительных металлоконструкций применяются стали четырех категорий: 6, 9, 12 и 15. При этом для категорий 6 и 12 ударная

Таблица 1.18. **Механические свойства проката низколегированной стали повышенной прочности по ГОСТ 27772—88**

Марка стали	Толщина проката, мм	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	Изгиб до параллельности сторон	KCU, Дж/см² при температуре, °С		KCU, Дж/см² после механического старения
		не менее				—40	—70	не менее
Фасонный прокат								
С345	4—10	345	490	21	$d = 2a$	39	34	29
	10—20	325	470	21	$d = 2a$	34	29	29
	20—40	305	460	21	$d = 2a$	34	—	29
С375	4—10	375	510	20	$d = 2a$	39	34	29
	10—20	355	490	20	$d = 2a$	34	29	29
	20—40	335	480	20	$d = 2a$	34	—	29
Листовой и широкополосный универсальный прокат								
С345	2—3,9	345	490	15	$d = 2a$	—	—	—
	4—10	345	490	21	$d = 2a$	39	34	29
	10—20	325	470	21	$d = 2a$	34	29	29
	20—40	305	460	21	$d = 2a$	34	29	29
	40—60	285	450	21	$d = 2a$	34	29	29
	60—80	275	440	21	$d = 2a$	34	29	29
	80—160	265	430	21	$d = 2a$	34	29	29
С375	2—3,9	375	510	14	$d = 2a$	—	—	—
	4—10	375	510	20	$d = 2a$	39	34	29
	10—20	355	490	20	$d = 2a$	34	29	29
	20—40	335	480	20	$d = 2a$	34	29	29

Таблица 1.19. **Нормирование ударной вязкости проката из сталей С345 и С375 по ГОСТ 27772—88**

Ударная вязкость	Категория			
	1	2	3	4
При температуре, °С:				
—40	+	—	+	—
—70	—	+	—	+
После механического старения	—	—	+	+

вязкость KCU гарантируется при температуре —40 °С, а для категорий 9 и 15 — при температуре —70 °С. Кроме того для категорий 14 и 15 гарантируется еще и ударная вязкость при 20 °С после механического старения.

Низколегированные стали по ГОСТ 6713—75 для мостостроения поставляются трех категорий: 1, 2 и 3. При этом для сталей категории 1 гарантируется ударная вязкость KCU при —40 °С и при 20 °С после механического старения, категории 2 — при —60° и при 20 °С после механического старения, категории 3 — при —70 °С и при — 20 °С после механического старения. Нормы ударной вязкости при отрицательных температурах и после механического старения даны в табл. 1.17 и 1.18.

Основная масса металлопроката низколегированных сталей повышенной прочности поставляется в состоянии непосредственно после горячей прокатки. Однако возможна поставка части листового проката после термической обработки: нормализации (нагрев до 890—950 °С и остывание на воздухе) или термического улучшения (после нагрева закалка в воде с последующим высоким отпуском при 620—680 °С). Нормализация несколько измельчает микроструктуру и способствует ее большей однородности по сечению. Она применяется обычно для повышения ударной вязкости при низких температурах. Все же более радикальным средством для повышения хладостойкости является термическое улучшение. Листы из стали марок 09Г2(Д) и 10Г2С1(Д) толщиной более 20 мм поставляются в нормализованном или термоулучшенном состоянии, а стали 10ХСНД толщиной более 15 мм — преимущественно в термоулучшенном состоянии.

1.1.5. Высокопрочные стали с карбонитридным упрочнением с феррито-перлитной микроструктурой

Дальнейшее повышение прочности строительной стали зависит от возможности измельчения ее микроструктуры. Такая возможность обеспечивается применением на металлургических заводах новых термодеформационных режимов горячей прокатки и термической обработки готового проката. Применяются способы упрочнения с одновременным измельчением микроструктуры: горячая обработка давлением с большими обжатиями при пониженных температурах — контролируемая прокатка; термическая обработка с ускоренным охлаждением от высоких температур — закалка, часто с последующим отпуском; специальное микролегирование в сочетании с термической обработкой — карбонитридное упрочнение.

Наибольшее распространение получил способ карбонитридного упрочнения [29, 37, 38], основанный на введении в сталь небольших добавок сильных карбидо- и нитридообразующих элементов с обязательной термической обработкой. Он обеспечивает упрочнение в результате образования дисперсных выделений карбонитридов в сочетании с сильным измельчением зерна стали, что позволяет при значительном повышении механической прочности сохранить и даже существенно повысить сопротивление хрупкому разрушению. Способ экономичен и не ухудшает свариваемости, так как повышение прочности и хладостойкости достигается при весьма ограниченных добавках карбидо- и нитридообразующих элементов, в сумме не превышающих 0,2 % по массе.

Для упрочнения низколегированной феррито-перлитной строительной стали могут быть использованы карбиды и нитриды алюминия, ванадия, ниобия, тантала, бериллия, лантана, молибдена и вольфрама. Из экономических и технологических соображений у нас для этой цели используются карбонитриды ванадия и нитриды алюминия. При этом небольшие добавки карбидо- и нитридообразующих элементов — ванадия, алюминия и азота — вводятся при выплавке рядовой низколегированной стали типа 14Г2, содержащей до 1,2—1,7 % марганца. Готовый прокат подвергают термической обработке — нормализации, включающей нагрев до 890—950 °С, при котором в стали формируются дисперсные частицы карбонитридов диаметром от 10^{-2} до 10^{-1} мкм, сдерживающие рост зерна при нагреве и резко измельчающие микроструктуру. Карбонитридное упрочнение, обеспечивая особо мелкозернистую микроструктуру со средним диаметром зерна феррита 5—12 мкм (10—12 баллов по шкале ГОСТ 5639—82), мало зависящую от толщины проката (рис. 1.7), позволяет получать сталь с высоким пределом текучести — от 400 до 450 МПа — и низкой температурой хрупкости (рис. 1.8 и 1.9) [30].

В табл. 1.20 приводится химический состав, а в табл. 1.21 — механические свойства по ГОСТ 19282—73 трех марок отечественной листовой высокопрочной феррито-перлитной стали с карбонитридным упрочнением, используемой в металлоконструкциях.

Как и низколегированные стали повышенной прочности, в зависимости от требований по ударной вязкости высокопрочные стали с карбонитридным упрочнением по ГОСТ 19282—73 поставляются пятнадцати категорий, из которых для строительных металлоконструкций используются четыре: 6, 9, 12 и 15. Для сталей 6 и 12-й категорий ударная вязкость KCU гарантируется при —40 °С, а для сталей 9 и 15-й категорий — при —70 °С. Кроме того для сталей 12 и 15-й категорий гарантируется еще и ударная вязкость после механического старения.

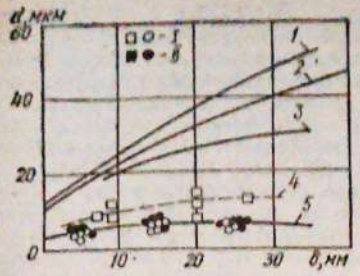


Рис. 1.7. Зависимость величины зерна феррита от толщины листа строительной стали марок:

1 — Ст3кп; *2* — Ст3сп; *3* — 09Г2С и 10Г2С1; *4* — 16Г2АФ производства Орско-Халиловского металлургического комбината; *5* — 16Г2АФ завода «Азовсталь» из литых слябов НЛМК (*I*) и катаных слябов КомМК (*II*).

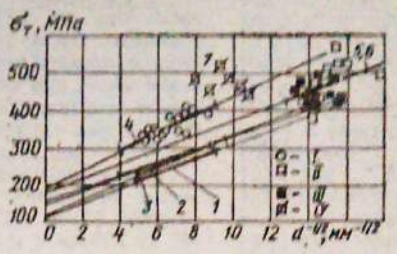


Рис. 1.8. Зависимость предела текучести от величины зерна феррита толстолистовой стали марок:

1 — Ст3кп; *2* — Ст3пс; *3* — Ст3сп; *4 (I)* — 09Г2С и 10Г2С1; *5 (II)* — 16Г2АФ из литых слябов НЛМК; *6 (III)* — 16Г2АФ из катаных слябов КомМК; *7 (IV)* — 16Г2АФ производства ОХМК.

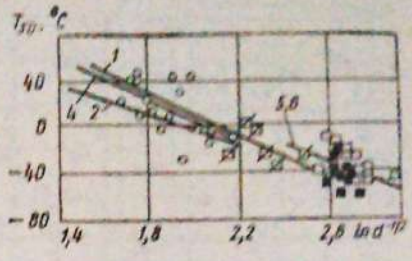


Рис. 1.9. Зависимость температуры хрупкости T_{50} от величины зерна феррита толстолистовой стали. Обозначения те же, что и на рис. 1.8.

По ГОСТ 27772—88 для строительных стальных конструкций предусмотрена также поставка трех вариантов состава стали с карбонитридным упрочнением: С390, С390К и С440. Стали С390 и С440 поставляются в листах толщиной 4—50 мм, С390К — в листах толщиной 4—30 мм. Нормы химического состава и механических свойств сталей С390, С390К и С440 соответствуют нормам ГОСТ 19282—73 (см. табл. 1.20 и 1.21) для сталей марок соответственно 14Г2АФ, 15Г2АФДпс и 16Г2АФ категории 9.

Низколегированную сталь с карбонитридным упрочнением, как и другие стали с феррито-перлитной микроструктурой, можно подвергать горячей вальцовке, штамповке и т. д. При этом температурный режим горячего деформирования (температура нагрева и скорость охлаждения) должен по возможности соответствовать принятому режиму нормализации. (Число таких нагревов должно быть ограниченным и их не должно быть более двух — четырех во избежание появления локальных участков с крупнозернистой микроструктурой). Тогда удается совместить горячее деформирование с заключительной термической обработкой. Превышение температур нагрева, принятых для нормализа-

Таблица 1.20. **Химический состав феррито-перлитных сталей с карбонитридным упрочнением (ГОСТ 19282—73), % (по массе)**

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	V	N
14Г2АФ(Д)	0,12—0,18	0,3—0,6	1,2—1,6	⩽0,40	⩽0,30	0,15—0,30	0,07—0,12	0,015—0,025
15Г2АФДпс	0,12—0,18	⩽0,17	1,2—1,6	⩽0,30	⩽0,30	0,2—0,4	0,08—0,15	0,015—0,30
16Г2АФ(Д)	0,14—0,20	0,3—0,6	1,3—1,7	⩽0,40	⩽0,30	0,15—0,30	0,08—0,14	0,015—0,025

Примечания. 1. Содержание фосфора в стали должно быть не более 0,035 %, серы — не более 0,040 %; по требованию заказчика фосфора может быть не более 0,030 %, серы — не более 0,035 %. 2. Стали, в марку которых входит буква Д, по требованию заказчика дополнительно легируются медью; при отсутствии этого требования содержание меди не должно превышать 0,3 % и буква Д из обозначения исключается. 3. В готовом прокате допускаются отклонения по химическому составу, указанные в табл. 1.16.

Таблица 1.21. **Механические свойства феррито-перлитных сталей с карбонитридным упрочнением в листовом прокате (по ГОСТ 19281—89)**

Марка стали	Толщина проката, мм	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	KCU, Дж/см², при температуре, °С		
					—40	—70	20 после механического старения
		не менее					
14Г2АФ(Д)	До 5	390	540	20	—	—	—
	5—10	390	540	20	44	34	29
	10—32	390	540	20	39	29	29
	32—50	390	540	20	39	29	29
15Г2АФДпс	До 5	390	540	19	—	—	—
	5—10	390	540	19	44	34	29
	10—20	390	540	19	39	29	29
	20—32	390	540	19	39	29	29
16Г2АФ(Д)	До 5	440	590	20	—	—	—
	5—10	440	590	20	44	34	29
	10—32	440	590	20	39	29	29
	32—50	410	570	20	39	29	29

Примечания. 1. По требованию заказчика значения временного сопротивления разрыву не должны превышать 690 МПа для сталей марок 14Г2АФ(Д) и 15Г2АФДпс и 780 МПа для стали марки 16Г2АФ(Д). При заказе проката можно предусматривать испытание на образцах с V-образным концентратором напряжения при 0 или —20 °С для сталей 14Г2АФ(Д) и 15Г2АФДпс. 2. Изгиб до параллельности сторон $d = 2a$.

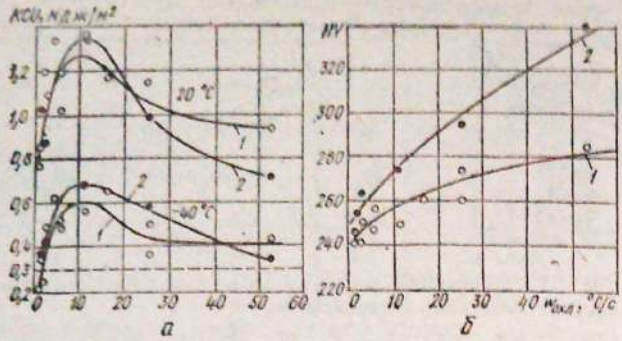


Рис. 1.10. Зависимость ударной вязкости (*а*) и максимальной твердости (*б*) в околошовной зоне при сварке сталей типа 14Г2АФ и 16Г2АФ от мгновенной скорости охлаждения при 600 °С:

1 — 0,14 % С, 1,34 % Mn, 0,47 % Si, 0,14 % V, 0,013 % N; *2* — 0,19 % С, 1,65 % Mn, 0,57 % Si, 0,11 % V, 0,015 % N.

ции, или увеличение скорости охлаждения повышает прочность, но снижает пластичность, вязкость и хладостойкость вследствие образования неблагоприятной микроструктуры.

При изготовлении конструкций или в процессе эксплуатации сталь безопасно можно подвергать длительным или кратковременным технологическим нагревам в субкритической температурной области. Дополнительный отпуск при 550—650 °С в течение 3—5 ч практически не оказывает влияния ни на прочность, ни на ударную вязкость при комнатной и пониженной температурах нормализованной стали типа 16Г2АФ. Выдержка до 1000 ч при 400—500 °С также мало влияет на ее механические свойства, что объясняется большой стабильностью феррито-перлитной микроструктуры.

При соответствующем подборе присадочных материалов, флюсов и электродных покрытий и соблюдении основных технологических требований сварку стали марок 14Г2АФ(Д), 16Г2АФ и 15Г2АФДпс можно производить любыми способами, принятыми при изготовлении и монтаже строительных металлоконструкций. При умеренном содержании углерода и легирующих элементов в стали твердость в околошовной зоне даже при высоких скоростях охлаждения (не менее 50 °С/с) не превышает 300 *HV* и ударная вязкость сохраняется высокой в широком диапазоне режимов (рис. 1.10) [8]. Повышение содержания углерода и марганца до уровня, близкого к верхнему пределу марочного состава, усиливает зависимость максимальной твердости и ударной вязкости в околошовной зоне от скорости охлаждения, однако и при этом максимальная твердость не превышает 350 *HV*. Оптимальные механические свойства достигаются при скорости охлаждения 10—20 °С/с. Приемлемыми следует считать режимы, обеспечивающие мгновенную скорость охлаждения металла околошовной зоны при 600 °С не менее 3—5 °С/с и не более 30 °С/с.

Сталь марок 14Г2АФ(Д), 15Г2АФДпс и 16Г2АФ пригодна как для конструкций, эксплуатируемых в обычных условиях, так и для наиболее ответственных конструкций, подвергающихся переменному и динамическому нагружению, в том числе при низких климатических температурах (расчетные температуры ниже —40 °С («северное исполнение»)). В последнем случае к стали предъявляются требования по ударной вязкости не менее 29 Дж/см² при —70 °С [40].

Стали указанных марок обычно поставляются в виде листов толщиной от 8 до 50 мм; освоено также изготовление из стали марки 16Г2АФ электросварных труб диаметром от 165 до 426 мм с толщиной стенки от 3 до 9 мм и горячекатаных бесшовных труб диаметром до 426 мм, толщиной от 18 до 40 мм.

1.1.6. Закаленно-отпущенные экономно-легированные стали высокой прочности

Для нормализованной высокопрочной стали с феррито-перлитной микроструктурой гарантируемые значения предела текучести и временного сопротивления разрыву не превышают соответственно 500 и 650 МПа. Более высокую прочность при сохранении необходимой свариваемости и хладостойкости удается получить, подвергая сталь закалке и отпуску [8]. При этом возможны разнообразные вариации химического состава, но наиболее эффективными оказываются стали с карбонитридным упрочнением [30]. Сущность последнего при этом не изменяется, особенность состоит лишь в том, что измельчение зерна аустенита не растворившимися при нагреве для закалки дисперсными карбонитридами способствует измельчению микроструктуры продуктов закалки («пакетов» мартенсита и нижнего бейнита), а растворившиеся карбонитриды обеспечивают упрочнение, обусловленное дисперсионным твердением и торможением процессов возврата и рекристаллизации при отпуске.

Путем одной лишь закалки рядовой низколегированной стали типа 14Г2, 16ГС, 14ХГС в прокате употребительных толщин (до 20 мм включительно) достижимо весьма высокое упрочнение с пределом текучести $\sigma_{0,2} \geqslant 750$ МПа и временным сопротивлением разрыву $\sigma_в \geqslant 850$ МПа при сохранении достаточной пластичности: $\delta_5 \geqslant 12$ % и $\psi \geqslant 45$ %. Однако под действием тепла сварочной дуги такая закаленная сталь разупрочняется на 15—30 %. Разупрочнение, обусловленное высоким отпуском и перекристаллизацией, достигает максимума на участке неполной перекристаллизации вблизи его внешней границы (рис. 1.11). Относительная величина разупрочнения и ширина охватываемого им участка тем больше, чем больше тепловложение сварки и чем выше упрочнилась сталь при закалке [8, 31].

Легирование молибденом, ванадием, а также некоторыми другими элементами, способствуя сохранению высокой прочности в состоянии после закалки и отпуска, позволяет существенно уменьшить степень разупрочнения и

Таблица 1.22. **Химический состав высокопрочных закаленно-отпущенных сталей, % (по массе)**

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Nb
12Г2СМФ *	0,09—0,15	1,3—1,7	0,4—0,7	Не более 0,3	Не более 0,3	Не более 0,3	0,15—0,25	0,07—0,15	—
12ГН2МФАЮ	0,09—0,14	0,9—1,4	0,2—0,5	0,2—0,5	1,4—1,75	Не более 0,3	0,15—0,25	0,05—0,10	—
14Х2ГМР **	0,10—0,17	0,9—1,2	0,17—0,37	1,40—1,70	Не более 0,30	Не более 0,30	0,45—0,55	Не более 0,03	—
12ХГН2МФБАЮ	0,09—0,16	0,9—1,3	0,3—0,5	0,5—0,9	1,4—1,7	Не более 0,30	0,30—0,40	0,05—0,10	0,02—0,06

* Допускается для повышения вязкости введение в сталь 0,05—0,10 % алюминия и 0,015—0,030 % азота, при этом сталь обозначается 12Г2СМФЮ.
** В сталь вводится 0,002—0,006 % бора.

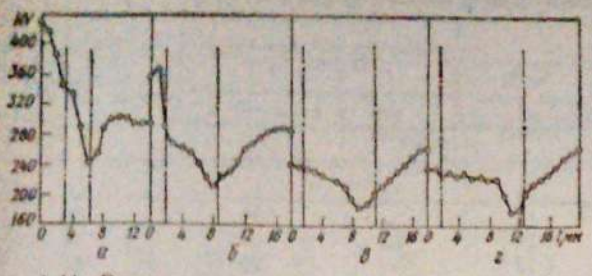


Рис. 1.11. Распределение твердости в околошовной зоне сварных соединений толщиной 20 мм закаленной душем низколегированной стали марки 14ХГС при сварке с разным тепловложением q/v, МДж/м:

а — 0,58; *б* — 2,22; *в* — 3,90; *г* — 4,95.

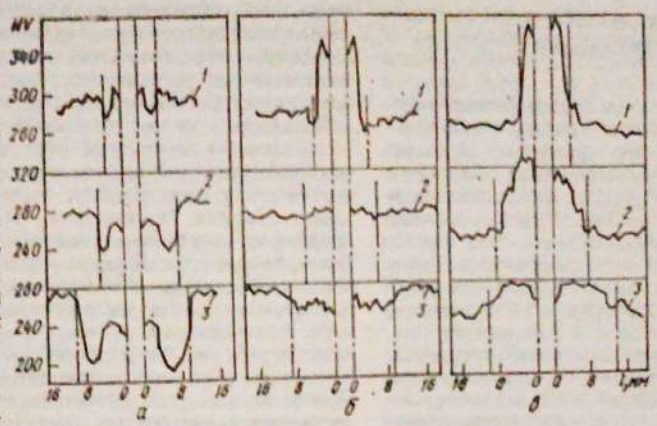
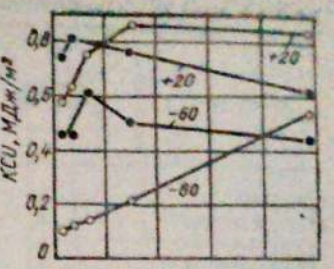
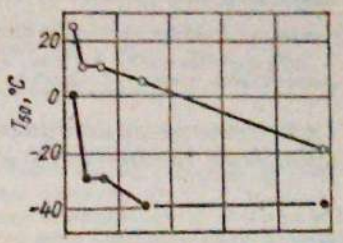


Рис. 1.12. Распределение твердости в околошовной зоне сварных соединений толщиной 20 мм термоулучшенных высокопрочных сталей марок 12Г2СМФ (*а*), 12ГН2МФАЮ (*б*) и 12ХГН2МФБАЮ (*в*) при автоматической сварке с тепловложением q/v, МДж/м:

1 — 1,47; *2* — 4,00; *3* — 7,78.





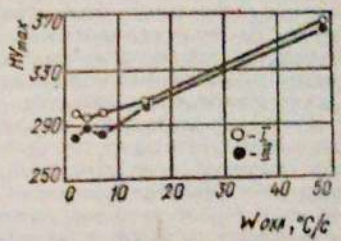


Рис. 1.13. Зависимость ударной вязкости при 20 и —60 °С, температуры хрупкости T_{50} и максимальной твердости металла околошовной зоны сварных соединений стали 12Г2СМФ (*I*) и 12ГН2МФАЮ (*II*) от скорости охлаждения при 600 °С при автоматической сварке.

ширину разупрочненной зоны (рис. 1.12). Из высокопрочных закаленно-отпущенных сталей для различных сварных строительных конструкций могут быть рекомендованы стали марок 12Г2СМФ, 12ГН2МФАЮ, 14Х2ГМР и 12ХГН2МФБАЮ. Химический состав сталей и их гарантируемые механические свойства приводятся в табл. 1.22 и 1.23. Стали марок 12Г2СМФ, 12ГН2МФАЮ и 12ХГН2МФБАЮ принадлежат к группе сталей с карбонитридным упрочнением; сталь 14Х2ГМР относится к бейнитным сталям (при охлаждении на воздухе после аустенизации в прокате значительной толщины образуется микроструктура бейнит). Тепловое воздействие сварки несколько уменьшает исходную твердость в околошовной зоне стали 12Г2СМФ, однако разупрочненный участок узок (2—10 мм) и не вызывает снижения временного сопротивления разрыву образцов сварных соединений с поперечными сварными швами при растяжении. Разупрочнение при сварке других рекомендуемых сталей невелико и им можно пренебречь.

Два варианта высокопрочной закаленно-отпущенной стали — С590 и С590К — предусматривает ГОСТ 27772—88.

Al	N	S	P	ТУ
—	—	Не более 0,035	Не более 0,035	ТУ 14-1-1308—75
0,05—0,10	0,02—0,03	Не более 0,035	Не более 0,035	ТУ 14-1-1772—76
—	—	Не более 0,035	Не более 0,035	ТУ 14-1-1156—75
0,05—0,10	0,020—0,030	Не более 0,035	Не более 0,035	ТУ 14-104-13—75

Частей 12Г2СМФАЮ.

Сталь С590 поставляется в виде листов толщиной от 10 до 36 мм и по химическому составу аналогична стали 12Г2СМФ, сталь С590К поставляется в листах толщиной от 10 до 40 мм и ее химический состав соответствует составу стали 12ГН2МФАЮ (см. табл. 1.22). Нормы механических свойств для листов сталей С590 и С590К те же, что и в табл. 1.23 для соответствующих сталей.

Сталь 12Г2СМФ рекомендуется для конструкций, эксплуатируемых в обычных условиях при расчетных температурах не ниже —40°С. Стали 12ГН2МФАЮ и 12ХГН2МФБАЮ благодаря повышенной хладостойкости могут быть использованы для наиболее ответственных металлоконструкций, в том числе эксплуатируемых при динамическом нагружении и расчетных температуах ниже —40 °С («северное исполнение»). Свои преимущества в хладостойкости эти стали сохраняют и в околошовной зоне сварных соединений (рис. 1.13). Оптимальные свойства в околошовной зоне достигаются при сварке на тепловых режимах, которым соответствует мгновенная скорость охлаждения при 600 °С в пределах от 7 до 30 °С/с. Заметное снижение ударной вязкости и повышение температуры хрупкости наблюдаются при уменьшении скорости охлаждения ниже 5 °С/с.

Все перечисленные стали имеют значительный запас пластичности, что позволяет применять при изготовлении конструкций все виды механической обработки, а также холодную обработку давлением — гибку, вальцовку, штамповку и т. д.

Закаленно-отпущенные высокопрочные стали поставляются только в виде листов толщиной 10—50 мм, а для сталей 12Г2СМФ и 12ГН2МФАЮ максимальная толщина ограничена 40 мм по условию прокаливаемости. Сравнительно узкий диапазон толщин обусловлен параметрами действующего в термических отделениях металлургических заводов нагревательного и охлаждающего оборудования. Вместе с тем прокаливаемость наиболее легированной бейнитной стали 14Х2ГМР так значительна, что может обеспечить достижение требуемых механических характеристик в прокате толщиной 150—200 мм.

Таблица 1.23. Механические свойства листовых высокопрочных закаленно-отпущенных сталей

Марка стали	Толщина листа, мм	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	KCU, Дж/см², при температуре, °С		Количество волокна в изломе крупной судостроительной пробы при 20 °С, %
					—40	—70	
		не менее					
12Г2СМФ	10—36	590	685	14	34	—	—
12ГН2МФАЮ	16—40	590—785	685—880	14	—	29	80
14Х2ГМР	4—50	590	685	14	39	—	—
12ХГН2МФБАЮ	16—40	735	835	12	—	29	50

Примечания: 1. Для стали 12ГН2МФАЮ ограничиваются максимальные значения предела текучести и временного сопротивления разрыву. 2. Изгиб до параллельности сторон $d = 3a$.

1.1.7. Стали после контролируемой прокатки и термического упрочнения

Стали после контролируемой прокатки. В способе карбонитридного упрочнения мелкозернистая структура стали формируется при термической обработке проката — нормализации. Однако существует и другая технология получения мелкозернистой феррито-перлитной стали, получившая название контролируемой прокатки. Она состоит в горячей деформации при пониженных температурах, при которых рекристаллизация и рост зерен деформированного аустенита существенно замедляются, особенно в присутствии дисперсных выделений карбонитридов. Температура окончания прокатки составляет 850—700 °С, причем реализуется одна из двух технологических возможностей: либо образование конечной микроструктуры из деформированного аустенита до его рекристаллизации, либо получение исходной мелкозернистой микроструктуры аустенита вследствие его рекристаллизации до полиморфного $\gamma \rightarrow \alpha$-превращения. Образование мелких зерен феррита обусловлено в первом случае высокой плотностью дефектов кристаллического строения в решетке аустенита — его наклепом при прокатке, во втором — наследованием малой величиной зерна феррита малой величины зерна аустенита. В обоих случаях образованию конечной мелкозернистой феррито-перлитной микроструктуры способствует возникновение в исходном аустените большого числа центров кристаллизации.

Характерной особенностью микроструктуры стали после контролируемой прокатки является значительно более заметная разница в размере соседних ферритных зерен, чем при карбонитридном упрочнении (разнозеренность), а также наличие внутри зерен еще более мелких однородных областей — субзерен, разделенных дислокационными малоугловыми границами.

В качестве микролегирующих добавок при контролируемой прокатке могут использоваться карбиды и нитриды ряда элементов, например ванадия, титана, алюминия. Однако наиболее эффективными являются добавки ниобия. Обычно он вводится в сталь в количестве 0,02—0,006 %.

Необходимой предпосылкой контролируемой прокатки является наличие особо мощных прокатных станов, способных быстро деформировать металл при пониженных температурах. Значительную роль играет скорость охлаждения, подавляющего развитие рекристаллизационных процессов, вследствие чего возможность получения эффекта с увеличением толщины уменьшается. Контролируемая прокатка осуществляется в основном для получения горячекатаной широкой полосы и листов толщиной до 20 мм.

Хорошие результаты дает контролируемая прокатка широкой рулонной полосы толщиной 2,5—8 мм из углеродистой стали (типа Ст3сп) с микродобавками алюминия, титана и ванадия. Производство такой полосы освоено на непрерывном широкополосном стане 2000 Череповецкого металлургического комбината. Полоса четырех уровней прочности с марочными обозначениями Ч-33, Ч-37, Ч-40 и Ч-44 поставляется для нужд строительства и сельскохозяйственного машиностроения с гарантированными пределами текучести 325, 365, 390 и 430 МПа и временным сопротивлением разрыву (не менее) соответственно 450, 480, 510 и 545 МПа. Полоса первых трех уровней прочности используется в качестве материала гнутых и гнутосварных профилей для легких строительных металлоконструкций комплектной поставки вместо более дорогой и дефицитной стали 09Г2С. Химический состав и механические свойства полосы приведены в табл. 1.24, 1.25. Размер зерна феррита полосы колеблется в пределах, оцениваемых номерами 9—11 шкалы ГОСТ 5639—82 (средний диаметр зерна 7—12 мкм). В исходной полосе сталь характеризуется достаточной хладостойкостью: температура хрупкости T_{50} при испытании на динамический изгиб образцов типа 1 по ГОСТ 9454—78 находится в диапазоне —(70...40) °С. Заметного разупрочнения при сварке стали не обнаруживается.

Более толстые листы, поставляемые металлургической промышленностью строительству в соостоянии после контролируемой прокатки, изготовляются из низколегированной стали. Обычно это отсортировка штрипсов (листовых заготовок) для производства газопроводных труб для районов с низкой климатической температурой. Наряду с высокими характеристиками прочности $\sigma_т$ и $\sigma_в$ сталь марок 09Г2ФБ и 10Г2ФБ отличается весьма благоприятными свойствами хладостойкости: помимо ударной вязкости на образцах с полукруглым надрезом KCU при —60 °С гарантируются также ударная вязкость на остронадрезанных образцах KCV при —15 °С и доля волокна в изломе крупноразмерных образцов ДВТТ при испытании падающим грузом.

Таблица 1.24. Химический состав широкополосной стали серии «Ч» для гнутосварных профилей строительных металлоконструкций по ТУ 14-105-509—87, % (по массе)

Марка стали	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	V	Ca
				не более								
Ч-33	0,14—0,22	0,12—0,30	0,40—0,65	0,030	0,030	0,3	0,3	0,3	0,02—0,07	0,01—0,04	—	0,001—0,030
Ч-37	0,16—0,22	0,25—0,45	0,50—0,75	0,030	0,030	0,3	0,3	0,3	0,02—0,07	0,01—0,04	0,02—0,07	0,001—0,030
Ч-40	0,16—0,22	0,25—0,45	0,70—0,90	0,030	0,030	0,3	0,3	0,3	0,02—0,07	0,01—0,04	0,02—0,07	0,001—0,030

Таблица 1.25. Механические свойства продольных образцов из широкополосной стали серии «Ч» по ТУ 14-105-509—87

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	*KCU* при —40 °С, Дж/см²	Изгиб до параллельности сторон
	не менее				
Ч-33	325	450	26	29	$d = a$
Ч-37	365	480	24	29	$d = a$
Ч-40	390	510	23	29	$d = 2a$

Высокая вязкость и пластичность обусловлены не только мелкозернистой микроструктурой, но также пониженным содержанием неметаллических включений и благоприятной их формой, обеспеченной модифицирующей обработкой. Содержание серы в стали не превышает 0,006 и 0,010 %. Требования к химическому составу и механическим свойствам этих сталей приведены в табл. 1.26, 1.27. Сталь поставляется с обязательной гарантией углеродного эквивалента по формуле (1.1) — не более 0,43 % и после дефектоскопического ультразвукового контроля, гарантирующего отсутствие нарушений сплошности, с требованиями для 2—3-го класса по ГОСТ 22727—88.

Высоким значениям ударной вязкости при отрицательных температурах и низкой температуре хрупкости сталей после контролируемой прокатки часто способствует появление расслоений в вязких изломах продольных и поперечных образцов при температуре, несколько превышающей температуру визуального обнаружения хрупкого разрушения сколом. Эти расслоения не связаны с какими-либо нарушениями сплошности в исходном металле, но появляются под влиянием больших растягивающих напряжений в направлении толщины в момент достижения максимума усилия непосредственно перед распространением магистральной трещины. Расслоения уменьшают жесткость напряженного состояния и смещают начало хрупкого разрушения сколом к более низким температурам. Благодаря высокой хладостойкости эти стали вполне применимы для ответственных конструкций «северного исполнения».

Стали, термически упрочненные с использованием специального нагрева. Подвергая углеродистую и низколегированную строительную сталь закалке, часто с последующим отпуском, можно существенно повысить ее прочность без ухудшения свариваемости, так как химический состав и углеродный эквивалент при этом не изменяются. Сильное измельчение микроструктуры при закалке и выбор соответствующего режима отпуска, устраняющего излишнюю прочность, позволяют получить высокое сопротивление вязкому и хрупкому разрушению.

Простейшая технология такой обработки включает нагрев листов в камерных печах с выдвижным подом, их закалку в баке с водой после переноса грузоподъемным краном и отпуск листов в камерной печи того же типа. Недостатками этой технологии помимо низкой производительности

Таблица 1.27. Механические свойства низколегированных сталей, поставляемых в состоянии после контролируемой прокатки, по ТУ 14-1-4083—83

Марка стали	Толщина проката, мм	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	*KCV*, Дж/см², при —15 °С	*KCU*, Дж/см², при — 60 °С	Доля вязкой составляющей в изломе образцов ДВТТ при —15 °С, %
		не менее					
09Г2ФБ	4—9	450	558	22	—	59	—
10Г2ФБ	10—28	431	519	17	59	39	80

являются невозможность регулировать скорость охлаждения и предотвращать коробление листов, опасность чрезмерного подстуживания из-за длительной транспортировки к закалочному баку, что ухудшает микроструктуру и конечные механические свойства.

Более совершенная технология предусматривает нагрев листов по заданному режиму в секционных проходных печах (обычно имеющих длину свыше 60 м) с транспортирующим подом из роликов. Сразу на выходе из печи устанавливается охлаждающее устройство одного из двух типов: закалочный пресс или роликозакалочная машина. В обоих нагретый лист охлаждается сверху и снизу водяными струями. Интенсивность охлаждения регулируется давлением подаваемой воды и продолжительностью ее поступления.

В закалочном прессе, имеющем периодическое действие, охлаждаемый лист зажимается усилием до 10 кН, которое передается через многочисленные прижимы с примерными размерами в плане 50 × 25 мм. Несмотря на ускоренное перемещение листа от печи к прессу, продолжительность транспортировки и зажатия перед пуском воды не исключает опасности подстуживания, а само зажатие не исключает возможности коробления, которое с трудом поддается устранению при правке. Коробление тем значительнее, чем тоньше лист. Поэтому минимальная толщина проката, обрабатываемого на линиях с закалочными прессами, составляет 12—16 мм.

В отличие от закалочных прессов, в которых листы во время охлаждения неподвижны, в роликозакалочных машинах охлаждаемые водой листы непрерывно перемещаются между двумя рядами роликов. В этом устройстве опасность подстуживания минимальна, так как охлаждение начинается сразу после попадания передней кромки листа в машину. Охлаждение более равномерно по поверхности, и отсутствует «пятнистая закалка», которая в прессах обусловлена тем, что прижимы ограничивают доступ охлаждающей воды к поверхности листа. В роликозакалочных машинах на отечественных металлургических заводах могут обрабатываться листы с минимальной толщиной 9—10 мм.

Отпуск закаленных листов проводится в таких же проходных печах с роликовым подом, что и нагрев для закалки, причем температура отпуска в зависимости от химического

Таблица 1.26. Химический состав низколегированных сталей, поставляемых в состоянии после контролируемой прокатки, по ТУ 14-1-4083—86, % (по массе)

Марка стали	C	Mn	Si	V	Nb	S	P
						не более	
09Г2ФБ	0,08—0,13	1,50—1,70	0,15—0,35	0,05—0,09	0,02—0,05	0,010	0,020
10Г2ФБ	0,09—0,12	1,55—1,75	0,15—0,35	0,09—0,12	0,02—0,04	0,006	0,020

Примечания: 1. Сталь обрабатывается продувкой аргоном, ферросплавами, содержащими кальций и редкоземельные элементы (церий и др.) в количестве 2 кг/т. 2. Содержание алюминия должно составлять не более 0,05 %, титана — не более 0,035 %; допускается содержание хрома, никеля и меди не более чем по 0,3 % и азота не более 0,010 %.

Таблица 1.28. **Механические свойства листовой строительной стали после закалки и отпуска**

Марка стали	Толщина проката, мм	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	KCU, Дж/см², при температуре, °С		ГОСТ
					—40	—70	
		не менее					
Ст3сп*, Ст3пс	10—25	295	430	16	29	—	ГОСТ 14637—79
Ст3кп	25—40	295	430	16	—	—	ГОСТ 14637—79
14Г2	10—32	390	530	18	39	29	ГОСТ 19282—73
10Г2С1(Д)	10—40	390	530	19	49	29	ГОСТ 19282—73
	10—32	365	490	19	49	29	
09Г2С(Д)	32—60	315	450	21	49	29	ГОСТ 19282—73
15Г2СФ(Д)	10—32	440	590	17	39	29	ГОСТ 19282—73

Примечания: 1. После термоупрочнения углеродистая сталь обозначается марками СтТсп, СтТпс, СтТкп в зависимости от степени раскисления. 2. По требованию заказчика верхний предел временного сопротивления разрыву не должен превышать 690 МПа для стали марок 14Г2, 10Г2С1(Д) и 780 МПа для стали марки 15Г2СФ(Д).

состава стали и заданного уровня прочности выбирается в пределах 600—680 °С; суммарная продолжительность пребывания листов в печи обычно не превышает 1,5—3 ч.

Как показывает табл. 1.28, в отечественной практике при термическом упрочнении углеродистой и низколегированной стали реализуются весьма умеренные уровни прочности, что, по-видимому, можно объяснить стремлением к получению достаточно хладостойкого металлопроката с малой склонностью к разупрочнению при сварке, хотя путем снижения температуры отпуска для тех же сталей могут быть достигнуты значительно более высокие уровни прочности.

Стали, термически упрочненные в потоке стана с использованием тепла прокатного нагрева. Закалка с использованием тепла прокатного нагрева — экономичный и перспективный способ повышения прочности и хладостойкости проката конструкционных сталей. Этот способ в 4—5 раз дешевле, чем термическая обработка с применением специального (печного) нагрева. Однако при его реализации возникает ряд трудностей, связанных с выбором и размещением устройств для закалки, отпуска и правки изделий без снижения скорости закалки и уменьшения производительности станов.

Проблема существенно упрощается при использовании приема, называемого прерванной закалкой. Кратковременное, но интенсивное охлаждение водой с высоким коэффициентом теплоотдачи обеспечивает быстрое снижение температуры поверхностных слоев профиля, в которых образуются продукты низкотемпературных превращений аустенита — мартенсит и нижний бейнит. Последующий нагрев закаленных участков теплом центральных слоев приводит к их отпуску, необходимому для улучшения вязкости и пластичности. Достигаемое одновременно ускоренное охлаждение центральных слоев способствует получению в них благоприятной для прочности и хладостойкости мелкозернистой феррито-перлитной микроструктуры. Схематически этот процесс поясняет рис. 1.14.

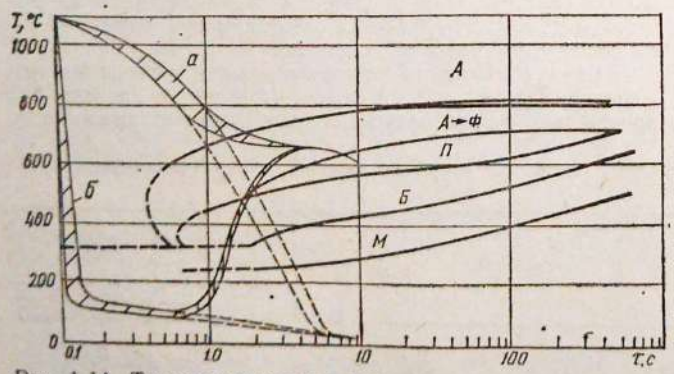


Рис. 1.14. Термокинетическая диаграмма превращения аустенитной стали марки Ст3пс с наложенными кривыми прерванного охлаждения проката:

а — центральных слоев; *б* — поверхностных слоев; штриховые кривые — непрерывное охлаждение; *А* — аустенит, *Ф* — феррит, *П* — перлит, *Б* — бейнит, *М* — мартенсит.

До недавнего времени прерванная закалка широко применялась только для улучшения технологических и служебных свойств мелких прокатных профилей простой геометрической формы — стальной катанки и стержневой арматуры. В настоящее время на непрерывном среднесортном прокатном стане 450 Западносибирского металлургического комбината освоено производство с использованием прерванной закалки термоупрочненного фасонного проката угловых равнополочных профилей № 7,5—12,5 с толщиной полок от 6 до 12 мм, а также близких по размерам профилей швеллеров и двутавров [32]. Термическому упрочнению подвергаются профили из углеродистой стали Ст3пс и Ст3сп, а также низколегированной стали 09Г2С, 14Г2. Предусмотрено получение металлопроката трех уровней прочности с пределом текучести не менее 390, 440 и 490 МПа. Его гарантируемые механические характеристики приводятся в табл. 1.29.

Термически упрочненный с использованием прерванной закалки прокат имеет ряд характерных особенностей. Одна из них — неравномерность распределения микроструктуры и твердости по толщине [41]. Травление поперечных шлифов выявляет закаленный слой у поверхности толщиной 1,5—3 мм с твердостью 190—220 *HV* (рис. 1.15). Твердость центральных слоев (130—150 *HV*) близка к твердости стали в горячекатаном состоянии.

В связи с неоднородностью по толщине полное представление об агрегатной прочности материала можно получить

Таблица 1.29. **Механические свойства фасонных профилей, термически упрочненных в потоке стана 450, по ТУ 14-15-146—85**

Уровень предела текучести	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	KCU, Дж/см², при температуре, °С		
				—70		20 после механического старения
				углеродистая сталь	низколегированная сталь	
	не менее					
390	390	490	20	29	—	29
440	440	540	18	29	34,5	29
490	490	590	16	29	34,5	29

Примечания: 1. Прокат с уровнем предела текучести 390 изготовляется из сталей марок Ст3пс и Ст3сп; 440 и 490 — из сталей марок Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, 14Г2 и 09Г2С. 2. Изгиб до параллельности сторон $d = 2a$.

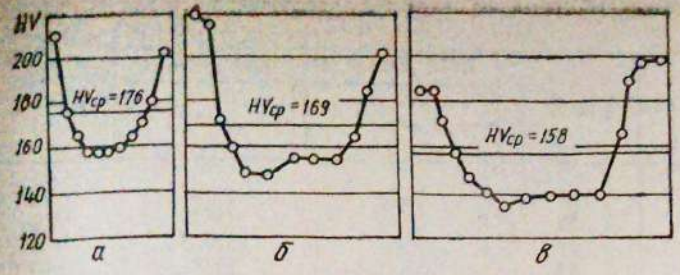


Рис. 1.15. Распределение твердости по толщине термоупрочненного проката угловых профилей из стали марки Ст3пс: *а* — 75 × 75 × 6 мм; *б* — 100 × 100 × 10 мм; *в* — 100 × 100 × × 12 мм; горизонтальная линия — средний уровень твердости.

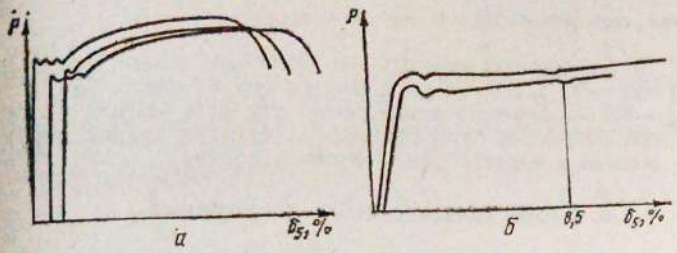


Рис. 1.16. Диаграммы растяжения плоских (полнотолщинных) образцов термоупрочненного фасонного проката из стали Ст3пс (*а*) и их начальные участки в увеличенном масштабе деформаций (*б*).

только при испытании полнотолщинных образцов. При этом для стали характерна диаграмма растяжения с развитой площадкой текучести (рис. 1.16), причем небольшая пластическая деформация появляется еще до достижения верхнего предела текучести при напряжении около 0,8 его значения.

Испытания на динамический изгиб выявляют весьма высокий уровень вязкости и хладостойкости термоупрочненного проката. Профили с более тонкой полкой имеют более высокую хладостойкость, как показывают температуры хрупкости по критерию 50 % волокна в изломе (перед чертой — для образцов с полукруглым надрезом типа I, за чертой — для остронадрезанных образцов типа II по ГОСТ 9454—78):

Толщина листа, мм	T_{50}, °С
6	—73/—28
10—12	—35/—10

Под влиянием термических циклов ручной и автоматической электродуговой сварки в закаленных наружных слоях проката наблюдается локальное разупрочнение (рис. 1.17). Оно вызвано одновременно протекающими процессами высокого отпуска и фазовой перекристаллизации. Повышение тепловложения сварки сопровождается расширением разупрочненных зон и некоторым уменьшением минимальной твердости. Однако протяженность разупрочненных участков невелика и находится в пределах 2—4 мм. Локальное разупрочнение не снижает агрегатной прочности

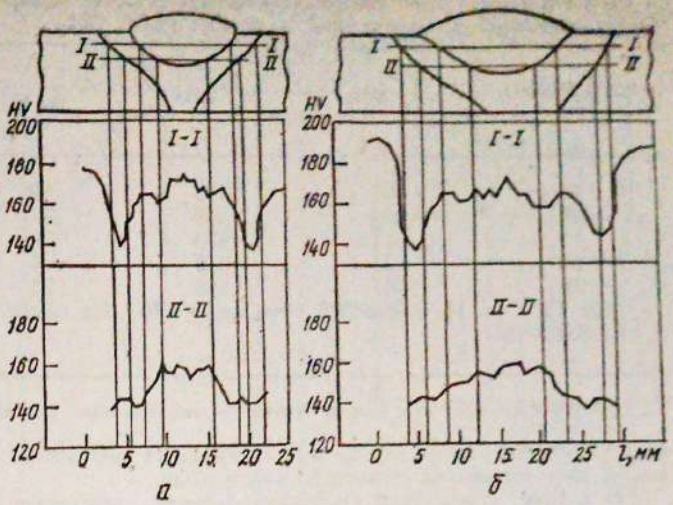


Рис. 1.17. Распределение твердости в поперечном сечении полки термоупрочненного углового профиля толщиной 10 мм из стали Ст3пс с наплавленными валиками. Наплавка автоматической сваркой проволокой Св-08ГА под флюсом АН-348А при тепловложении 1,25 (*а*) и 2,08 МДж/м (*б*).

сварных соединений, которая находится на уровне прочности основного металла как для соединений с поперечными стыковыми швами, так и для нахлесточных соединений с продольными фланговыми швами. В первом случае это объясняется тем, что малая протяженность разупрочненных зон обусловливает высокий уровень контактного упрочнения мягких прослоек [9], во втором — тем, что разупрочненные зоны располагаются на некотором удалении от границы сплавления, вследствие чего возможное уменьшение сопротивления срезу компенсируется увеличением потенциальной поверхности разрушения.

Приведенные в табл. 1.30 результаты заводских испытаний партий термоупрочненного проката угловых профилей № 5, 7, 9 и 10 из стали Ст3пс (95 тыс. т) говорят о высоких уровнях прочности и вязкости и об их стабильности.

Циклическая прочность сварных соединений при пульсирующем растяжении определялась на базе $2 \cdot 10^6$ циклов при коэффициентах асимметрии 0,2 и 0,6. Установлено, что в диапазоне числа циклов от 10^5 до $2 \cdot 10^6$ ограниченные пределы выносливости сварных соединений профилей из низколегированной стали 09Г2С и из термоупрочненной углеродистой стали Ст3пс практически одинаковы.

Термоупрочненный фасонный прокат сортамента стана 450 Западносибирского металлургического комбината из углеродистой стали Ст3пс и Ст3сп уровня прочности 390 рекомендован для применения в сварных строительных металлоконструкциях, в том числе ответственного назначения, эксплуатируемых при динамических и переменных нагрузках, а также при низких климатических температурах («северное исполнение»), вместо аналогичного проката горячекатаных низколегированных сталей марок 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1, 14Г2 и 15ХСНД без пересчета сечений. Такая за-

Таблица 1.30. Данные приемо-сдаточных испытаний углового проката стали Ст3пс, упрочненного в потоке стана 450

Профиль	Число испытаний	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	KCU, Дж/см², при температуре, °С	
				—70	20 после механического старения
№ 7,5	278	484/53	573/50	172/34	185/32
№ 9	142	452/35	544/32	175/41	175/32
№ 10	28	—	—	156/32	174/22
По марке	506	473/49	563/45	173/38	182/32

Примечание. Перед чертой — среднее значение, за чертой — среднеквадратическое отклонение.

Таблица 1.31. Типичные механические свойства поперечных образцов из листовой углеродистой стали марки Ст3сп, термически упрочненной в потоке стана 3600

Толщина листа, мм	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %	KCU, Дж/см², при температуре, °С		T_{50}, °С
					—40	—70	
12	327	472	32	51	56/57	22/27	—40
16	340	508	27	52	48/52	48/49	10
16	311	473	30	49	46/47	23/28	—20
20	331	512	24	49	43/48	27/31	—10
30	347	545	23	55	100/124	81/87	—10
По ТУ 14-1-3521—83	Не менее 325	Не менее 470	Не менее 16	—	Не менее 49	Не менее 29	—

Примечание. Перед чертой — минимальные значения трех испытаний, за чертой — средние значения.

мена уменьшает расход дефицитных легирующих ферросплавов и дает снижение стоимости конструкций.

В потоке стана 3600 металлургического комбината «Азовсталь» предпринята попытка получения с использованием технологии прерванной закалки термоупрочненного листового проката углеродистой стали. Ускоренному охлаждению водой в устройстве с противотоком и кратковременному дополнительному отпуску (при 600—620 °С) в проходной печи подвергаются листы толщиной от 12 до 30 мм. Механические свойства в целом соответствуют уровню показателей для низколегированной стали 09Г2С-6 по ГОСТ 19282—73 (табл. 1.31). Однако в связи с частым нарушением требований по прочностным характеристикам и ударной вязкости при отрицательных температурах, обусловленным, по-видимому, недостаточной интенсивностью охлаждения при закалке, эта технология нуждается в доработке.

Направленное изменение микроструктуры, основанное на сочетании различных режимов горячей пластической деформации и регулируемого охлаждения (термомеханической обработки), позволяет существенно расширить пределы получаемой прочности, пластичности и хладостойкости конструкционной стали. Так, японская металлургическая фирма «Сумитомо» разработала и реализовала режимы, получившие обозначение DAC и SHT (рис. 1.18). По первому из них сталь подвергается прокатке при пониженных температурах в аустенитной области до начала полиморфного превращения (выше точки A_{r_3}), после чего следует ускоренное регулируемое охлаждение водой, по второму режиму — SHT — контролируемая прокатка сопровождается охлаждением до температуры ниже завершения полиморфного превращения (ниже точки A_{r_1}). Затем листы нагреваются до температуры несколько выше критической точки A_{c_3}, после чего осуществляются прокатка в нижнем интервале аустенитной области и заключительное ускоренное охлаждение водой. Обработанная таким способом сталь (0,05 % С, 0,12 % Si, 1,30 % Mn, 0,015 % P, 0,001 %S, 0,63 % Ni и 0,017 % Nb, углеродный эквивалент 0,30 %) в листах толщиной 20—50 мм имеет предел текучести 400 МПа, временное сопротивление разрыву 580 МПа, относительное удлинение 34 %, ударную вязкость на остронадрезанных образцах при —80 °С 200 Дж/см² и температуру хрупкости T_{50} ниже —100 °С. Сталь рекомендуется для изготовления металлоконструкций глубоководных морских оснований, сооружаемых в ледовых (арктических) условиях.

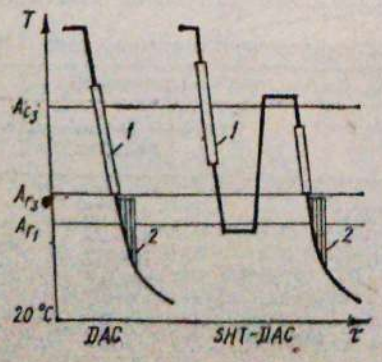


Рис. 1.18. Режимы термомеханического упрочнения низколегированной стали японской фирмы «Сумитомо»:
1 — горячая прокатка;
2 — охлаждение водой.

1.1.8. Стали специального назначения

Сталь с гарантированными механическими свойствами в направлении толщины проката. Проблема получения стали с гарантированными свойствами в направлении толщины проката (*z*-направление) тесно связана с необходимостью повысить характеристики предельной пластичности и вязкости и уменьшить их анизотропию в прокате. Определяющая роль в достижении этой цели принадлежит снижению загрязненности стали неметаллическими включениями. При пластическом деформировании включения становятся причиной образования в металле внутренних пустот, рост и слияние которых обусловливают вязкое разрушение. Наибольшее отрицательное влияние оказывают включения сильно вытянутой пластинчатой формы и групповые компактные включения, расположенные в виде строчек. В горячекатаных изделиях из хорошо раскисленной строительной стали они представлены в основном вытянутыми включениями сульфида марганца (MnS) и строчечными включениями глинозема (Al_2O_3), образующимися при раскислении и затвердевании стали. Вытянутую форму и расположение в виде строчек им придает горячая прокатка.

Анизотропия пластичности ограничивает пригодность стали к операциям холодной формовки с большой пластической деформацией: гибке, штамповке, глубокой вытяжке, завальцовке [18, 39]. Особенно ощутимо она проявляется в образовании ламелярных (пластинчатых или слоистых) трещин при сварке, которые возникают в основном металле вблизи сварных швов под воздействием напряжений и термодеформационных циклов сварки.

Трещины на шлифах в поперечном сечении соединений имеют специфическое ступенчатое строение (см. рис. 1.6). Преобладают прямые участки (террасы), параллельные плоскости прокатки, которые чередуются с более короткими участками (сбросами или разрывами), перпендикулярными к этой плоскости. Террасы совпадают с расположением вытянутых и строчечных неметаллических включений. Поверхность разрушения, вызванного ламелярными трещинами, визуально напоминает излом дерева, расщепленного вдоль волокна.

Ламелярные трещины появляются в процессе сварки или непосредственно после нее, когда температура металла опускается ниже 200 °С. Наблюдаются также случаи образования указанных трещин при термообработке сварных соединений для снятия напряжений. Особенно часто ламелярные трещины появляются при сварке проката из низколегированной марганцовистой стали значительной толщины — 25 мм и более. Однако здесь нет строгой закономерности, так как известны случаи появления ламелярных трещин при сварке мягкой углеродистой стали и при сварке

Рис. 1.19. Схема вырезки образцов для испытания на растяжение из листового проката по стандарту ИСО 7778—1983 (Е).

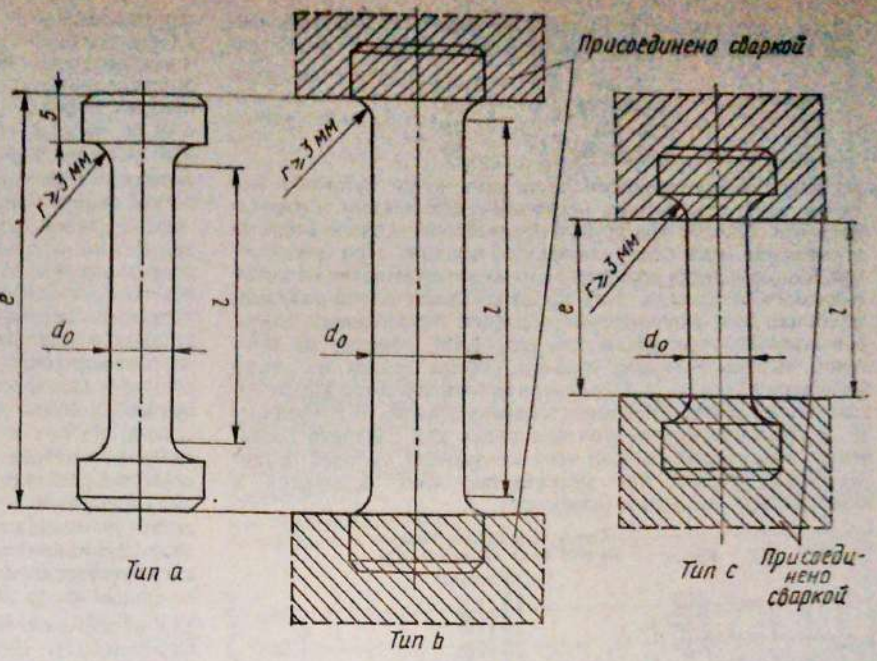
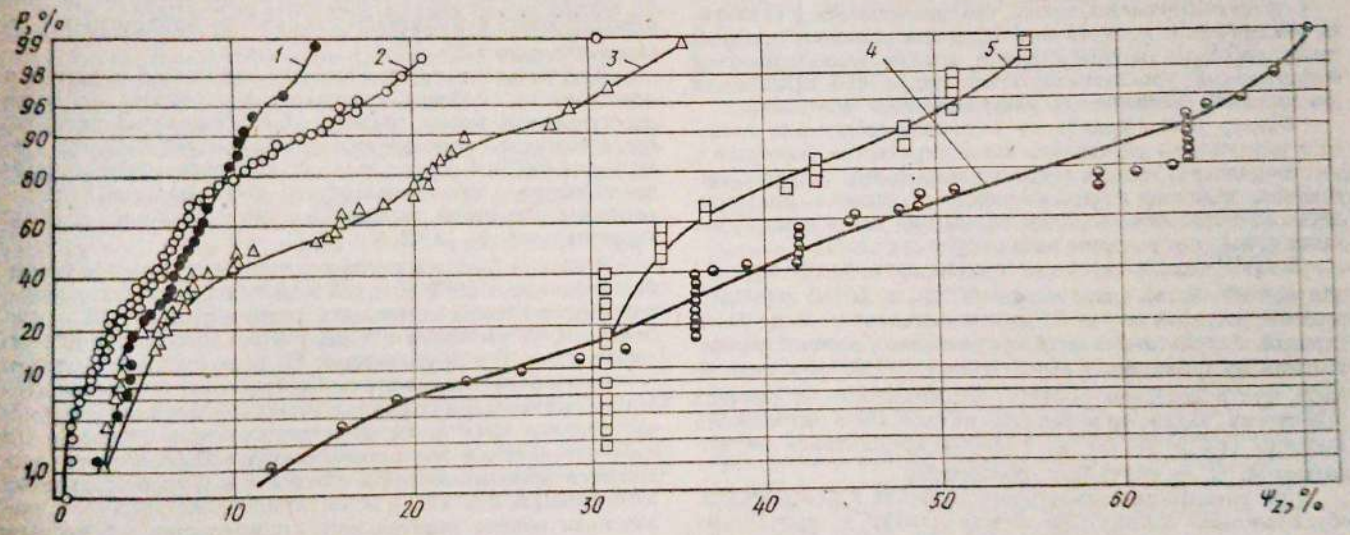


Рис. 1.20. Кумулятивные кривые распределения значений ψ_Z для листов низколегированных сталей марок:

1, 2, 3 — 10ХСНД, 14Г2АФ и 10Г2С1 соответственно обычного изготовления; *4, 5* — 14Г2АФ и 12ХГДАФ соответственно улучшенной выплавки.



проката толщиной 3—6 мм. Ламелярные трещины наблюдали при сварке стали, поставляемой в горячекатаном, нормализованном и термоулучшенном состоянии. Все же вероятность их появления тем выше, чем прочнее сталь, что, по-видимому, обусловлено пониженной пластичностью высокопрочной стали. Режим сварки мало влияет на появление указанных дефектов, однако частота их образования возрастает с увеличением числа слоев в шве.

Ламелярные трещины чаще обнаруживаются в соединениях с угловыми швами, реже — в соединениях с прямыми стыковыми швами. Их образованию способствует большая жесткость свариваемого элемента, а также высокая прочность металла шва. Имеются надежные данные, что повышенное содержание водорода в металле сварного соединения способствует образованию ламелярных трещин. В связи с этим рекомендуется для предупреждения трещин тщательно удалять влагу, проводить сварку «мягкими» электродами, при которой металл шва менее прочен и более склонен к пластическому деформированию, чем основной металл. Рекомендуется также прибегать к предварительному подогреву, предварительной наплавке (облицовке) кромок, а иногда — к специальному изменению формы соединений.

Особенно опасно образование слоистого разрушения в листовых элементах ответственных металлоконструкций, испытывающих большие нагрузки в направлении толщины: сварных узлах примыкания ригелей к колоннам в рамных конструкциях, сварных соединениях трубчатых стержней стационарных морских платформ, фланцах монтажных соединений растянутых поясов ферм и др.

Предложено много способов испытания стали на склонность к образованию ламелярных трещин. Одни из них предусматривают применение сварки с характерным воздействием на материал ее термодеформационных циклов, другие являются чисто механическими испытаниями. К числу последних принадлежит простой, надежный и наиболее распространенный способ испытания на растяжение образцов, вырезанных из металлопроката в направлении толщины. Критерием стойкости против образования ламелярных трещин служит относительное сужение ψ_Z, минимальное и среднее значения которого нормируются.

Международный стандарт ИСО 7778—1983(Е) и ГОСТ 28870—90 предусматривают определение ψ_Z испытанием на растяжение цилиндрических образцов диаметром 6 и

10 мм в зависимости от толщины проката с отношением рабочей длины к диаметруне менее 1,5 (рис. 1.19):

l, мм	d_0, мм
Менее 25	6
25—50	10
Свыше 50	10

Из каждого проверяемого листа вырезается заготовка для шести образцов, причем первичным испытаниям подвергаются три образца; три других предназначены для повторных испытаний, если обнаруживаются выпады. При достаточной толщине листа образец целиком изготовляется из испытываемого материала. Для проката ограниченной толщины заготовки для изготовления образцов необходимых размеров получают приваркой (см. рис. 1.19), образцы из заготовок вырезают таким образом, чтобы захватные части были выполнены из приваренного материала, тогда как испытываемый материал попадает в рабочую часть. В зависимости от рассчитываемого фактора риска для сварного соединения выбирается один из трех следующих уровней гарантируемых средних (по результатам трех испытаний) и минимальных значений (классов):

Класс	Среднее и минимальное (в скобках) значения ψ_Z, %, не менее
Z15	15 (10)
Z25	25 (15)
Z35	35 (25)

Предусматривается также, что одновременно с гарантией механических свойств в направлении толщины при поставке листового металлопроката должен гарантироваться определенный уровень отсутствия нарушений сплошности (расслоений), выявляемых ультразвуковым контролем.

Фактор риска появления в сварном соединении слоистого разрушения определяют по эмпирическим формулам с учетом размера сечения сварного шва, формы сварного соединения, толщины листа, жесткости соединения, предварительного подогрева, порядка наложения слоев шва. У нас такие стандарты и нормы пока отсутствуют [111].

В ЦНИИпроектстальконструкции изучены значения ψ_Z для партий листов стали марок 10Г2С1, 10ХСНД и 14Г2АФ рядовой поставки по 41—98 листов толщиной от 25 до 60 мм каждый. Результаты в виде кумулятивных кривых распределения ψ_Z приведены в левой части рис. 1.20. Они показывают, что в листовом прокате, изготовленном по обычной технологии, заданные механические свойства в направлении толщины ($\psi_Z \geqslant 15...35$ %) с обычно принимаемой вероятностью 95 % не могут быть обеспечены.

Для уменьшения анизотропии вязкости и пластичности, обусловленной вытянутыми пластинчатыми и строчечными неметаллическими включениями, содержание серы в стали следует уменьшать до весьма низкого уровня. Однако если в листах толщиной 20—60 мм оказывается достаточным снижение содержания серы до 0,008—0,010 % (рис. 1.21), то для листов и полос меньшей толщины (8—16 мм) вследствие большей вытяжки и пониженной температуры прокатки требуемые высокие значения ψ_Z удается получить только при содержании серы ниже 0,005 %. Поэтому целесообразно прибегать также к направленному воздействию на химический состав, форму, размеры и распределение неметаллических включений, получившему название «модифицирование» [19]. Модифицирующая обработка, обеспечивающая получение компактных неметаллических включений (глобулярных или имеющих огранку), равномерно распределенных в матрице и слабо деформируемых при прокатке, может осуществляться в зависимости от принятой металлургической технологии введением в жидкую сталь (в процессе разливки или перед ней) небольших добавок некоторых металлов (циркония, титана, РЗМ или кальция) или металлоидов (теллура или селена). Наиболее благоприятные результаты получают при модифицировании кальцием и его соединениями или кальцием в сочетании с РЗМ. Именно таким способом получают листовую сталь марки 14Г2АФ для фланцев растянутых поясов стропильных ферм, поставляемую Череповецким металлургическим комбинатом по ТУ 14-105-465—89 с гарантированным $\psi_Z \geqslant 20$ %, и листовую сталь марки 12ХГДАФ для металлоконструкций морских стационарных платформ, поставляемую металлургическим комбинатом «Азовсталь» по ТУ 14-1-4329—87 с гарантированным $\psi_Z \geqslant 30$ %. Соответствующие кумулятивные кривые ψ_Z приведены в правой части рис. 1.20.

Другим радикальным способом повышения вязкости и пластичности, особенно в направлении толщины, но более дорогим и дефицитным, является электрошлаковый переплав. Он, в частности, используется при получении листовой стали марки 16Г2АФ-Ш для сварных крупногабаритных сосудов давления, в том числе кожухов доменных печей большого объема. Для стали этой марки в листах толщиной до 70 мм гарантируется $\psi_Z \geqslant 45$ %.

В табл. 1.32 приводятся механические свойства листовой стали марок 09Г2СД и 12ХГДАФ для металлоконструкций морских стационарных платформ, а в табл. 1.33 — требования к отсутствию в ней нарушений сплошности для узловых (класс I) и других (класс II) элементов конструкций.

Атмосферостойкие стали. Стальные строительные конструкции защищают от коррозии лакокрасочными покрытиями, которые приходится периодически наносить вновь. На первоначальную и последующую грунтовку и окраску расходуется значительная доля стоимости и трудовых затрат по изготовлению, монтажу и эксплуатации конструкций. С увеличением объема капитального строительства эти расходы

Таблица 1.32. Механические свойства толстолистовой стали для элементов узловых конструкций морских стационарных платформ * по ТУ 14-1-4329—87

Марка стали	Толщина листа, мм	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ_Z, %	KCV**, Дж/см² при температуре, °С		KCU, Дж/см² при температуре, °С	
						—10	—20	—50	—70
		не менее							
09Г2СД	10—20	325	470	21	—	—	—	30	—
	20—32	305	460	21	30 ***	80 ***	—	30	—
	32—60	285	450	21	30	80	—	30	—
	60—80	275	440	21	30	80	—	30	—
	80—100	265	430	21	30	80	—	30	—
12ХГДАФ	10—30	350	500	21	30 ***	—	80 ***	—	60
	30—60	330	480	21	30	—	80	—	60
	60—100	310	460	21	30	—	80	—	60

* Изгиб до параллельности сторон $d = 2a$.
** На продольных образцах.
*** При толщине листа 25 мм и более.

непрерывно возрастают. Поэтому важное народнохозяйственное значение имеют материалы, не требующие защитных покрытий, или те из них, у которых срок службы покрытий существенно увеличивается. Таким материаалом являются атмосферостойкие стали [35]. Они не представляют собой нержавеющий материал, такой, например, как высоколегированная хромоникелевая сталь типа Х18Н10. Легирующие добавки в атмосферостойкой стали явно недостаточны для полного пассивирования их поверхчости. Отличие от углеродистых сталей заключается лишь в том, что после одинакового времени атмосферной коррозии атмосферостойкая сталь благодаря небольшим добавкам некоторых легирующих элементов обнаруживает значительно меньшую потерю массы, причем эта разница с течением времени увеличивается, так как коррозия атмосферостойкой стали практически прекращается. Непременным условием протекания коррозии является наличие влаги на поверхности металла. Контактирующая с металлом влага почти всегда содержит растворенные газы, соли, кислоты, что делает ее электролитом. На скорость этих процессов влияет электрическое сопротивление пленки влаги. При малом содержании в последней солей или газов (например, в сельской атмосфере) омическое сопротивление велико и скорость коррозии низка. В загрязненной промышленной и в морской атмосфере скорость коррозии заметно выше. Еще выше она в морской воде из-за высокой концентрации растворенных солей.

В промышленной атмосфере содержится сернистый ангидрит (SO_2), который окисляется кислородом в электролите до серной кислоты, что приводит к ускорению коррозии.

Образующийся на поверхности стали гидрат оксида железа FeOOH является (наряду с магнитным оксидом железа Fe_3O_4) основным компонентом ржавчины. Физико-механические свойства слоя продуктов коррозии — плотность, твердость, растворимость, прочность сцепления с металлической поверхностью — при прочих равных условиях зависят от степени и режима влажности, химического состава стали и коррозионной среды (атмосферы), температуры металла, длительности коррозии, солнечной радиации и др. С течением времени толщина слоя ржавчины увеличивается, заполняются поры и трещины в нем, что затрудняет транспорт влаги и кислорода к границе раздела с металлом и миграцию от нее образующихся ионов железа. Это замедляет коррозию, вследствие чего зависимость потери массы стали от продолжительности коррозии выражается плавной затухающей кривой (рис. 1.22). Однако на поверхности обычной углеродистой стали в условиях достаточной смачиваемости коррозия не прекращается, так как образующийся мягкий пористый слой ржавчины слабо блокирует массоперенос.

Легирующие элементы (медь, никель, хром, молибден, титан, кремний и др.) также участвуют в реакциях электрохимической коррозии, и образующиеся соединения этих элементов, попадая в слой ржавчины, способны оказывать значительное влияние на его физико-механические свойства. Именно способность некоторых легирующих элементов изменять свойства ржавчины позволяет создать атмосферостойкую сталь, дающую возможность при соблюдении определенных условий избежать нанесения на конструкции защитных покрытий. Образующийся в течение 1,5—3 лет на незащищенной поверхности такой стали естественный слой продуктов коррозии, содержащих соединения основных сульфатов, гидроксидов, карбонатов, фосфатов и силикатов хрома, никеля, меди, обладает повышенными плотностью, прочностью и лучшей сцепляемостью с поверхностью металла, чем на обычной стали. Поэтому к концу указанного периода дальнейшая коррозия резко замедляется или прекращается совсем (см. рис. 1.22).

Медь и фосфор как легирующие элементы наиболее эффективно повышают сопротивление атмосферной коррозии. Их действие проявляется уже при небольших количествах, и при увеличении содержания меди свыше 0,15—0,20 % и фосфора свыше 0,30 % дальнейшее повышение коррозионной стойкости стали незначительно. Хром при введении его в сталь до 1 % мало влияет на сопротивление атмосферной коррозии и даже несколько его понижает. Однако в присутствии меди (0,06 % и более) хром существенно повышает коррозионную стойкость стали. Никель значительно повышает сопротивление стали атмосферной коррозии, причем наиболее существенно также в присутствии меди.

Совместное действие меди, фосфора, хрома и никеля на повышение коррозионной стойкости сильнее действия каждого из этих элементов в отдельности.

Углерод, кремний, марганец и ванадий меньше влияют на коррозионную стойкость стали. (В промышленной атмосфере марганец при содержании до 1,5—1,8 % снижает на 20—30 % коррозионную стойкость, в морской атмосфере примерно на столько же ее повышает. Кремний при введении в углеродистую и низколегированную марганцовистую сталь до 1,2 % не изменяет ее коррозионной стойкости.)

Рис. 1.21. Зависимость значений ψ_z от содержания серы в толстолистовой низколегированной стали.

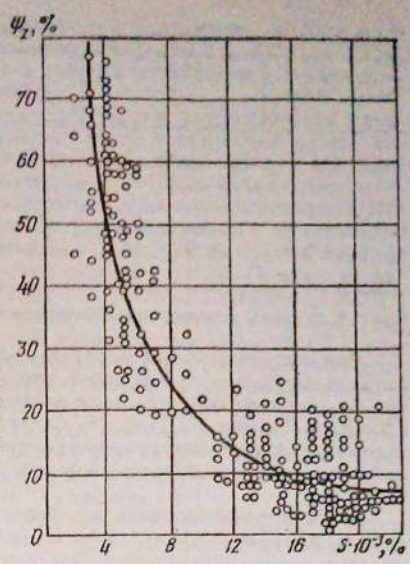


Рис. 1.22. Коррозия углеродистой (*1*) и атмосферостойкой (*2*) строительной стали в атмосфере разной агрессивности:
а — промышленной; *б* — сельской; *в* — морской.

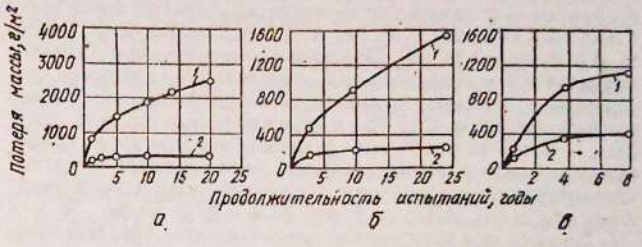


Таблица 1.33. **Нормы сплошности при ультразвуковом контроле толстолистовой стали для конструкций морских стационарных платформ по ТУ 14-1-4329—87**

Класс проката	Участок контроля	Условная площадь нарушения сплошности, см²		Относительная условная площадь всех учитываемых нарушений сплошности на всей площади листа S, %, не более
		минимального учитываемого S_1	максимального допускаемого S_2	
I	Площадь листа	0,5	1,0	0,15
II	Площадь листа или кромки	20	50	0,5

Примечание. Ультразвуковой дефектоскопический контроль для оценки сплошности проводится по ГОСТ 22727—88: проката класса I — полностью, класса II — по два листа от партии.

Таблица 1.34. Химический состав отечественных атмосферостойких сталей, % (по массе)

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	V	N
10ХНДП	Не более 0,12	0,3—0,6	0,17—0,37	0,5—0,8	0,3—0,6	0,3—0,5	—	—
10ХДП	»	0,3—0,6	0,17—0,37	0,5—0,8	Не более 0,3	0,2—0,4	—	—
08ХГСДП *	Не менее 0,10	0,8—1,2	0,5—0,8	0,5—0,8	—	0,2—0,4	—	—
12ХГДАФ *	0,09—0,15	0,6—1,0	0,17—0,37	0,8—1,1	—	0,25—0,5	0,77—0,12	0,015—0,025

* В сталь вводится технологическая добавка алюминия.

Влияние легирующих элементов на сопротивление коррозии в морской воде и морской атмосфере качественно такое же, как и на сопротивление коррозии в промышленной атмосфере (см. рис. 1.22), с той, однако, разницей, что коррозия протекает в несколько раз быстрее, чем в промышленной атмосфере, и защитного слоя продуктов коррозии не образуется.

Атмосферостойкие низколегированные стали выпускаются металлургическими фирмами многих стран. Для большинства марок химический состав повторяет (с небольшими вариациями) ставшую классической композицию стали производства США типа Кор Тен А: 0,5 % Cu, 1,0 % Cr, 0,5 % Si, 0,5 % Ni и 0,1 % P. При этом для компенсации ухудшения вязкости и свариваемости, обусловленного высоким содержанием фосфора, ограничивают содержание углерода уровнем не более 0,12 % и максимальную толщину проката — 9 или 12 мм. В этом диапазоне толщин прочностные свойства стали и ее пластичность после горячей прокатки удовлетворяют требованиям к обычной низколегированной стали: $\sigma_т \geqslant 345$ МПа; $\sigma_в \geqslant 490$ МПа и $\delta_5 \geqslant 22$ %.

Для проката более значительных толщин предлагаются другие варианты атмосферостойкой стали, аналогичные стали Кор Тен Б, в которой при обычном содержании фосфора не более 0,04 %) содержится примерно 1,0 % Mn, 0,3 % Cu, 0,6 % Cr и 0,02—0,1 % V. Механические свойства сталей Кор Тен А и Кор Тен Б близки.

Для применения в неокрашиваемых конструкциях рекомендуются атмосферостойкие стали марок 10ХНДП (10ХДП) типа Кор Тен А, поставляемые в листовом и фасонном прокате толщиной до 9 или 12 мм, 08ХГСДП, поставляемая в виде фасонных профилей, и 12ХГДАФ типа Кор Тен Б, поставляемая в листовом прокате толщиной 12—50 мм. Последняя сталь благодаря использованию карбонитридного упрочнения и термической обработки (нормализации) обладает высокой хладостойкостью, необходимой для конструкций «северного исполнения».

Химический состав и механические свойства отечественных атмосферостойких сталей приведены в табл. 1.34, 1.35.

Стали 10ХНДП (10ХДП) и 08ХГСДП применяются для конструкций, эксплуатируемых при статических нагрузках в обычном диапазоне климатических температур. Сталь 12ХГДАФ благодаря повышенному сопротивлению хрупкому разрушению может быть использована также для конструкций, подвергающихся динамическому и переменному нагружению, а также эксплуатируемых при расчетных температурах ниже —40 °С («северное исполнение»).

Сварка атмосферостойких сталей не вызывает затруднений и может производиться теми же способами, что и сварка других низколегированных сталей. Однако если к стойкости сварных швов против атмосферной коррозии предъявляются те же требования, что и к основному металлу, то применяемые сварочные материалы (электроды, присадочная проволока, флюс) и режим сварки должны обеспечить получение химического состава металла шва, близкого к составу основного металла. Согласно данным ЦНИИПСК, хорошие результаты дает ручная электродуговая сварка электродами с покрытием марки ОЗС-18, автоматическая сварка проволокой Св-08Х1ДЮ под флюсом АН-348А и сварка в атмосфере углекислого газа проволокой Св-08ХГ2СДЮ. Металл болтов и заклепок в неокрашиваемых монтажных соединениях должен быть близок по химическому составу к основному металлу.

Экономический эффект от применения атмосферостойкой стали в сравнении с другими низколегированными сталями той же прочности создается исключением расходов на защиту от коррозии металлических конструкций: первоначальную подготовку поверхности, грунтовку и окраску при воздействии конструкции, повторную окраску через 10 лет эксплуатации и последующее возобновление лакокрасочного слоя через каждые 3 года.

Защитный слой на поверхности атмосферостойкой стали формируется в течение 1,5—3 лет только в условиях эксплуатации на открытом воздухе в слабоагрессивной атмосфере при периодическом естественном увлажнении и высыхании. Потеря толщины металла при этом обычно не превышает 50 мкм. Защитный слой не образуется при эксплуатации в закрытых помещениях с постоянной повышенной влажнос-

Таблица 1.35. Механические свойства отечественных атмосферостойких сталей *

Марка стали	Толщина проката, мм	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$\delta_{5к}$ %	KCU, Дж/см², при температуре, °С		
					—40	—70	20 после механического старения
		не менее					
10ХНДП	До 5	343	470	21	—	—	—
	5—9	343	470	21	34	—	—
10ХДП	До 5	323	441	21	—	—	—
	5—9	304	441	21	34	—	—
08ХГСДП	До 10,5	323	470	21	—	29 **	29 **
12ХГДАФ	8—11	345	490	20	—	29	29
	12—30	345	490	20	—	29	29
	31—100	325	470	20	—	29	29

* Изгиб до параллельности сторон составляет $d = 2a$.
** При —60 °С.

S	P	ГОСТ или ТУ
Не более 0,035	0,07—0,12	ТУ 14-1-1217—75 ГОСТ 19282—73
»	0,07—0,12	ТУ 14-1-1217—75
»	0,05—0,08	ТУ 14-1-3346—82
Не менее 0,04	Не более 0,04	ТУ 14-1-2881—80

тью, при постоянном контакте с водой, в средне- и сильноагрессивной атмосферах (химического производства и цветной металлургии), в морской атмосфере, во влажном тропическом климате. Однако и в этих условиях применение атмосферостойких сталей часто оказывается целесообразным, но в окрашенном состоянии, так как благодаря лучшей сцепляемости с поверхностью металла срок службы искусственных защитных покрытий на атмосферостойкой стали в 1,5—2 раза более продолжителен, чем на обычной стали.

Хладостойкие стали для конструкций, эксплуатируемых при низких (криогенных) температурах. Развитие химической и нефтехимической промышленности, а также освоение новых газовых месторождений требует осуществлять в широких масштабах транспортировку, переработку и хранение различных газов. Хранить и транспортировать газы экономически выгодно лишь в сжиженном состоянии, так как сжижение природного газа уменьшает его объем в 600 раз. Металлоемкость хранилищ с переходом на сжиженный газ уменьшается в 1,5—2 раза.

Для хранения сжиженных газов используются изотермические резервуары, имеющие наружную и внутреннюю металлические оболочки с эффективным утеплителем между ними. Хранят сжиженный газ при давлении, несколько превышающем атмосферное, и температуре, близкой к точке кипения газа при атмосферном давлении. Эта температура, при которой эксплуатируется внутренняя оболочка резервуара, составляет для этилена —104 °С, для метана —162 °С, для природного газа —165 °С, для кислорода —183 °С и для азота —196 °С. Емкость применяемых в нашей стране изотермических резервуаров составляет 300—60 000 м³.

Материалы, используемые в конструкциях при указанных температурах, помимо высокой вязкости, необходимой для предотвращения хрупкого разрушения, должны обладать хорошей свариваемостью, достаточной прочностью, обрабатываемостью и не менять своих свойств в процессе изготовления конструкций и эксплуатации, а также должны быть экономически выгодными. Для металлоконструкций, работающих при криогенных температурах, возможно использование аустенитных нержавеющих сталей, алюминиевых, медных и никелевых сплавов. Однако наиболее эффективными оказываются стали с 6 и 9 % никеля [36].

При легировании стали никелем с содержанием его до 10—13 % температура хрупкости монотонно снижается со средней интенсивностью 20—30 °С на 1 % Ni. Положительное влияние никеля на хладостойкость обусловливается, по-видимому, измельчением микроструктуры, которое проявляется не только в малых размерах зерен, субзерен и других фрагментов, но и в наличии устойчивых микровыделений остаточного аустенита.

Оптимальные микроструктура и хладостойкость никелевых сталей достигаются после термической обработки, включающей закалку и последующий отпуск или нормализацию с последующим отпуском, которые обеспечивают микроструктуру с максимальным содержанием остаточного аустенита. Последний должен быть устойчивым и не склонным к распаду на мартенсит при охлаждении до низких температур, а также при дальнейшей эксплуатации. Применяют либо термическое улучшение с нагревом при закалке до 800 °С, либо двойную нормализацию с последующим отпуском. Температура нагрева первой нормализации около 900 °С, второй — 780—800 °С. Температура отпуска выбирается в диапазоне 570—620 °С. Предлагаются и другие режимы термообработки, более трудоемкие, но дающие лучшие результаты. Так, в США для достижения наиболее высокой хладостойкости стали с 5—9 % никеля используется закалка с нагревом до 800 °С и последующий двукратный отпуск: при 670 °С в течение 1 ч и при 600 °С в течение 1 ч.

Микроструктура после термической обработки состоит из отпущенных продуктов низкотемпературных превращений: мартенсита и бейнита и тонких включений аустенита (10—12 %), расположенных по границам мартенситных реек и внутри них.

В табл. 1.36, 1.37 приведены химический состав и механические свойства отечественных хладостойких никелевых сталей марок ОН6 и ОН9. Сталь ОН6 дополнительно легирована ниобием. Никелевые стали имеют высокие прочностные характеристики $\sigma_т$ и $\sigma_в$.

В США и Японии разными металлургическими фирмами разработаны никелевые стали, в которых содержится до 1—2 % Mn, до 0,4 % Mo, а также добавки хрома и меди в разных сочетаниях. Это дополнительное легирование позволяет снизить содержание никеля до 5—5,5 % при сохранении хладостойкости на уровне стали с 9 % Ni.

В бывшем СССР и за рубежом для сварки никелевых сталей используют ручную электродуговую сварку покрытыми электродами, электродуговую сварку в защитных газах, а также механизированную и автоматическую сварку под флюсом. Основная проблема — получение металла шва с такой же хладостойкостью, что и у основного металла. Однако существуют и другие проблемы: различие в температурных коэффициентах линейного расширения металла шва и основного металла, поведение при коррозионном воздействии окружающей среды, опасность водородного охрупчивания и т. п.

Обычно для сварки никелевых сталей используются присадочные материалы на основе высоконикелевых сплавов. В частности, для ручной дуговой сварки сталей марок ОН6 и ОН9 используются высоконикелевые электроды марок НИАТ-5 и ОЗЛ-25Б. Их недостатком является низкий предел текучести металла шва. В разультате расчетные сопротивления для сварного соединения принимаются в 1,5—2 раза ниже, чем те, которые могут быть приняты для основного металла. В связи с этим проводятся работы по повышению прочности присадочных материалов. Оно достигается вве-

Таблица 1.36. **Химический состав отечественных хладостойких сталей, % (по массе)**

Марка стали	C	Mn	Si	S (не более)	P (не более)	Cr	Ni	Nb	ГОСТ или ТУ
ОН6	0,10	0,30—0,60	0,15—0,35	0,015	0,02	—	6,5—8,0	0,02—0,05	ТУ 14-1-2236—77
ОН9	0,10	0,30—0,60	0,15—0,35	0,015	0,02	—	8,5—10,0	—	ТУ 14-1-2236—77
10Х14Г14Н4Т *	0,10	13,0—15,0	Не более 0,8	0,020	0,035	13,0—15,0	2,8—4,5	—	ГОСТ 5632—72 * ТУ 14-1-3601—83

* В сталь вводится 0,02—0,05 % Al, 0,001 % Zr, 0,05 % РЗМ, не более 0,003 % B, титан в количестве 5 · (C — 0,02... 0,6)%, где C — содержание углерода.

Таблица 1.37. **Механические свойства отечественных хладостойких сталей**

Марка стали	Толщина листа, мм	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	*KCU* при −196 °С, Дж/см²	Изгиб до параллельности сторон
		не менее				
ОН6	10—30	470	637	20	29,4	$d = 2a$
ОН9	10—30	549	686	15	49	$d = 2a$
10Х14Г14Н4Т	8—20	245	588	40	147	—

дением в никелевый сплав значительных количеств хрома (до 20 %), молибдена (до 10 %), ниобия (до 4 %), вольфрама и других элементов в различных сочетаниях.

В отечественной практике проектирования металлоконструкций для криогенной техники сталь марки ОН6 используется до температуры хранения жидкого этилена (—104 °С), а сталь марки ОН9 — до температуры хранения жидкого природного газа (—165 °С). За рубежом стали указанных типов применяются до более низких температур.

Для металлоконструкций, эксплуатируемых при более низких температурах, в частности предназначенных для внутренних оболочек изотермических резервуаров хранилищ жидкого кислорода и жидкого азота, используются аустенитные стали. Химический состав и механические свойства одной из них — экономно-легированной стали марки 10Х14Г14Н4Т — приведены в табл. 1.36 и 1.37. К сожалению, прочностные характеристики этих материалов значительно ниже, чем у никелевых сталей, что предопределяет их увеличенный расход.

1.1.9. Выбор стали для сварных строительных конструкций

Согласно СНиП II-23—81* для сварных строительных конструкций зданий и сооружений стали выбираются в соответствии с их служебными свойствами, ответственностью конструкций и условиями эксплуатации. В зависимости от степени ответственности и условий эксплуатации все конструкции зданий и сооружений разделяются на четыре группы.

Группа 1. Сварные конструкции либо их элементы, работающие в особо тяжелых условиях или подвергающиеся непосредственному воздействию динамических, вибрационных или подвижных нагрузок: подкрановые балки; балки рабочих площадок; элементы конструкций бункерных и разгрузочных эстакад, непосредственно воспринимающие нагрузку от подвижных составов; фасонки ферм; пролетные строения транспортных галерей; сварные специальные опоры больших переходов линий электропередачи высотой более 60 м; элементы оттяжек мачт и оттяжечных узлов; балки под краны гидротехнических сооружений и т. п.

Группа 2. Сварные конструкции либо их элементы, работающие при статической нагрузке: фермы; ригели рам; балки перекрытий и покрытий; косоуры лестниц; опоры высоковольтных линий, за исключением сварных опор больших переходов; опоры ошиновки открытых распределительных устройств подстанций; опоры под их выключатели; опоры транспортерных галерей; элементы контактных сетей транспорта; прожекторные мачты; элементы комбинированных опор антенных сооружений; трубопроводы ГЭС и насосных станций; облицовки водоводов; закладные части затворов и другие растянутые, растянуто-изгибаемые и изгибаемые элементы. Конструкции и их элементы группы 1 при отсутствии сварных соединений и балки подвесных путей из двутавров по ГОСТ 19425—74* и ТУ 14-2-427—80 при наличии сварных монтажных соединений.

Группа 3. Сварные конструкции либо их элементы, работающие при статической нагрузке: колонны; стойки; опорные плиты; элементы настила перекрытий; конструкции, поддерживающие технологическое оборудование; вертикальные связи по колоннам с напряжением в связях свыше $0{,}4R_y$; анкерные, поддерживающие и фиксирующие конструкции на опорах и поперечинах контактной сети; опоры под оборудование открытых распределительных устройств, кроме опор под выключатели; элементы стволов и башен антенных сооружений; колонны бетоновозных эстакад; прогоны покрытий и другие сжатые и сжато-изгибаемые элементы. Конструкции и их элементы группы 2 при отсутствии сварных соединений.

Группа 4. Вспомогательные конструкции зданий и сооружений: связи, кроме указанных в группе 3; элементы фахверка; лестницы; грапы; площадки; ограждения; металлоконструкции кабельных каналов; второстепенные элементы сооружений и т. п., а также конструкции и их элементы группы 3 при отсутствии сварных соединений.

Для каждой группы конструкций в табл. 50 СНиП II-23—81* регламентируется набор марок стали разного уровня прочности, разной толщины проката. Требование по хладостойкости (категория по нормируемым показателям ударной вязкости) каждой из этих сталей зависит от расчетной температуры (средней за наиболее холодную пятидневку) климатического района, в котором возводятся конструкции. В табл. 1.38 приводится перечень марок сортового, фасонного, широкополосного и листового проката стали, используемого при проектировании металлоконструкций зданий и сооружений общего назначения институтом ЦНИИпроектстальконструкция.

В табл. 1.39 дан аналогичный примерный перечень для проката, поставляемого по ГОСТ 27772—88.

Таблица 1.38. **Марки стали сортового, фасонного, широкополосного и листового проката для стальных конструкций зданий и сооружений**

Группа конструкций	Марка стали	Группа прочности	Толщина проката, мм	Категория стали для климатического района строительства (расчетная температура, °С)			ГОСТ или ТУ
				$-30 \geqslant t; -30 > t \geqslant -40$	$-40 > t \geqslant -50$	$-50 > t \geqslant -65$	
1	Ст3сп (толщиной до 25 мм)	1	5—30	5	—	—	ТУ 14-1-3023—80
	Ст3Гпс	2	5—20	5	—	—	ТУ 14-1-3023—80
	09Г2С	1	5—30	12	13	15	ТУ 14-1-3023—80
		2	5—20	12	13	15	ТУ 14-1-3023—80
		Нет	21—32	12	13	15	ГОСТ 19281(2)—73
	14Г2АФ	»	5—50	12	13	15	ГОСТ 19281(2)—73
	16Г2АФ	»	5—50	12	13	15	ГОСТ 19281(2)—73
	12ХГДАФ	»	12—80	+	+	+	ГОСТ 19282—73
	12ГН2МФАЮ	»	16—14	+	+	+	ТУ 14-1-2881—80
							ТУ 14-1-1772—76

Продолжение табл. 1.38

Группа конструкций	Марка стали	Группа прочности	Толщина проката, мм	Категория стали для климатического района строительства (расчетная температура, °С)			ГОСТ или ТУ
				$-30 \geqslant t$; $-30 > t \geqslant -40$	$-40 > t \geqslant -50$	$-50 > t \geqslant -65$	
2	Ст3пс (для районов с -30 °С $> t \geqslant -40$ °С, толщиной не более 10 мм)	1	5—25	6	—	—	ТУ 14-1-3023—80
		2	5—20	6	—	—	ТУ 14-1-3023—80
	Ст3Гпс	1	11—30	5	—	—	ТУ 14-1-3023—80
		2	11—30	5	—	—	ТУ 14-1-3023—80
	09Г2С	1	5—30	6	12	15	ТУ 14-1-3023—80
		2	5—20	6	12	15	ТУ 14-1-3023—80
		Нет	21—60	6	12	15	ГОСТ 19281(2)—73
	10ХНДП	»	2—12	6	—	—	ГОСТ 19281(2)—73 ТУ 14-1-1217—75
	12ХГДАФ	»	12—50	+	+	+	ТУ 14-1-2881—80
	14Г2АФ	»	5—50	6	13	15	ГОСТ 19282—73
	16Г2АФ	»	5—50	6	13	15	ГОСТ 19282—73
	12Г2СМФ	»	10—36	+	—	—	ТУ 14-1-1308—75
	12ГН2МФАЮ	»	16—40	—	+	+	ТУ 14-1-1772—76
3	Ст3кп (кроме районов с -30 °С $> t \geqslant -40$ °С)	»	4—40	2	—	—	ГОСТ 380—71*
	Ст3пс	1	5—25	6	—	—	ТУ 14-1-3023—80
		2	5—20	6	—	—	ТУ 14-1-3023—80
	09Г2С	1	5—30	6	6	12	ТУ 14-1-3023—80
		2	5—20	6	6	12	ТУ 14-1-3023—80
		Нет	21—160	6	6	12	ГОСТ 19281(2)—73
	10ХНДП	»	2—12	6	6	—	ГОСТ 19281—89 ТУ 14-1-1217—75
	12ХГДАФ	»	12—50	+	+	+	ТУ 14-1-2881—80
	14Г2АФ	»	5—50	6	9	9	ГОСТ 19282—73
	16Г2АФ	»	5—50	6	9	9	ГОСТ 19282—73
	12Г2СМФ	»	10—36	+	—	—	ТУ 14-1-1308—75
	12ГН2МФАЮ	»	16—40	—	+	+	ТУ 14-1-1772—76
4	Ст3кп	»	5—40	2	—	—	ГОСТ 380—71*
	Ст3Гпс	1	5—30	—	5	5	ТУ 14-1-3023—80
		2	5—20	—	5	5	ТУ 14-1-3023—80

Примечание. Знак «+» означает, что категорию стали и требования к ней указывать в проекте не следует; знак «—» означает, что данную марку стали в указанном климатическом районе применять не следует.

Таблица 1.39. **Стали для стальных конструкций зданий и сооружений по ГОСТ 27772—88**

Группа конструкций	Климатический район строительства (расчетная температура, °С)	С235	С245, С275	С255, С285	С345, С375	С345К	С390, С390К	С440	С590	С590К
1	$-30 > t \geqslant -40$:									
	$t \geqslant -30$	—	—	+	+ (3)	—	+	+	—	+ (а)
	$-40 > t \geqslant -50$	—	—	—	+ (3)	—	+	+	—	+ (а)
	$-50 > t \geqslant -65$	—	—	—	+ (4)	—	+	+	—	+ (а)
2	$-30 > t \geqslant -40$:									
	$t \geqslant -30$	—	+	+	+ (1)	+	+	+	+	—
	$-40 > t \geqslant -50$	—	—	—	+ (3)	—	+	+	—	+
	$-50 > t \geqslant -65$	—	—	—	+ (4)	—	+	+	—	+
3	$-30 > t \geqslant -40$:									
	$t \geqslant -30$	+ (б)	+	+	+ (1)	+	+	+	+	—
	$-40 > t \geqslant -50$	—	—	+	+ (1)	+	+	+	—	—
	$-50 > t \geqslant -65$	—	—	+	+ (3)	—	+	+	—	—
4	$-30 > t \geqslant -40$:									
	$t \geqslant -30$	+	—	—	—	—	—	—	—	—
	$-40 > t \geqslant -50$	—	—	+	—	—	—	—	—	—
	$-50 > t \geqslant -65$	—	—	+	—	—	—	—	—	—

Примечание. Знак «+» означает, что данная сталь применяется; цифра в скобках после знака «+» означает категорию стали; знак «—» означает, что данная сталь не применяется; а — для применения стали требуется расчет на выносливость и технико-экономическое обоснование; б — кроме опор высоковольтных линий и открытых распределительных устройств.

Для конструкций специальных сооружений — комплекса доменных цехов, специальных резервуаров и газгольдеров, морских стационарных платформ, железнодорожных и автодорожных мостов и т. п.— имеются ведомственные рекомендации по выбору марок стали.

1.2. АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Алюминиевые свариваемые сплавы имеют меньшую плотность, чем стали, благодаря чему они нашли широкое применение в строительстве. Они делятся на деформируемые и литейные.

Для изготовления несущих и ограждающих конструкций используются главным образом деформируемые сплавы, которые в зависимости от способа легирования и состояния разделяются на термически упрочняемые и термически не упрочняемые.

Механические свойства термически не упрочняемых деформируемых сплавов определяются легированием и степенью холодной деформации (нагартовки). Механические свойства термически упрочняемых деформируемых сплавов зависят не только от степени легирования, но и от условий и режимов термической обработки (закалка, естественное и искусственное старение).

Таблица 1.40. Химический состав алюминиевых сплавов по ГОСТ 4784—74, % (по массе)

Марка сплава	Mg	Mn	Si	Zn	Cu	Zr	Fe	Cr	Ti	Ce
АД1	—	—	0,3	—	—	—	0,3	0,05	0,15	—
АМц	0,2	1,0—1,6	0,6	0,1	—	—	0,7	—	0,2	—
АМг2	1,8—2,6	0,2—0,6	0,4	0,2	0,05	—	0,4	0,1	0,1	—
АД31	0,4—0,9	0,1	0,3—0,7	0,2	—	—	0,5	0,1	0,15	—
1915	1,3—1,8	0,2—0,6	0,3	3,4—4,0	0,08—0,2	0,15—0,22	0,4	0,1	0,1	—
1925	1,3—1,8	0,2—0,7	0,7	3,5—4,0	Не менее 0,2	0,1—0,2	0,7	Не менее 0,8	Не менее 0,1	—
1935 *	0,6—1,1	0,2—0,5	0,3	3,6—4,1	То же	0,15—0,22	0,4	Не менее 0,2	—	0,0001—0,005

* По ТУ 19-346—77.

Таблица 1.41. Механические свойства алюминиевых сплавов

Марка сплава	Вид полуфабриката	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	ψ, %	$\tau_{ср}$, МПа	σ_{-1}, МПа
АД1М	Прессованные и катаные	78,4	29,4	35	80	55	35
АМцМ	Катаные	147	98	6	20	70	55
АМг2М	»	186	88	23	30	125	110
АМг2Н2	»	245	205	8	—	140	125
АД31Т	Прессованные	167	78,4	20	—	—	70
АД31Т1	»	235	196	10	—	160	90
1915	»	314	196	10	—	—	—
1915Т	»	343	216	10	—	—	—
1925	»	343	196	9	—	—	—
1925Т	»	343	196	10	—	—	—
1935	»	245	157	10	—	—	—
1935Т1	Катаные	216	127	10	—	—	—

Таблица 1.42. Расчетные сопротивления сварных алюминиевых соединений

Сварное соединение	Напряженное состояние	Обозначение	Расчетное сопротивление, МПа, алюминия в околошовной зоне								
			АД1М	АМцМ	АМг2М, АМг2Н2	АД31Т, АД31Т4	АД31Т5	АД31Т1	1935Т	1915	1915Т
			при сварке с применением электродной или присадочной проволоки								
			Св-Al	Св-АМг3		Св-AlMг3		1557			
Встык и внахлестку лобовыми швами	Растяжение, сжатие и изгиб	R_{wz}	25	40	65	55	65	80	115/120	140	511
	Сдвиг	R_{wzs}	15	25	40	35	40	50	80	90	105
Внахлестку фланговыми швами	Растяжение, сжатие и изгиб	R_z	25	40	65	50	60*/75*	80*/105*	100*/105*	130*/140*	140*/155*

Примечания: 1. Значения со звездочкой — для соединений внахлестку из профильных элементов. 2. Расчетное сопротивление R_w алюминия марки 1915Т указано для профилей толщиной 5—12 мм. Для профилей толщиной 4 мм при сварке вольфрамовым электродом R_w = 165 МПа. 3. Над чертой указаны расчетные сопротивления при сварке алюминия вольфрамовым электродом, под чертой — плавящимся электродом.

Таблица 1.43. Расчетные сопротивления сварных алюминиевых соединений, МПа

Сварное соединение, шов	Напряженное состояние	Обозначение	Марка алюминия: АД31Т, АД31Т4	АД31Т5	АД31Т1	1935Т	1915	1915Т при толщине металла, мм: 4	1915Т при толщине металла, мм: 5—12
			Марка электродной или присадочной проволоки: Св-АМг3, 1557					1557	
Встык	Сжатие, растяжение, изгиб при сварке электродом: плавящимся (автоматическая и полуавтоматическая сварка)	R_w	55	65	80	120	140	—	155
	вольфрамовым (ручная и механизированная сварка)	»	55	65	80	115	140	155	155
	Сдвиг	R_{ws}	35	40	50	80	90	110	105
Угловые швы (фланговые и лобовые)	Срез	R_{wf}	45	45	45	80	110	110	110

Примечания: 1. Расчетные сопротивления сварных соединений алюминия марки 1915Т указаны для прессованных профилей. 2. Расчетные сопротивления сварных соединений термически упрочняемого алюминия могут быть повышены повторной термической обработкой (после сварки соединения), при этом для алюминия системы Al — Mg — Si следует принимать $R_w = 0,9R$, для алюминия системы Al — Zn — Mg $R_w = R$. 3. В сварных нахлесточных соединениях из алюминия марок АД31Т, АД31Т1, АД31Т4 и АД31Т5 применять лобовые швы не допускается.

К термически не упрочняемым деформируемым свариваемым сплавам, применяемым в строительстве, относятся сплавы марок АД1М (1013), АМцМ (1400), АМг2М (1520), к термически упрочняемым — АД31Т (1310), 1915Т, 1925, 1935.

Алюминиевые деформируемые сплавы в соответствии с ГОСТ 21631—76 обозначаются в зависимости от способов изготовления: неплакированные — маркой сплава без дополнительной маркировки, плакированные — буквой А, если плакировка нормальная, буквой Б, если плакировка технологическая, буквой У, если плакировка утолщенная. В зависимости от состояния поставки материала сплавы маркируются: буквой М — отожженные, Н2 — полунагартованные; Н — нагартованные; Т — закаленные и естественно состаренные; Т1 — закаленные и искусственно состаренные. Материалы без термической обработки не имеют дополнительного обозначения.

В табл. 1.40 приведен химический состав наиболее распространенных в строительных алюминиевых конструкциях свариваемых деформируемых сплавов.

При выборе алюминиевых сплавов для строительных сварных конструкций следует учитывать их технологичность в процессе производства и механические свойства (табл. 1.41) — свариваемость, коррозионную стойкость — и экономическую целесообразность их применения. Меньшая в 2,5 раза, чем у стали, плотность алюминия, а также простота получения геометрической формы алюминиевых профилей любой сложности позволяют достичь эффективной удельной отдачи.

Высокая коррозионная стойкость алюминиевых сплавов, прекрасный декоративный вид изделий обеспечивают их широкое применение в строительстве как для несущих, так и для ограждающих конструкций в интерьере и экстерьере зданий и сооружений.

Применение алюминиевых сплавов позволяет создавать элементы зданий высокой заводской готовности, что обеспечивает экономическую целесообразность их применения в труднодоступных районах.

Расчетные сопротивления сварных соединений для расчетных температур наружного воздуха от 50 до —65 °С приведены в табл. 1.42, 1.43 (по СНиП 2.03.06—85).

1.2.1. Алюминиевые деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой

К рассматриваемым сплавам относятся сплавы с марганцем (АМц) и магнием (АМг). Сплав АМц представляет собой твердый раствор марганца в алюминии, в котором имеются также частицы соединений Al_6Mn. Сплав АМг даже после медленного охлаждения не содержит избыточных фаз и состоит только из α-твердого раствора. Эти сплавы применяются в отожженном состоянии и после наклепа.

Сплавы легко обрабатываются давлением (штамповка, гибка, вытяжка и т. д.), хорошо свариваются контактной и аргонодуговой сваркой, обладают высокой коррозионной стойкостью. Они применяются для изготовления витражей, перегородок, дверей, оконных рам, подвесных потолков, кровельных и стеновых панелей.

1.2.2. Алюминиевые деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой

Для упрочнения алюминиевых сплавов применяют закалку и старение. Закалка алюминиевых сплавов заключается в нагреве сплава до температуры, при которой избыточные интерметаллидные фазы полностью или большей частью растворяются в алюминии, выдержке при этой температуре и быстром охлаждении до комнатной температуры для фиксации пересыщенного твердого раствора. Охлаждение проводят в холодной воде. После закалки сплавы обладают высокой пластичностью и невысокой прочностью.

Старение алюминиевых сплавов заключается в выдержке сплава при комнатной температуре в течение нескольких (обычно четверо) суток (естественное старение) или 10—24 ч при повышенной температуре (искусственное старение). В процессе старения происходит распад пересыщенного твердого раствора, сопровождающийся упрочнением сплава. Эффект упрочнения при закалке и старении зависит от природы фазы упрочнителя, размеров ее частиц, количества фазы и ее распределения.

Для снятия наклепа и получения мелкого зерна алюминиевые сплавы подвергают рекристаллизационному отжигу. У большинства алюминиевых сплавов температура рекристаллизационного отжига в зависимости от состава сплава колеблется от 350 до 500 °С, а выдержка — от 0,5 до 2 ч. После отжига сплавы, как правило, имеют низкое временное сопротивление, хорошую пластичность и высокую сопротивляемость коррозии под напряжением.

В настоящее время в различных странах под различными наименованиями широко применяются сплавы системы Al — Mg — Si. В строительстве широко используется сплав этой системы АД31 как конструкционный и декоративный материал. Сплав обладает высокой пластичностью, хорошей технологичностью, коррозионной стойкостью, способностью подвергаться цветному анодированию, эмалированию и эматалированию. Высокую пластичность этот сплав имеет в отожженном, свежезакаленном и естественно состаренном состояниях, что позволяет подвергать полуфабрикаты штамповке, глубокой вытяжке и другим операциям со значительными степенями деформации. При этом материал в процессе деформации упрочняется незначительно.

Сплав АД31 удовлетворительно сваривается аргонодуговой, шовной контактной и точечной сваркой. Его высокая пластичность при температуре обработки давлением 450—500 °С позволяет прессовать профили сложной конфигурации, в том числе и тонкостенные полые. Тонкие профили (толщиной до 10 мм) из сплава АД31 закаливаются на прессе в процессе естественного охлаждения благодаря высокой скорости деформации (до 60 мм/мин) и высокой температуре прессования (до 500 °С). Профили, закаленные на прессе, имеют светлую блестящую поверхность.

Коррозионная стойкость сплава АД31 высокая.

Сплавы системы Al — Zn — Mg 1915, 1925, 1935 могут успешно конкурировать со сплавом АД31, поскольку они при высокой технологичности обладают более высокой прочностью.

Сплав 1915 обладает высокой технологичностью, не требует сложной термообработки, имеет достаточно высокую прочность (до 350 МПа), хорошие свариваемость и коррозионную стойкость.

Сплав 1925— это модификация сплава 1915, но для удешевления производства и возможности использования отходов в сплаве 1925 допущено более высокое содержание примесей железа, кремния и меди, чем в сплаве 1915, а хром исключен из числа легирующих элементов. Главное отличие сплава 1925 от сплава 1915 заключается в том, что высокое содержание примесей в сплаве, главным образом меди, ухудшает свариваемость, поэтому сплав 1925 рекомендован для несварных конструкций.

Сварные конструкции из сплава 1915 могут быть изготовлены по следующим технологическим схемам: 1) исходные полуфабрикаты подвергают закалке и естественному старению, после сварки конструкцию термообработке не подвергают, т. е. она эксплуатируется в естественно состаренном состоянии (1915Т); 2) исходные полуфабрикаты подвергают закалке и искусственному старению; после сварки конструкцию термообработке не подвергают, т. е. сварные швы и околошовная зона в конструкции остаются в естественно состаренном состоянии; 3) исходные полуфабрикаты подвергают закалке и естественному старению; после сварки всю конструкцию подвергают искусственному старению (1915Т1). По первой схеме изготовляется большинство строительных несущих конструкций: выставочные павильоны, спортивные сооружения, киноконцертные залы, теплицы. Сварные конструкции, изготовленные по второй схеме, меньше подвержены общей коррозии, но требуют защиты шва и околошовной зоны от общей коррозии. Конструкции, изготовленные по третьей схеме, наиболее устойчивы против общей коррозии, они могут эксплуатироваться без специальной защиты в агрессивных средах, но также имеют низкие значения прочности сварных соединений. Эта технология очень сложна в производстве и применяется практически лишь для сборно-разборных сооружений весьма ограниченного объема.

Сплав 1935 разработан как более технологичный, чем сплавы 1915 и 1925, и более прочный, чем АД31. Основное отличие его от сплава 1915 состоит в значительно более низком содержании магния (0,6—1,1 % в сплаве 1935 и 1,3—1,8 % в сплаве 1915), а следовательно, и в более низком суммарном содержании цинка и магния (до 5,2 % против 5,8 % для сплава 1915, см. табл. 1.40). Сплав очень устойчив против коррозионного растрескивания, обладает высокими пластичностью и вязкостью при комнатной и пониженных температурах, уступая по прочности сплаву 1915, но превосходя АД31 (220—250 МПа). Сплав не чувствителен к коррозии под напряжением; по общей коррозионной стойкости сплав близок к сплаву 1915. Профили из сплава 1935 имеют поверхность высокого качества как после прессования, так и после бесцветного и цветного анодирования.

Алюминиевые сплавы в строительных конструкциях в большинстве случаев применяются как ограждающие, несут большую архитектурную нагрузку, и поэтому их внешний вид должен отвечать самым высоким требованиям.

Наиболее распространенный способ декоративного покрытия алюминиевых сплавов — анодирование, возможности которого очень широки: от бесцветного до черного цвета путем наполнения анодно-оксидного покрытия органическими или неорганическими красителями.

1.3. АРМАТУРНЫЕ СТАЛИ

Для армирования железобетонных конструкций применяют стержневую и проволочную арматурную сталь, отвечающую требованиям Государственных стандартов и технических условий. В зависимости от механических свойств и технологии изготовления арматура делится на классы, обозначаемые цифрами I—VI и буквами: стержневая арматура — А, проволока — В и канаты — К.

Для обеспечения максимальной экономии металла целесообразно применять арматуру с наиболее высокими допускаемыми по нормам проектирования железобетонных конструкций механическими свойствами. Класс арматурной стали выбирают в зависимости от типов конструкций, условий их изготовления, возведения и эксплуатации. Индустриализация арматурных работ в заводских условиях осуществляется при широком применении сварных сеток, плоских и объемных сварных каркасов, так называемых закладных изделий. При монтаже применяют механизированные способы сварки стальных элементов — стержневой арматуры или соединенных между собой элементов закладных изделий. Все виды отечественной стержневой и проволочной стали для ненапрягаемой арматуры свариваются; металлургическая промышленность выпускает ограниченно свариваемую, как правило высокопрочную, арматуру, используемую в предварительно напряженных железобетонных конструкциях.

В заводских условиях при изготовлении арматурных сеток и каркасов, сварке встык отдельных стержней следует применять преимущественно контактную точечную и стыковую сварку, а при изготовлении закладных деталей — механизированную сварку под флюсом и контактную рельефную. При монтаже следует максимально применять сварку в ванне под флюсом и порошковыми проволоками.

Стержневая арматурная сталь делится на классы A-I—A-VI. Принятые обозначения классов дополняются индексами для указания способа изготовления, особых свойств или назначения арматуры. Так, термомеханически и термически обработанную стержневую арматурную сталь обозначают символом Ат, сталь специального назначения («северного исполнения») — Ас, термомеханически и термически обработанную свариваемую сталь обозначают индексом С (например, Ат-IVC), а такую же сталь с повышенной стойкостью против коррозионного растрескивания под напряжением — индексом К (например, Ат-IVK). Поскольку промышленность выпускает высокопрочную стержневую арматуру диаметром более 22 мм в ограниченных количествах, строители используют в предварительно напряженных конструкциях арматуру класса A-III, упрочненную вытяжкой. Опе-

рацию вытяжки осуществляют на заводах сборного железобетона, такую арматуру обозначают символом А-IIIв.

Горячекатаную стержневую арматуру поставляют по ГОСТ 5781—82, термомеханически упрочненную стержневую арматуру — по ГОСТ 10884—81.

Сталь класса А-I изготовляют круглого сечения с гладкой поверхностью, стержневая арматура остальных классов имеет периодический профиль. Номинальные диаметры стержней периодического профиля соответствуют номинальным диаметрам равновеликих по площади поперечного сечения круглых гладких стержней. Геометрические характеристики и линейная плотность стержней приведены в табл. 1.44.

Арматурная сталь периодического профиля представляет собой круглые стержни с двумя продольными ребрами и поперечными выступами, идущими по трехзаходной винтовой линии.

Стержни из арматурной стали класса А-II имеют профиль, показанный на рис. 1.23, *а*, стержни из стали остальных классов — профиль, показанный на рис. 1.23, *б*. Арматуру классов А-I и А-II диаметром до 12 мм, класса А-III диаметром до 10 мм включительно и класса Ат-IIIС диаметром 6—8 мм поставляют в мотках, остальную арматурную сталь — в прутках. Прутки изготовляют длиной от 6 до 12 м, мерной и немерной длины. Термомеханически упрочненную арматурную сталь поставляют в прутках мерной длины от 5,3 до 13,5 м. По соглашению сторон возможна поставка стержней длиной до 26 м.

Стержневую арматурную сталь изготовляют из углеродистой и низколегированной сталей (табл. 1.45). Марки углеродистой стали обыкновенного качества определены в ГОСТ 380—88, низколегированной — по ГОСТ 5781—82.

Механические свойства арматурной стали приведены в табл. 1.46. На поверхности стержней, включая поверхность ребер и выступов, не должно быть трещин, раковин, плен и закатов.

Правила приемки и методы испытания арматуры установлены соответствующими стандартами и техническими условиями. Испытание на растяжение проводят по ГОСТ 12004—81, а испытание на изгиб — по ГОСТ 14019—80

Таблица 1.44. **Геометрические характеристики и линейная плотность стержней**

Номинальный диаметр (номер профиля), мм	Площадь поперечного сечения стержня, мм²	Линейная плотность стержня, кг/м	
		теоретическая	предельное отклонение, %
5,5	23,7	0,185	+9,0
6	28,3	0,222	—7,0
8	50,3	0,395	
10	78,5	0,617	+5,0
12	113	0,888	—6,0
14	154	1,21	
16	201	1,58	+3,0
18	254	2,0	—5,0
20	314	2,47	
22	380	2,98	
25	491	3,85	
28	616	4,83	
32	804	6,31	+3,0
36	1018	7,99	—4,0
40	1257	9,87	
45	1500	12,48	
50	1963	15,41	+2,0
55	2376	18,65	—4,0
60	2827	22,19	
70	3848	30,21	
80	5027	39,46	

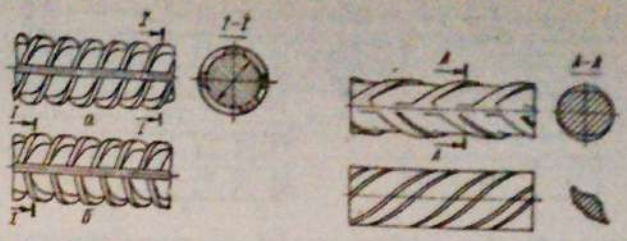


Рис. 1.23. Периодические профили арматурной стали класса А-II (*а*) и арматурной стали остальных классов (*б*).

Рис. 1.24. Серповидный профиль арматурной стали.

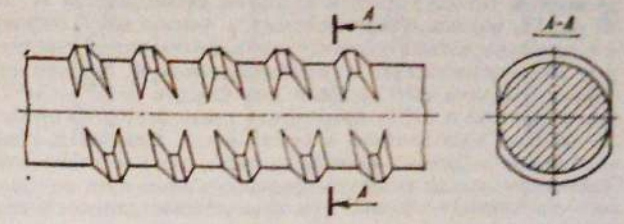


Рис. 1.25. Винтовой профиль арматурной стали.

Стержневую арматуру в виде прутков поставляют в связках массой до 15 т и в мотках массой до 3 т.

Начато освоение производства стержневой арматуры с маркировкой по классам в процессе проката. Разрабатывается новый профиль для стержневой арматуры с серповидными поперечными ребрами (рис. 1.24).

Металлургическая промышленность осваивает производство арматурной стали винтового профиля, стержни которой соединяют резьбовыми муфтами. Это обеспечивается нормированием с высокой точностью совмещения двухсторонних выступов на арматуре и размеров их шага (рис. 1.25).

Таблица 1.45. **Номенклатура и марки стали стержневой арматуры**

Класс стали	Марка стали	Диаметр стержней, мм
А-I	Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп	5,5—40
	Ст3Гпс	6—18
А-II	Ст5сп, Ст5пс	10—40
	18Г2С	40—80
Ас-II	10 ГТ	10—32 (36—40)
А-III	35ГС, 25Г2С	6—40
	32Г2Рпс	6—22
Ат-IIIС	Ст5сп, Ст5пс	6—40
Ат-IV	80С	10—18 (6—8)
	20ХГ2Ц	10—32 (36—40)
Ат-IV	20ГС	10—40
Ат-IVС	25Г2С, 35ГС, 28С, 27ГС	10—40
Ат-IVК	10ГС2, 08Г2С, 25С2Р	10—32 (6—8)
А-V	23Х2Г2Т	10—32 (36—40)
Ат-V	20ГС, 20ГС2, 10ГС2,	10—32
	08Г2С, 25Г2С, 28С	
	35ГС, 25С2Р, 20ГС2	18—32
Ат-VК	35ГС, 25С2Р	18—32
Ат-VСК	20ХГС2	10—32
А-VI	22Х2Г2АЮ, 22Х2Г2Р,	10—22
	20Х2Г2СР	
А-VIК	20ХГС2	10—32
А-VII	30ХС2	10—32

Примечание. В скобках указаны размеры арматуры, которая изготовляется по согласованию изготовителя с потребителем.

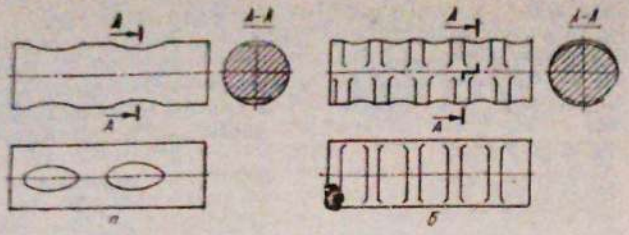


Рис. 1.26. Периодические профили арматурной низкоуглеродистой проволоки класса В500 (*а*), высокопрочной арматурной проволоки периодического профиля (*б*).

Арматурная сталь винтового профиля выпускается по временным технологическим условиям диаметрами от 10 до 40 мм. По механическим свойствам и химическому составу эта арматура должна соответствовать действующим стандартам на горячекатаную и термомеханическую арматурную сталь периодического профиля для классов А-III — А-VII (см. табл. 1.45 и 1.46). Арматурная сталь винтового профиля должна поставляться в комплексе с соединительными элементами (муфтами, анкерными гайками и контргайками). Применение такой арматуры позволяет отказаться от сварки, что особенно важно при производстве длинномерных предварительно напряженных конструкций с высокопрочной стержневой арматурой.

Арматурную проволоку диаметром от 3 до 8 мм изготовляют способом холодного волочения и подразделяют по форме поперечного сечения на гладкую и периодического профиля (рис. 1.26), а также по классам прочности: 400, 600, 1200, 1300, 1400, 1500. Класс прочности соответствует гарантированному значению условного предела текучести проволоки (в мегапаскалях) с доверительной вероятностью 0,95. В условных обозначениях гладкая проволока обозначается буквой В, проволока периодического профиля — Вр. Например, проволока гладкая диаметром 5 мм класса прочности 1400 обозначается как 5-В1400, периодического профиля — как 5-Вр1400.

Таблица 1.46. **Характеристики стержневой арматурной стали**

Класс стали	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	$\delta_в$, %	$\delta_р$, %	Изгиб в холодном состоянии (*c* — толщина оправки, *d* — диаметр стержня)
	не менее				
A-I	235	373	25	—	180°, $c=0,5d$
A-II	294	490	19	—	180°, $c=3d$
Ac-II	294	441	25	—	180°, $c=1d$
A-III	392	590	14	—	90°, $c=3d$
Ат-IIIС	440	590	14—15	—	90°, $c=3d$
A-IV	590	883	6	2	45°, $c=5d$
Ат-IV	590	780	11	3	45°, $c=5d$
Ат-IVС	590	780	11	3	45°, $c=5d$
Ат-IVК	590	780	11	3	45°, $c=5d$
A-V	785	1030	7	2	45°, $c=5d$
Ат-V	785	980	7—8	2	45°, $c=5d$
Ат-VК	785	980	7—8	2	45°, $c=5d$
A-VI	980	1230	6	2	45°, $c=5d$
Ат-VI	980	1180—1230	6—7	2	45°, $c=5d$
Ат-VIК	980	1180—1230	6—7	2	45°, $c=5d$
Ат-VII	1175	1370—1420	5—6	1,5	45°, $c=5d$

Примечание. Концы стержней из стали классов Ат-IIIС и выше окрашиваются масляной краской: Ат-IIIС — белой и синей; А-IV — красной, Ат-IV — зеленой, Ат-IVС — зеленой и белой, Ат-IVК — зеленой и красной, А-V — красной и зеленой, Ат-V — синей, Ат-VК — синей и красной, А-VI — красной и синей, Ат-VI — желтой, Ат-VIК — желтой и красной, Ат-VII — черной.

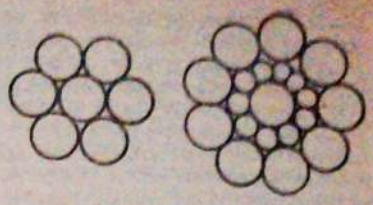


Рис. 1.27. Поперечное сечение арматурных канатов.

В качестве ненапрягаемой арматуры применяют проволоку класса Вр400, которую изготовляют из низкоуглеродистой стали по ГОСТ 380—88, а для напрягаемой арматуры — проволоку гладкую и периодического профиля классов прочности 1200, 1300, 1400 и 1500, которую производят из углеродистой конструкционной стали марок 65—85 по ГОСТ 14959—79. Проволоку класса Вр600, изготовляемую из стали марок Ст3кп и Ст5пс с термической обработкой, можно применять в качестве ненапрягаемой и напрягаемой арматуры. Геометрические характеристики и линейная плотность арматурной проволоки приведены в табл. 1.47.

Марку стали для арматурной проволоки завод-изготовитель выбирает таким образом, чтобы обеспечить заданные стандартами и техническими условиями механические свойства (табл. 1.48).

Высокопрочную арматурную проволоку в процессе изготовления подвергают низкотемпературному отпуску, в результате чего повышаются ее упругие свойства; развернутая из мотка и свободно уложенная проволока должна сохранять нормируемую прямолинейность.

Метизная промышленность освоила производство следующих новых видов арматурной проволоки: стабилизированной гладкой высокопрочной проволоки диаметром 5 мм с повышенной релаксационной стойкостью; низкоуглеродистой проволоки периодического профиля диаметром 4—6 мм повышенной прочности класса Вр600.

Арматурные канаты (рис. 1.27) изготовляют из высокопрочной холоднотянутой проволоки. Для наилучшего использования прочностных свойств проволоки в канате шаг свивки принимают максимальным, обеспечивающим нераскручиваемость каната, обычно в пределах 10—16 диаметров каната. Механические свойства арматурных канатов приведены в табл. 1.49. В процессе производства канаты К7 и К19 подвергают низкотемпературному отпуску.

Арматурную проволоку и арматурные канаты поставляют в несмазанном виде. Канаты поставляют на барабанах или в мотках отрезками длиной не менее 1000 м, проволоку — в мотках массой 500—1500 кг; допускается изготовление проволоки в мотках массой 20—100 кг. Каждый моток должен состоять из одного отрезка проволоки.

Проволоку и арматурные канаты испытывают на растяжение по ГОСТ 12004—81, а проволоку на перегиб — по ГОСТ 1579—80.

Таблица 1.47. **Геометрические характеристики и линейная плотность арматурной проволоки**

Номинальный диаметр (номер профиля), мм	Расчетная площадь поперечного сечения, мм²	Линейная плотность проволоки, кг/м
3	7,1	0,057
4	12,6	0,099
5	19,6	0,154
6	28,3	0,222
7	38,5	0,302
8	50,3	0,395

Примечание. Линейная плотность проволоки периодического профиля класса Вр400 не должна превышать следующих значений: диаметром 3 мм — 0,052 кг, диаметром 4 мм — 0,092 кг и 5 мм — 0,144 кг.

Таблица 1.48. **Механические свойства арматурной проволоки**

Класс	ГОСТ, ТУ	Класс прочности	Номинальный диаметр, мм	Разрывное усилие, кН	Усилие при условном пределе текучести $P_{0,2}$, кН	Относительное удлинение после разрыва на расчетной длине 100 мм, %	Число перегибов на 180°	Диаметр оправки при испытании на изгиб на 180° в холодном состоянии, мм
				не менее				
Вр-I	ГОСТ 6727—80	500	3	3,9	3,5	2	4	—
		500	4	7,1	6,2	2,5	4	—
		500	5	10,6	9,7	3	4	—
Врп-I	ТУ 14-4-1322—85	600	4	10,5	8,0	2,5	4	—
		600	4,5	13,2	10,2	2,7	4	—
		600	5	16,4	12,5	3	5	—
		600	6	22,6	18,0	4	6	—
В и Вр-II	ГОСТ 7348—81	1500	3	12,6	10,6	4	9 (8)	—
		1400	4	21,4	18,0	4	7 (6)	—
		1400	5	32,8	27,5	4	5 (3)	—
		1400	6	47,3	39,7	5	—	30
		1300	7	60,4	50,7	6	—	35
		1200	8	74,0	62,0	6	—	40

Примечания: 1. В скобках приведены данные для проволоки периодического профиля. 2. Для гладкой стабилизированной проволоки диаметром 5 мм (ТУ 14-4-1362—85) усилие, соответствующее условному пределу текучести, равно 30,1 кН.

Высокопрочную проволоку диаметром 7 и 8 мм изготовляют по разовым заказам, согласованным с заводом-изготовителем.

В качестве ненапрягаемой арматуры следует применять преимущественно стержневую арматурную сталь классов А-III, Ат-IIIС, Ат-IVС и обыкновенную арматурную проволоку периодического профиля классов Вр500 и Вр600. При выборе напрягаемой арматуры предварительно напряженных элементов предпочтение следует отдавать горячекатаной и термомеханически упрочненной стержневой арматуре классов А-V, А-VI, Ат-V и Ат-VI, высокопрочной арматурной проволоке и арматурным канатам.

При проектировании и производстве сборных железобетонных конструкций в ряде случаев необходимо знать модуль упругости арматуры (E_a).

Класс арматуры	E_a, МПа
А-I, А-II, Ас-II	$2{,}1 \cdot 10^6$
А-III, Ат-IIIС, А-IV	$2{,}0 \cdot 10^6$
Ат-IVС, А-V, Ат-V, А-VI, Ат-VII	$1{,}9 \cdot 10^6$
В1200—В1500, Вр1200—Вр1500	$2{,}0 \cdot 10^6$
Вр500	$1{,}7 \cdot 10^6$
Вр600	$1{,}9 \cdot 10^6$
К7, К19, А-IIIВ	$1{,}8 \cdot 10^6$

Свариваемость арматурной стали обеспечивается химическим составом, технологией изготовления и компактностью сечения. Возможность применения горячекатаной и термомеханически упрочненной стержневой арматуры приведена в табл. 1.50 и 1.51 для различных способов сварки и конструкции соединений, регламентированных ГОСТ 14098—91.

Для массового производства сварных арматурных сеток необходима унификация их основных размеров, что является определяющим условием для создания и нормальной эксплуатации высокопроизводительных сварочных машин. Эта задача решена в стандарте на сварные арматурные сетки ГОСТ 8478—81, который содержит 56 марок сеток.

Для изготовления сварных сеток применяют низкоуглеродистую арматурную проволоку класса Вр500 диаметром 3—5 мм и стержневую сталь класса А-III диаметром 6—12 мм; разрешено временно применять в сетках гладкую проволоку класса В400. По виду поставки сетки подразделяют на рулонные и плоские; последние изготовляют шириной от 1040 до 3630 мм и длиной до 9 м. Шаг продольных стержней 100, 150 и 200 мм, шаг поперечных стержней от 50 до 300 мм.

Для закладных изделий и соединительных накладок применяют сталь марок Ст3 различного раскисления и Ст3Гпс толщиной от 4 до 30 мм.

При применении низколегированной стали, например марок 10Г2С1, 09Г2С, 15ХСНД, следует руководствоваться строительными нормами для стальных сварных конструкций.

Для монтажных петель сборных элементов должна применяться горячекатаная арматурная сталь класса Ас-II марки 10ГТ и класса А-I марок Ст3сп и Ст3пс. Если возможен монтаж конструкций при расчетной зимней температуре ниже —40 °С, для монтажных петель не допускается применять полуспокойную сталь.

Для оценки технико-экономической эффективности арматурных сталей, потребления и распределения последних используют коэффициенты приведения к стали класса А-I, определенные из прочностных характеристик арма-

Таблица 1.49. **Механические свойства арматурных канатов**

Класс	ГОСТ, ТУ	Класс прочности	Условный диаметр, мм	Номинальная площадь поперечного сечения, мм²	Разрывное усилие, кН	Усилие при условном пределе текучести $P_{0,2}$, кН	Относительное удлинение при разрыве, %	Линейная плотность, кг/м
					не менее			
К7	ГОСТ 13840—68	1500	6	23	40,6	34,9	4	0,18
		1500	9	53	93,5	79,5	4	0,42
		1500	12	93	164	139,5	4	0,74
		1400	15	139	232	197	4	1,1
К19	ТУ 14-4-22—71	1400	14	128,7	236,9	181,5	4	1,0

Примечание. Линейная плотность семипроволочных канатов приведена для шага свивки, равного 16 диаметрам каната.

Таблица 1.50. Применение горячекатаной стали для армирования железобетонных конструкций

Класс арматурной стали	Диаметр стержней, мм	Марка стали	Сварка				
			крестообразных		стыковых		
		ГОСТ 5781—82	контактная точечная	ручная дуговая прихватками	контактная	в ванне в инвентарных формах	в ванне на стальных скобах-накладках
A-I	6—40	Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп	+	+	+	+	+
	6—18	Ст3Гпс	+	+	+	Не применяются	
A-II	10—40	Ст5сп, Ст5пс	+	+	+	+	+
	40—80	18Г2С	+	—	+	—	+
Ac-II	10—32	10ГТ	+	+	+	+	+
A-III	6—40	35ГС	+	—	+	+	+
		25Г2С	+	+	+	+	+
	6—22	32Г2Рпс	+		+	+	+
A-IV	10—18	80С	—	—	—	—	—
	10—32	20ХГ2Ц	—	—	+	—	—
A-V	10—32	23Х2Г2Т	—	—	+	—	—
A-VI	10—22	22Х2Г2АЮ, 22Х2Г2Р, 22Х2Г2СР	—	—	+	—	—

Примечание. «+» — технология сварки и конструктивные элементы соединения регламентированы нормативными доку

Таблица 1.51. Применение термомеханически упрочненной стали для армирования железобетонных конструкций

Класс арматурной стали	Диаметр стержней, мм	Марка стали	Свар				
			крестообразных		стыковых		
		ГОСТ 10884—81	контактная точечная	ручная дуговая прихватками	контактная	в ванне в инвентарных формах	в ванне на стальных скобах-накладках
Ат-IIIС	10—28	Ст5сп, Ст5пс	Ат-III	Ат-III	Ат-III	Не применяется	Ат-IIIС *
Ат-IVС	10—28	25Г2С, 35ГС, 28С, 27ГС	Ат-IV	Ат-IV	Ат-IV	A-III	Ат-IV *
Ат-IVК	12—16	08Г2С	Ат-IV	Ат-IV	Ат-III	Не применяется	
Ат-V	14	20ГС	Ат-V	Ат-V	Ат-III—Ат-IV		То же
	12—16	08Г2С	Ат-IV	Ат-IV			
Ат-VСК	12—14	20ХГС2	Не применяется		Ат-V **		»
Ат-VII	14	20ГС	Ат-V		Ат-V **		»

* На удлиненных до $4d$ стальных скобах-накладках.
** Происходит локальное разупрочнение протяженностью $(1,5...2,0)\,d$ от границы зоны совместной кристаллизации.

турных сталей, а также конструктивных и технологических факторов, влияющих на расход арматуры в железобетонных конструкциях:

Арматурная сталь	Коэффициент приведения
Стержневая:	
A-I	1,0
A-II, Ac-II	1,21
A-III, Ат-IIIС	1,49
A-IV, Ат-IVС	1,95
A-V, Ат-V	2,2
A-VI, Ат-VI	2,4
Ат-VII	2,6
Проволочная:	
B400	1,39
Bp400	1,47
Bp600	1,85
B1200—B1500, Bp1200—Bp1500	2,8
K7, K19	3,0

Коэффициенты приведения не должны использоваться при выделении фондов заводам сборного железобетона, так как арматурные стали не являются взаимозаменяемыми применительно к конкретным железобетонным изделиям и технологиям их изготовления.

Оптовые цены на сталь для армирования железобетонных конструкций установлены франко-вагон (судно) — станция (порт) назначения с учетом класса и диаметра арматуры, марки стали, механических характеристик и условий поставки. С увеличением диаметра арматуры оптовые цены снижаются. Стоимость сеток увеличивается с уменьшением размеров ячейки и диаметра применяемой арматуры.

соединений

		тавровых					нахлесточных	
				контактная				
многослойными швами	с парными накладками	под флюсом	в CO_2	оплавлением	сопротивлением	ручная дуговая	контактная точечная по рельефу	ручная дуговая
+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	—	+	—	—	+	—	—
+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+
+	+	+	+	+	+	+	+	+
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	+	—	—	+	—	—	—	+
—	+	—	—	+	—	—	—	+
—	+	—	—	+	—	—	—	+

ментами; « — »— запрещенные способы сварки.

ка соединений

		тавровых					нахлесточных	
				контактная				
многослойными швами	с парными накладками	под флюсом	в CO_2	оплавлением	сопротивлением	ручная дуговая	контактная точечная по рельефу	ручная дуговая
Не применяется	Ат-III	Ат-II—Ат-III	Ат-III	Ат-III	Ат-II	Ат-III		Ат-III
Ат-III	Ат-IV	Ат-III	Ат-IV	Ат-IV	Ат-III	Ат-III—Ат-IV		Ат-IV
Не применяется	Ат-III	Не применяется		Не применяется		Не применяется	Ат-IV	Ат-III
То же	Ат-V	Ат-III		Ат-III		Ат-III		Ат-III
»	Ат-III	Не применяется		Не применяется		Не применяется		Не применяется
»	Ат-V **	То же		То же		То же		Ат-III
»	Ат-V	Ат-III		Ат-III		Ат-III	Ат-III	Ат-V

ГЛАВА 2

СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ. СПОСОБЫ СВАРКИ И РЕЗКИ

В зависимости от типа, назначения и условий эксплуатации изделия требования к сварным соединениям изменяются и конкретизируются. Каждый из типов сварных соединений может быть выполнен несколькими способами. В настоящей главе приведены общие сведения об основных процессах сварки, технологических особенностях каждого из них, что поможет сделать правильный выбор способа сварки. Приведены также технологические особенности сварки низколегированных высокопрочных сталей, опыт применения которых для изготовления строительных конструкций сравнительно невелик, а также сталей с повышенным содержанием углерода, сварку которых иногда приходится выполнять при ремонтных работах.

2.1. СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ И ШВЫ

2.1.1. Типы сварных соединений

Типы соединений определяются взаимным расположением свариваемых элементов. Различают стыковые, тавровые, угловые, нахлесточные и торцевые соединения. Стыковые соединения обеспечивают оптимальные условия передачи усилий от одного элемента к другому. Могут соединяться элементы одинаковой или различной толщины. В настоящее время свариваются элементы любых применяемых на практике толщин.

При соединении элементов различной толщины на более толстом из них должен быть сделан скос с одной или двух сторон до толщины меньшего элемента. Скос можно не делать, если разность толщин не превышает 2—5 мм (в зависимости от толщины свариваемого металла). Плавный переход от одной детали к другой обеспечивается сварным швом.

Виды стыковых соединений в зависимости от формы свариваемых кромок, а также конструктивные элементы подготовки кромок представлены на рис. 2.1. Тавровые, угловые, нахлесточные и торцевые соединения показаны на рис. 2.2.

Свариваемые элементы в угловых и тавровых соединениях чаще всего расположены под прямым углом, хотя угол между ними может быть и острым или тупым.

2.1.2. Сварные швы и их характеристики

Различают стыковые швы, соединяющие элементы в стыковом соединении, и угловые — при сварке угловых, тавровых и нахлесточных соединений. Угловые швы могут быть сплошными или прерывистыми, с расположением отрезков прерывистого шва друг против друга или в шахматном порядке. В нахлесточных соединениях элементы могут привариваться друг к другу отдельными точками с предварительным образованием отверстий в одном из элементов или без них. Иногда применяются прорезные швы.

Различают одно- и двухсторонние швы, причем шов может быть выполнен в один или несколько проходов (слоев) — одно- или многослойный шов. Если сечения шва с обеих сторон при двухсторонней сварке примерно равны, то такой шов называют симметричным; если сечение с одной стороны больше, чем с другой,— несимметричным. Шов меньшего сечения называют подварочным.

Угловой шов может быть выпуклым, нормальным или вогнутым.

Различают также прямолинейные, круговые (кольцевые) швы и швы более сложной конфигурации.

Основные виды сварных швов показаны на рис. 2.3.

2.1.3. Особенности выполнения сварных швов в различных пространственных положениях

В зависимости от положения в пространстве продольной оси шва и оси поперечного сечения шва различают сварку в нижнем, вертикальном, горизонтальном, потолочном и наклонном положениях (рис. 2.4). От пространственного положения шва зависит выбор способа и техники сварки, а также сложность его выполнения. Наиболее благоприятные условия для перехода расплавленного электродного металла и формирования шва обеспечиваются при сварке в нижнем положении, когда зеркало сварочной ванны горизонтально. Шов в нижнем положении можно сваривать всеми способами сварки плавлением, в том числе высокопроизводительными методами (многодуговая сварка под флюсом, сварка на форсированных режимах и т. п.). При сварке в нижнем положении оптимальное формирование шва достигается при угле наклона изделия до 3—4° при сварке под флюсом, а при ручной дуговой сварке угол наклона не должен превышать 8—10°. При бо́льших углах наклона форма шва и глубина проплавления изменяются в зависимости от направления сварки. При сварке сверху вниз (на спуск) жидкий металл подтекает под основание дуги и глубина проплавления снижается. Практическое применение сварка на спуск находит при выполнении поворотных стыков труб и сосудов малого диаметра, когда электрод смещается с зенита против направления вращения. При этом уменьшается опасность прожогов, улучшается формирование, предотвращается стекание жидкого металла сварочной ванны.

При сварке снизу вверх (на подъем) толщина слоя жидкого металла под основанием дуги уменьшается, увеличивается глубина проплавления. Этот способ находит практическое применение при ручной сварке с глубоким проваром.

При сварке в вертикальном положении металл сварочной ванны под действием силы тяжести стекает вниз и удовлетворительное формирование шва достигается лишь при небольших объемах сварочной ванны короткой дугой. В этих условиях от стекания жидкий металл удерживают силы поверхностного натяжения. Сварку вертикальных швов можно выполнять вручную покрытыми электродами диаметром не более 4 мм, в защитном газе и без дополнительной защиты —

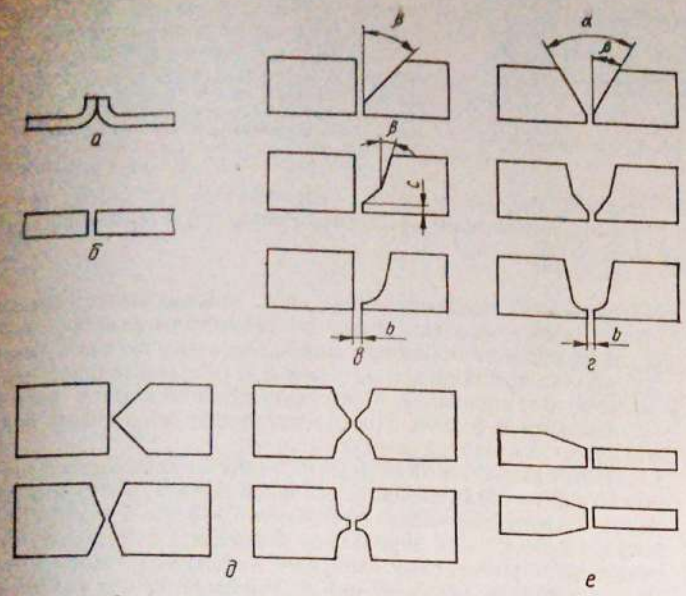


Рис. 2.1. Стыковые соединения и формы разделки кромок:
а — отбортовка; *б* — без скоса; *в* — со скосом одной кромки; *г* — со скосом двух кромок; *д* — с двумя симметричными скосами одной и двух кромок; *е* — разной толщины; α — угол разделки; β — угол скоса кромки; *с* — притупление; *b* — зазор.

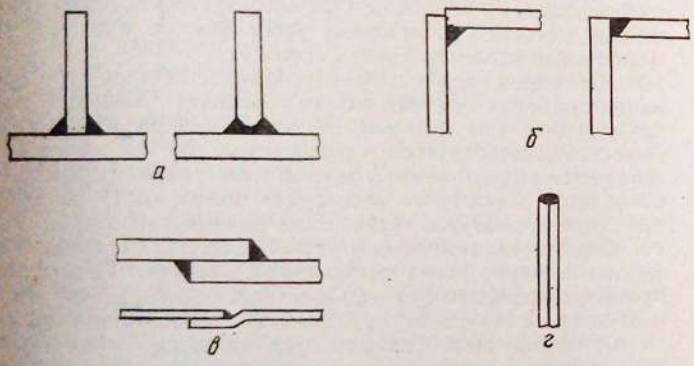


Рис. 2.2. Тавровые (*а*), угловые (*б*), нахлесточные (*в*) и торцевые (*г*) соединения.

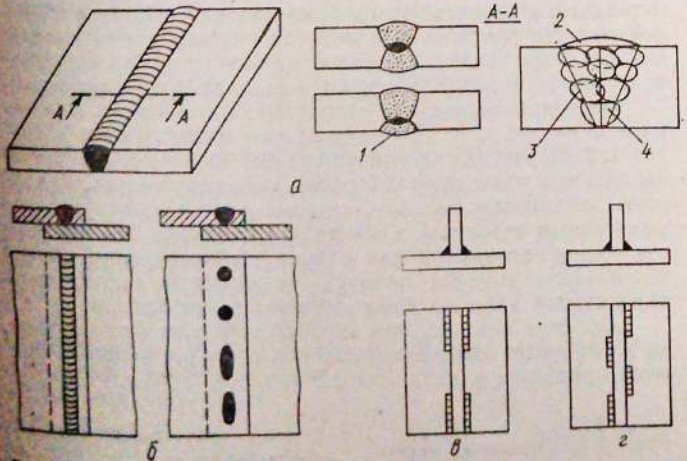


Рис. 2.3. Стыковые одно- и двухсторонние швы (*а*), прорезные (*б*) и угловые прерывистые швы с цепным (*в*) и шахматным (*г*) расположением участков:
1 — подварочный валик; *2* — облицовочный слой; *3* — промежуточный слой; *4* — корневой слой (валик).

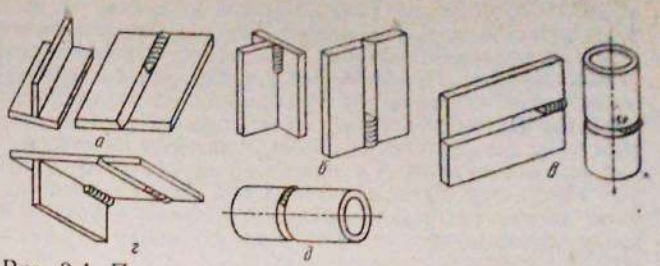


Рис. 2.4. Пространственное положение швов:
а — нижнее; *б* — вертикальное; *в* — горизонтальное; *г* — потолочное; *д* — неповоротный стык труб.

проволокой диаметром не более 1,4 мм и с принудительным формированием. Сварку вертикальных швов можно проводить двумя способами — снизу вверх и сверху вниз. Технику сварки вертикальных швов сверху вниз применяют для элементов толщиной до 3 мм. Дуга возбуждается в верхней точке шва, наклон электрода должен быть таким, чтобы дуга помогла удерживать капли электродного металла от стекания. Сварку выполняют без поперечных колебаний.

Сварку соединений в горизонтальном положении выполняют преимущественно покрытыми электродами вручную, механизированным способом — в защитном газе или без дополнительной защиты. Сварка выполняется без поперечных колебаний, сечение швов ограничено, чтобы предупредить стекание жидкого металла. Для этих же целей скос кромки делают только в верхнем элементе.

При сварке тавровых и угловых соединений с вертикальным расположением одного из элементов (сварка в угол) за один проход можно выполнить шов катетом 8—9 мм. При большем катете происходит стекание металла на горизонтально расположенную деталь.

Наиболее сложна техника выполнения швов в потолочном положении. Перенос металла с электрода в сварочную ванную осуществляется снизу вверх (против силы тяжести), что препятствует нормальному формированию швов. Из-за сложности ведения процесса и ухудшения условий дегазации (пузырьки газа попадают в корень шва) качество шва снижается. Сварку чаще всего выполняют вручную покрытыми электродами диаметром не более 4 мм на пониженных режимах короткой дугой. Возможна также сварка в защитном газе. Разработан способ сварки под флюсом швов в потолочном положении с принудительной подачей флюса. Этот способ применяется при сварке корневых слоев односторонних стыковых швов.

Своеобразная техника нужна при сварке стыковых и угловых неповоротных соединений труб и трубчатых элементов. Если при сварке труб с вертикальной осью шов расположен горизонтально, то при сварке труб с горизонтальной осью шов приходится выполнять во всех пространственных положениях (см. рис. 2.4).

Во всех возможных случаях предпочтение следует отдавать сварке в нижнем положении, обеспечивающей, при прочих равных условиях, получение швов со стабильно высоким качеством при более простой технике сварки. Это достигается путем рационального проектирования конструкций, применением манипуляторов и других приспособлений, позволяющих устанавливать узел под сварку всех швов в удобном положении.

2.1.4. Общие сведения о подготовке к сборке элементов под сварку

Качество, несущая способность и экономичность сварного соединения во многом зависят от подготовки элементов под сварку, точности их сборки. Собираемые заготовки должны быть выполнены, а их кромки подготовлены в соответствии с требованиями конструкторской документации.

Кромки чаще всего подготавливают кислородной или плазменной резкой, резкой на ножницах и механической

обработкой. Наиболее распространена машинная (в цеховых условиях) и ручная кислородная резка, обеспечивающая высокую производительность и достаточную точность подготовки кромок. При качественном резе для большинства марок сталей механическая обработка кромок не требуется. Глубокие зарезы, неровности на поверхности реза не допускаются и должны быть зачищены с плавным переходом, а при большой глубине — и заварены с применением сварочных материалов, предназначенных для сварки соединения. Если кромки подготавливаются механической обработкой, предпочтение следует отдавать криволинейному скосу или скосу с переменным углом.

Основной металл в местах сварки должен быть очищен от грязи, ржавчины, масла, влаги, рыхлого слоя окалины и других загрязнений, которые могут способствовать образованию пор и других дефектов в швах или при сгорании которых образуются вредные или токсичные пары, дым и т. п. Тонкий слой неотслаивающейся окалины или оксидная пленка на поверхности реза не сказываются на качестве шва и перед сваркой могут не удаляться. Не удаляются и вещества, нанесенные на поверхность основного металла для предотвращения налипания брызг, в большинстве случаев грунты и краски, защищающие металл от коррозии при его межоперационном хранении и транспортировке.

При выполнении сварки на монтаже в холодное время года непосредственно перед сваркой стык следует прогреть газовой горелкой или резаком для удаления влаги (если не проводится предварительный подогрев кромок).

Сборка деталей осуществляется по разметке или с помощью специальных сборочных приспособлений. Для закрепления деталей широко применяют струбцины, клинья, стяжные уголки, скобы и другие механические приспособления или зажимы всех видов, сборочные приспособления.

Заданный зазор между деталями и их правильное взаимное расположение фиксируются прихватками. Сечение прихваток составляет примерно $^1/_3$ сечения шва, длина 20—120 мм, расстояние между ними 300—800 мм. Прихватки выполняются покрытыми электродами или в защитном газе, обычно со стороны, обратной наложению первого рабочего шва или слоя. При сварке ответственных конструкций на режимах, обеспечивающих малую глубину проплавления, прихватки следует удалять при наложении рабочего шва. Эта операция не производится при сварке под флюсом и в защитном газе на режимах, обеспечивающих достаточное проплавление основного металла.

По концам деталей обычно устанавливают специальные планки для вывода начала и конца шва за пределы соединяемых деталей. Выводные планки должны быть жесткими и надежно закреплять концы деталей, чтобы предупредить образование трещин в начале и конце шва.

2.1.5. Конструктивные и технологические особенности выполнения сварных швов

Угловые швы. Основные параметры углового шва представлены на рис. 2.5. Размер углового шва определяется катетом, а расчетный параметр определяет минимальное сечение, по которому происходит разрушение шва.

Угловые швы составляют около 80 % всех производимых швов, причем примерно $^2/_3$ из них приходится на слабо-

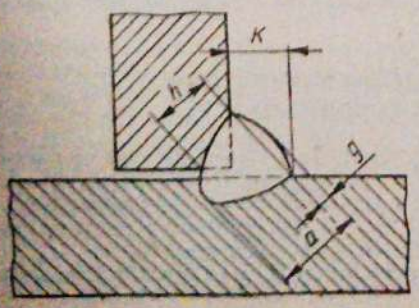


Рис. 2.5. Основные параметры углового шва:

K — катет; h — расчетный параметр (высота); a — толщина; g — выпуклость.

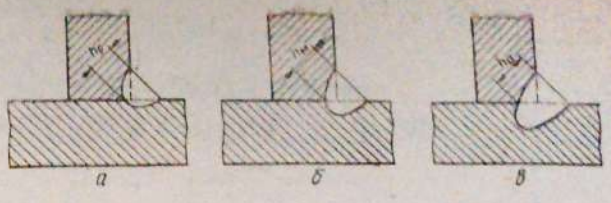


Рис. 2.6. Расчетная высота углового шва при сварке вручную (*а*), при механизированной сварке (*б*) и автоматической (*в*), $h_а > h_м > h_р$.

нагруженные соединительные швы. Минимальные размеры таких швов назначают исходя из технологических условий, в зависимости от толщины и марки основного металла. Сварка должна выполняться на режимах, обеспечивающих нормальное формирование и высокую стойкость швов против образования дефектов. Предпочтение следует отдавать нормальным или слегка вогнутым швам.

При механической обработке торца примыкающего элемента и отсутствии зазора в соединении катет соединительного углового шва может составлять 3—4 мм. Размеры рабочих угловых швов определяют расчетом в зависимости от типа шва, применяемых способов и режимов сварки.

При сварке вручную или полуавтоматом на режимах до 250 А сечение шва образуется за счет его внешней части (рис. 2.6, *а*). В этом случае расчетный параметр шва равен 0,7 катета. При механизированной сварке на токах более 250 А шов формируется за счет внешней части и провара основного металла (рис. 2.6, *б*) и расчетный параметр такого шва составляет 0,85 катета. При автоматической сварке под флюсом глубина проплавления увеличивается (рис. 2.6, *в*) и расчетный параметр равен катету.

Увеличение проплавления основного металла при механизированных способах сварки позволяет уменьшить катет углового шва, что дает значительный экономический эффект. Размеры катетов угловых швов, при которых обеспечивается равнопрочность однослойных угловых швов, выполненных различными способами, приведены в соответствующей нормативно-технической документации.

Сечение многослойных угловых швов можно уменьшить за счет повышения их прочностных свойств. Повышение прочности эффективно до определенного предела, когда опасным сечением становится граница шва с основным металлом.

Стыковые швы. Стыковой шов является оптимальным по количеству наплавляемого металла и условиям работы соединения под нагрузкой. Наиболее рационален с экономической точки зрения односторонний однослойный стыковой шов, образованный за счет расплавления только основного металла. В действительности получить качественный стыковой шов без присадочного металла трудно, и в отдельных случаях такое соединение может применяться при электронно-лучевой сварке или сварке неплавящимся электродом.

Основные параметры однослойного стыкового шва показаны на рис. 2.7. Для оценки шва используются и другие характеристики: коэффициент формы (отношение ширины шва к глубине проплавления), угол перехода от металла шва к основному металлу, сечение шва, образованное наплавленным металлом, и общая площадь шва. Эти характеристики используются для оценки стойкости швов против образования горячих трещин, усталостной прочности и определения доли основного металла в металле шва.

Толщина металла, при которой возможна дуговая сварка различными способами стыковых швов без разделки кромок, приведена в табл. 2.1 [1].

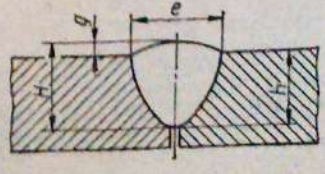


Рис. 2.7. Основные параметры однослойного стыкового шва:

e — ширина шва; H — толщина шва; h — глубина проплавления; g — выпуклость.

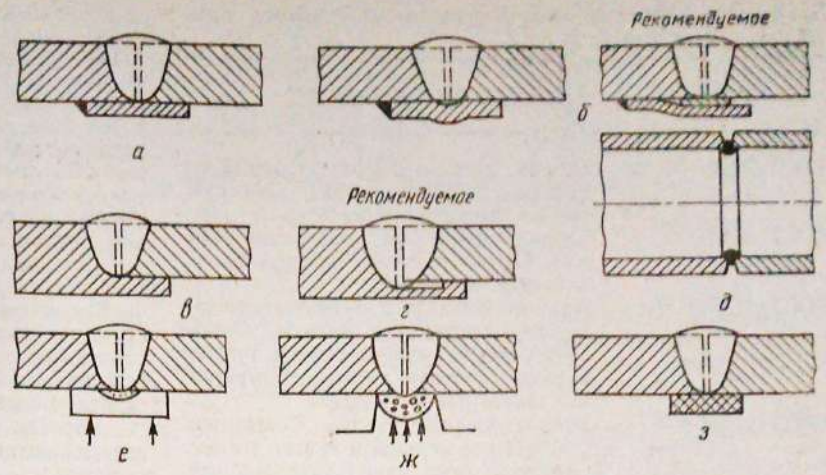


Рис. 2.8. Основные способы удержания расплавленного металла при сварке односторонних стыковых швов:

а, б — сварка на остающейся подкладке; *в, г* — сварка «в замок»; *д* — кольцо-вставка для сварки корневого слоя неплавящимся электродом; *е* — сварка на флюсо-медной подкладке; *ж* — сварка на флюсовой подушке; *з* — сварка на керамической подкладке.

На практике часто возникает необходимость сварки односторонних швов с полным проплавлением — при сварке технологических трубопроводов, замыкающих швов магистральных трубопроводов, других конструкций, в которых доступ к обратной стороне шва невозможен или связан с большими производственными затратами и трудностями. Сварка односторонних швов с полным проплавлением металла, а тем более с качественным формированием обратного валика представляет собой сложную, до сих пор не решенную задачу. Многочисленные приемы и способы не всегда гарантируют стабильное качество формирования обратного валика.

Сварку с полным проплавлением осуществляют без применения мер для удержания сварочной ванны или с использованием приспособлений, получивших название подкладок и подушек, а также с применением специальной конструкции стыка. Корневой слой стыкового шва с полным проплавлением без подкладки, т. е. «на весу», может быть выполнен сваркой неплавящимся электродом в аргоне с подачей присадочной проволоки. Иногда со стороны корня шва дополнительно подают аргон. Увеличение поверхностного натяжения жидкого металла при сварке в аргоне способствует удержанию сварочной ванны, а применение неплавящегося электрода позволяет дозировать нагрев и проплавление кромок без прожогов. Этот способ обеспечивает стабильное проплавление кромок и формирование обратного валика. Он применяется при сварке ответственных технологических трубопроводов. Сварка «на весу» возможна при использовании покрытых электродов на малой погонной энергии. Наилучшие результаты могут быть достигнуты при использовании электродов с целлюлозным покрытием, которые обеспечивают хорошую защиту расплавленного металла при относительно небольшом количестве покрытия. Применение электродов данного типа позволяет получать сварочную ванну небольших размеров и массы и добиваться стабильного проплавления кромок. Эти электроды обычно используются при строительстве магистральных трубопроводов.

Таблица 2.1. Максимальная толщина стального листа, мм, свариваемого с одной или двух сторон в один слой

Способ и условия сварки	С обязательным зазором или скосом кромок	Без зазора
Ручная дуговая сварка покрытыми электродами диаметром 4—5 мм или механизированная сварка в углекислом газе проволокой диаметром до 1,4 мм, ток до 250 А	6/10	4/7
Механизированная сварка проволокой диаметром 1,4—2,0 мм, ток 260—450 А	10/17	7/10
Автоматическая сварка проволокой диаметром 4—6 мм, ток 600—1300 А	24/42	18/32

Примечание. Перед чертой — для одностороннего шва, за чертой — для двухстороннего.

При механизированных способах сварки односторонних швов для предотвращения вытекания сварочной ванны чаще всего применяют различного рода подкладки и подушки (рис. 2.8). В зависимости от материала различают медные, флюсо-медные, керамические или флюсо-керамические, стальные подкладки и флюсовые подушки различных конструкций. Находят также применение подкладки из стекловолокна, армированного стекла и других материалов. Медная или флюсо-медная подкладка представляет собой полосу, поджимаемую к основанию стыка. Подкладку устанавливают стационарно или передвигают по мере сварки шва (скользящая подкладка). В месте прижима к основанию стыка подкладка имеет канавку, куда обычно засыпают флюс, который улучшает формирование обратного валика и предохраняет подкладку от прямого воздействия дуги.

Сварка на флюсовой подушке требует дополнительного устройства для поджатия флюса и применяется, как правило, для сварки прямолинейных швов плоских элементов. Используют также флюсовые подушки специальной конструкции для сварки изнутри кольцевых швов.

В настоящее время выпускаются гибкие подкладки различных конструкций. Чаще всего встречаются подкладки в виде набора узких керамических плиток, наклеенных на гибкую ленту, с канавкой посередине, верхний слой которых состоит из флюса, или в виде гибкого желоба, плотно заполненного флюсом и закрытого тонкой стеклотканью. Края гибкой ленты имеют слой клея для крепления подкладки к свариваемому изделию.

В литературе встречаются сведения о подкладных керамических кольцах для сварки трубопроводов малого диаметра. Особенностью этих колец является применение связующего, растворяющегося в воде, что облегчает удаление колец в процессе промывки и гидравлических испытаний готового трубопровода.

Применение съемных подкладок и подушек обеспечивает значительное повышение качества односторонних швов, однако и в этом случае не всегда удается обеспечить стабильное формирование обратного валика. Это объясняется тем, что на данном этапе развития техники сварки практически невозможно поддерживать с высокой степенью точности постоянство взаимосвязанных параметров: зазор между подкладкой и основанием стыка, усилие поджатия подкладки, зазор в стыке и геометрию разделки, режимы сварки и количество расплавленного металла в единицу времени — или автоматически регулировать их.

Таблица 2.2. **Перечень стандартов на основные типы сварных соединений**

ГОСТ	Наименование
ГОСТ 5264—80	Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 8713—79	Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 11533—75	Автоматическая и полуавтоматическая дуговая сварка под флюсом. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 11534—75	Ручная дуговая сварка. Соединения сварные под острым и тупым углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 14098—85	Соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Типы, конструкция и размеры
ГОСТ 14771—76	Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 14776—79	Дуговая сварка. Соединения сварные точечные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 14806—80	Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 15164—78	Электрошлаковая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 15878—79	Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 16037—80	Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 16038—80	Сварка дуговая. Соединения сварные трубопроводов из меди и медно-никелевых сплавов. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 16098—80	Соединения сварные из двухслойной коррозионно-стойкой стали. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 23518—79	Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры
ГОСТ 27580—88	Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры

Наряду с флюсовыми и флюсо-медными подкладками широко применяются остающиеся подкладки, изготовленные из металла, близкого по составу к свариваемым. Для соединений из углеродистых и низколегированных сталей обычно применяют подкладку из низкоуглеродистой стали (Ст3, Ст2). Толщина подкладки должна составлять 30—40 % от толщины соединяемых листов (при однослойной сварке) или слоя. Непременным условием для качественной сварки является точная подгонка подкладки: зазор между подкладкой и стыком не должен превышать 1 мм. Подкладка крепится к одному из соединяемых элементов прихватками.

Иногда функцию остающейся подкладки выполняет одна из деталей, имеющая специальную конструкцию присоединяемой части (например, сварка «в замок»).

При сварке на остающейся подкладке (см. рис. 2.8, *а*) или соединений, показанных на рис. 2.8, *в*, трудно проварить корень шва, иногда в швах наблюдаются трещины, берущие начало от щели между сопрягаемыми элементами. Такая конструкция стыка также отрицательно сказывается на усталостной прочности соединения ввиду резкого изменения жесткости соединяемых элементов у стыка и значительной концентрации напряжений.

Подкладкам и соединениям «в замок» (см. рис. 8, *б*, *г*) эти недостатки присущи в меньшей степени или вообще исключены. Соединения «в замок» применяются в кольцевых соединениях толстостенных труб и сосудов. Для сварки кольцевых соединений труб применяются также плавящиеся кольца-вставки (рис. 2.8, *д*), являющиеся присадочным металлом при сварке корневого слоя неплавящимся электродом в аргоне.

Переход на одностороннюю сварку оправдан только в случае действительной необходимости, например при сварке громоздких узлов, когда кантовка изделий затруднена или невозможна, а также для изделий, размеры которых не позволяют проводить сварку с другой стороны. При односторонней сварке нужен более жесткий контроль качества, иногда возрастают затраты на правку конструкций.

Отдельные способы удержания расплавленного металла, описанные выше, применяются и для двухсторонних швов при сварке первого слоя. Для этого также применяют ручную подварку, заделку зазора асбестом или асбестовую подкладку и др. Ручную подварку не удаляют, а переваривают в процессе наложения последующего шва.

Другие виды швов. Нахлесточные соединения могут быть сварены также прорезным швом или электрозаклепками. При сварке прорезных швов (см. рис. 2.3), во избежание прожогов и вытекания сварочной ванны в зазор между соединяемыми элементами, должно быть обеспечено плотное прижатие листов друг к другу. Автоматической сваркой под флюсом прорезным швом можно соединить элемент толщиной не более 12 мм. Хорошие результаты получают при сварке прорезных швов электронно-лучевой сваркой.

Сварку электрозаклепками обычно выполняют через отверстие в верхнем листе, хотя возможна сварка без предварительного образования отверстия. Зазор между сопрягаемыми деталями не должен превышать 1 мм. Сварку выполняют серийным полуавтоматом под флюсом или в углекислом газе. Иногда применяют специализированное оборудование, в том числе оборудование для сварки электрозаклепками стержнем диаметром 8—10 мм под флюсом.

При сварке плавлением соединяемые детали могут иметь самую разнообразную форму, при этом могут применяться все типы соединений. При контактной сварке, сварке трением, взрывом, других способах соединяемые элементы должны иметь определенную конфигурацию или должны применяться лишь определенные типы соединений. Например, контактная точечная сварка обычно применяется лишь для сварки нахлесточных соединений, в то время как контактная стыковая сварка используется преимущественно для сварки стыковых соединений различного профиля, а сварку трением рационально применять для соединения деталей, представляющих собой (хотя бы одна из них) тела вращения.

В табл. 2.2 приведен перечень ГОСТов на типы сварных соединений, конструктивные элементы и размеры при различных способах сварки.

2.1.6. Общие требования к сварным соединениям

Требования к сварным соединениям и швам во многом зависят от типа конструкции, условий ее нагружения и эксплуатации. Наряду с этим любое сварное соединение, независимо от назначения конструкции, должно обладать достаточной работоспособностью при минимальных затратах трудовых и материальных ресурсов в процессе его выполнения и эксплуатации.

Ниже приведены общие требования к сварным соединениям, соблюдение которых позволяет получить более надежную и экономичную конструкцию. Выбор основного и электродного металла, технологии изготовления и другие аспекты, также влияющие на работоспособность и экономичность сварных конструкций, больше зависят от назначения конкретной конструкции и будут изложены в соответствующих разделах.

Выбор типа соединения. Оптимальными соединениями при сварке плавлением и контактной сварке являются стыковые. Такие соединения применяются в балках различных профилей, элементах ферм, магистральных и технологических трубопроводах различного назначения и др. Стыковые соединения особенно целесообразны в емкостях различных назначений. Они хорошо обеспечивают герметичность и непроницаемость, удобны для применения физических методов контроля качества, экономичны. При статических нагрузках стыковые соединения обеспечивают равнопрочность с основным металлом для большинства марок углеродистых и низколегированных сталей, многих марок высоколегированных сталей.

Для некоторых марок закаленных высокопрочных сталей и некоторых алюминиевых сплавов стыковые швы уступают по прочности основному металлу из-за разупрочнения в околошовной зоне. Для повышения прочности таких соединений предусматривают местные утолщения в зоне расположения стыков.

Как правило, стыковые швы располагают перпендикулярно действующим усилиям. Косые швы практически не применяются.

В конструкциях, работающих при статических нагрузках, широко применяются нахлесточные соединения. Они требуют меньшей точности при подготовке кромок и сборке соединений. Нахлесточные соединения являются основными при контактной точечной и роликовой сварке. Соединения внахлестку применяют при изготовлении тонкостенных резервуаров, строительных ферм, мачт, рам. При статических нагрузках концентрация напряжений в угловых лобовых и фланговых швах не снижает несущей способности конструкции. Нахлесточные соединения нецелесообразны в конструкциях, работающих в коррозионных средах, так как трудно обеспечить надежную защиту свариваемых элементов в месте контакта, особенно при точечной, рельефной или шовной сварке. Коррозионную защиту обеспечивают специальные антикоррозионные покрытия или клеи, предварительно нанесенные на соединяемые кромки.

Тавровые соединения широко используются в балочных и рамных конструкциях. При статических нагрузках тавровые соединения обычно выполняют без подготовки кромок.

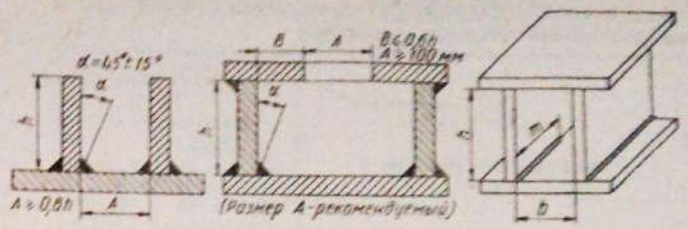
При статических нагрузках все типы сварных соединений работают с достаточной надежностью. Концентрация напряжений, вызванная типом сварного соединения или исполнением сварного шва, опасна для конструкций из высокопрочных сталей или работающих при низких температурах. Для таких конструкций не следует применять соединения с непроваром, переход от одних элементов к другим должен быть по возможности плавным.

При переменных и динамических нагрузках предпочтение следует отдавать стыковым соединениям, не имеющим усиления. С увеличением выпуклости стыкового шва и резкости его перехода к основному металлу сопротивление усталости снижается.

Нахлесточные соединения сопротивляются усталостным разрушениям хуже, чем стыковые. Наиболее низкую выносливость имеют соединения с фланговыми швами. Трещины усталости в таких соединениях, как правило, возникают в основном металле у концов фланговых швов.

В конструкциях, работающих при переменных и динамических нагрузках, необходимо избегать резких изменений сечений, прерывистых швов, а также односторонних стыковых швов.

Форма и взаимное расположение деталей в конструкциях должны обеспечивать удобное выполнение сварочных работ, видимость сварочной ванны и требуемый угол наклона электрода (рис. 2.9).



B, мм	h, мм	m, мм
>400	250...400	≤600
	≤250	h
≤400	≥250	0,65 B
	<250	Bh/400

Рис. 2.9. Условия, обеспечивающие возможность выполнения швов.

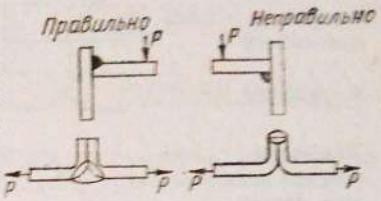


Рис. 2.10. Расположение швов в зависимости от направления действующих усилий.

Следует избегать сосредоточения нескольких швов в ограниченной зоне. Если в нормативной документации нет других указаний, минимальное расстояние между соседними швами должно составлять 50 мм. Расположение швов в зоне резких перегибов гнутых и штампованных элементов не допускается.

При односторонней сварке расположение швов необходимо согласовать с направлением действующих усилий (рис. 2.10).

Требования к разделке кромок. В зависимости от способа сварки, толщины и марки свариваемого металла для каждого типа соединения подготовка кромок различна. В табл. 2.1 указаны толщины стальных листов, которые могут быть сварены с одной или двух сторон без разделки кромок. Для элементов с большей толщиной зазора между соединяемыми элементами оставляют пространство, позволяющее приблизить источник тепла к самой отдаленной от поверхности точке основного металла и обеспечить полное проплавление кромок. Это достигается за счет скоса кромок.

Скос кромок выполняют и для других целей: уменьшение доли основного металла в металле шва при сварке сталей с повышенным содержанием углерода или среднелегированных сталей, создание благоприятного термического цикла, снижение вероятности образования дефектов. Очевидно, что сварка с разделкой кромок менее целесообразна, так как искусственно удаляется часть основного металла, а образовавшаяся полость заполняется более дорогим электродным или присадочным металлом.

Выбор формы разделки кромок (см. рис. 2.1) зависит от конструкции свариваемого узла, применяемого способа обработки и наличия соответствующего оборудования. Минимальные сечение шва и расход электродного металла обеспечиваются, когда кромки имеют криволинейный скос с двух сторон (табл. 2.3).

Применение двухсторонней симметричной разделки позволяет значительно уменьшить сечение шва. Благодаря симметричности сечения шва при двухсторонней разделке угловая деформация конструкции значительно меньше, чем при сварке одностороннего многослойного шва.

Угол раскрытия кромок следует выбирать так, чтобы были обеспечены провар вершины угла притупления и оптимальный коэффициент проплавления. При малом угле раскрытия возможны непровар корня шва и возникновение кристаллизационных трещин.

В последние годы для автоматической сварки под флюсом и в защитных газах применяют узкую (щелевую) разделку. Сварка в узкую разделку по производительности и расходу электродной проволоки более выгодна, чем автоматическая

Таблица 2.3. **Зависимость поперечного сечения шва от конструктивного решения элементов**

Конструктивное решение	Площадь сечения шва, %		
	Стыковой шов для металла толщиной, мм		Угловой шов с катетом 10 мм
	20	50	
Разделка кромок и форма сечения			
V-образная	100	100	—
V-образная с ломаным скосом	92	62	—
X-образная	58	54	—
X-образная с ломаным или криволинейным скосом	—	42	—
Отклонение от номинальных размеров (номинальный размер принят за 100 %)			
увеличение зазора на 1 мм (V-образная разделка кромок для стыковых швов)	108	104	120
увеличение катета на 1 мм	—	—	120
увеличение выпуклости углового шва на 1 мм	—	—	106

сварка под флюсом с двухсторонним криволинейным скосом кромок при толщине металла более 60 мм. Качественная сварка в узкую разделку может быть выполнена при использовании специальной аппаратуры, обеспечивающей раскладку валиков и тщательное слежение электродной проволоки по шву.

Общий принцип, которым следует руководствоваться при выборе формы разделки кромок для данных конкретных условий, состоит в применении разделки минимального сечения, обеспечивающей необходимое качество шва при принятом способе и имеющемся сварочном оборудовании.

Форма шва. Чрезмерная выпуклость швов не увеличивает прочности сварных соединений при статических нагрузках и резко снижает усталостную прочность при знакопеременных нагрузках. При таких швах увеличивается расход электродного металла и трудоемкость сварки.

При сварке стыковых соединений следует стремиться к получению слегка выпуклых швов с плавным переходом к основному металлу. Угловые швы должны быть слегка вогнутыми или без усиления, а также иметь плавный переход к основному металлу. Форма шва и дефекты формирования показаны на рис. 2.11.

Для повышения усталостной прочности ответственных соединений иногда прибегают к механической обработке швов, удаляя выпуклость стыковых швов или придавая угловым швам вогнутую форму и обеспечивая плавный переход к основному металлу.

С этой же целью стыковые и угловые швы подвергают аргонодуговой обработке — переплавлению неплавящимся электродом границ швов с основным металлом с целью создания плавного перехода, ликвидации подрезов и поверхностных неметаллических включений.

Усталостная прочность стыковых соединений с необработанными швами не зависит от формы разделки кромок, а обусловлена плавностью перехода от наплавленного металла к основному. Технологические дефекты в необработанных стыковых соединениях значительно меньше влияют на усталостную прочность соединения при испытаниях на переменный изгиб, чем неплавность перехода шва к основному металлу.

Конфигурация и размеры шва при дуговой сварке зависят от способа и режима сварки, положения шва в пространстве, а при ручной и механизированной — от техники сварки.

К основным параметрам режима дуговой сварки обычно относят ток, его род и полярность, напряжение дуги, скорость перемещения дуги (скорость сварки), диаметр электрода.

Существенное влияние на формирование шва оказывают вылет электрода, положение электрода или сварочной проволоки в пространстве (вертикальное, наклонное), поперечное перемещение конца электрода и его траектория, положение изделия при сварке. При ручной и механизированной сварке отдельные параметры режима устанавливаются и поддерживаются постоянными или изменяются с определенной закономерностью вручную. Выполнение этих манипуляций, как и некоторых других, влияющих на качество шва, и составляет понятие «техника сварки».

Сведения о влиянии режима сварки на форму и состав шва изложены в литературе [1—3] и обобщены в табл. 2.4.

Параметры режима сварки оказывают существенное влияние на форму и состав шва, его качество, и задача специали-

Таблица 2.4. **Изменение параметров при увеличении составляющих режима дуговой сварки**

Характеристика шва	Ток	Диаметр электрода	Напряжение дуги, В		Скорость сварки, м/ч		
			24—34	35—46	до 15	15—40	свыше 40
Глубина проплавления	Интенсивно увеличивается	Уменьшается	Незначительно увеличивается	Незначительно уменьшается	Несколько увеличивается	Практически не изменяется	Уменьшается
Ширина шва	Незначительно увеличивается	Увеличивается	Увеличивается	Интенсивно увеличивается		Уменьшается	
Выпуклость шва	Интенсивно увеличивается	Уменьшается	Уменьшается		Незначительно увеличивается		
Коэффициент формы проплавления	Интенсивно уменьшается	Увеличивается	Интенсивно увеличивается		Незначительно уменьшается		
Коэффициент формы усиления	То же	То же	Увеличивается		Уменьшается		
Доля основного металла в металле шва	Интенсивно увеличивается	Уменьшается	Незначительно увеличивается		Интенсивно увеличивается		

Примечание. Влияние отдельных параметров режима сварки на размер, форму и состав шва оценивали при условии

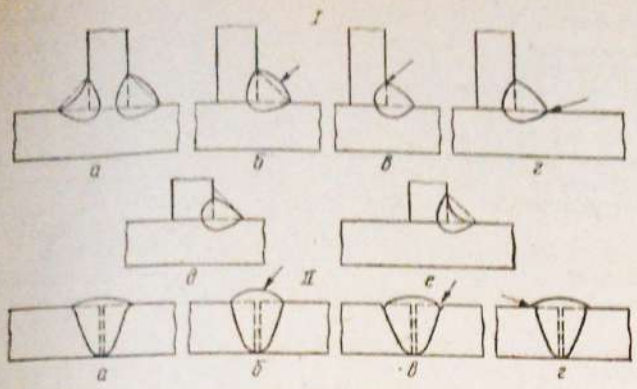


Рис. 2.11. Форма угловых (*I*) и стыковых (*II*) швов и дефекты их формирования:

а — шов с плавным переходом к основному металлу; *б* — чрезмерная выпуклость; *в* — подрез; *г* — наплыв; *д* — неравномерный катет; *е* — чрезмерная вогнутость

стов-сварщиков сводится к установлению такого сочетания параметров режима, при котором обеспечивается требуемое качество сварного соединения при максимальной производительности и минимальной стоимости процесса.

Высокое качество сварных соединений и плавный переход шва к основному металлу легче получить при использовании механизированной и автоматической сварки, а также при соответствующем расположении свариваемых изделий и сварного шва (нижнее положение, положение «в лодочку»).

Для данного способа сварки, марки основного металла и типа шва существует оптимальный режим, который в конкретных условиях может изменяться только в узких пределах.

2.1.7. Обозначение швов сварных соединений на чертежах

Сварные соединения на чертежах обозначают в соответствии с ГОСТ 2.312—72. В структуру условного обозначения входит номер ГОСТа на типы сварных соединений (см. табл. 2.2), тип соединения по указанному ГОСТу, метод и способ сварки, катет шва, длина и шаг прерывистого шва, особые обозначения.

Практически все страны Европы, США, Япония и другие применяют систему условных обозначений сварных соединений согласно международному стандарту ИСО 2553 «Швы сварные. Условные обозначения на чертежах» или по национальным стандартам, полностью совпадающим со стандартом ИСО или имеющим незначительные различия.

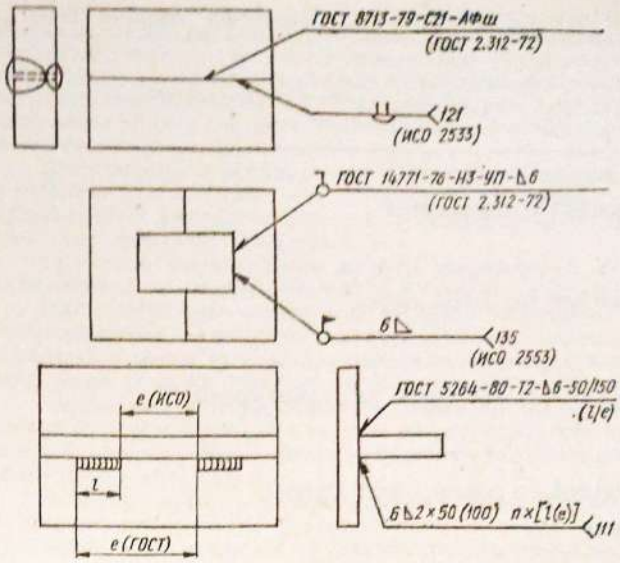


Рис. 2.12. Условные обозначения швов: *n* — количество швов; 121, 135, 111 — условное обозначение способа сварки.

Согласно стандарту ИСО 2553 применяется графическая система, где каждый тип сварного соединения обозначается графическим символом (табл. 2.5). Вспомогательные знаки и особые обозначения, входящие в условные обозначения, приведены в табл. 2.6. Различие в условных обозначениях сварных швов по ГОСТ и стандарту ИСО показано на некоторых примерах (рис. 2.12).

По стандарту ИСО 2553 цифры возле символа обозначают: слева от символа — размеры поперечного сечения шва (катет, высота шва); справа от символа — размеры швов по длине (при прерывистых швах с цепным или шахматным расположением). По ГОСТ 2.312—72 все размеры швов располагаются справа от символа. Иногда в национальных стандартах применяются и другие обозначения, например размеры разделки кромок.

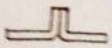
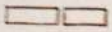
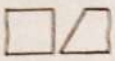
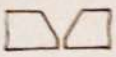
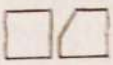
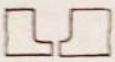
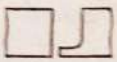
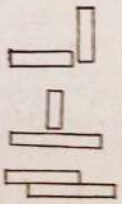
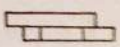
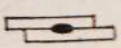
2.2. СПОСОБЫ СВАРКИ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

В соответствии с ГОСТ 19521—74 процессы сварки классифицированы по трем основным физическим признакам: наличию давления для осадки соединяемых деталей, виду и внешним носителям вводимой энергии.

Поперечное перемещение электрода	Наклон электрода		Направление сварки		Вылет	
	углом вперед	углом назад	спуск	подъем	при равной величине тока	при равной подаче
Уменьшается	Уменьшается	Увеличивается	Уменьшается	Увеличивается	Не изменяется	Уменьшается
Увеличивается	Увеличивается	Уменьшается	Увеличивается	Уменьшается	Не изменяется	
Уменьшается	Уменьшается	Увеличивается	Уменьшается	Увеличивается	Интенсивно увеличивается	Не изменяется
Интенсивно увеличивается	Увеличивается	Уменьшается	Увеличивается	Уменьшается	Не изменяется	Увеличивается
То же	То же	То же	То же	То же	Уменьшается	Не изменяется
Уменьшается	Уменьшается	Увеличивается	Не изменяется		Уменьшается	

неизменности остальных параметров режима.

Таблица 2.5. **Условные обозначения сварных швов**

Тип шва (соединения)	Форма поперечного сечения	Условное обозначение по ИСО 2553
Стыковой с отбортовкой		
Стыковой без скоса кромок		
Стыковой с V-образной разделкой кромок		
Стыковой со скосом одной кромки		
Стыковой с V-образной разделкой кромок и широким притуплением		
Стыковой со скосом одной кромки и широким притуплением		
Стыковой с криволинейным скосом двух кромок		
Стыковой с криволинейным скосом одной кромки		
Подварочный шов (подкладка под шов (США))		
Угловой		
Пробочный или прорезной		
Контактный точечный		
Контактный непрерывный		

Все известные в настоящее время процессы сварки осуществляются за счет использования только двух видов энергии — термической и механической или при их сочетании. Внешние носители энергии — дуга, луч, газовое пламя и др. Для всех термических процессов энергия от внешних носителей всегда вводится в соединение путем расплавления металла, процесс осуществляется без давления. Эта группа видов и способов объединена термином «сварка плавлением».

В термомеханических и механических способах процесс образования соединения осуществляется с приложением давления, и эта группа способов относится к сварке давлением

2.2.1. Сварка плавлением

В зависимости от носителя энергии различают следующие виды и способы сварки плавлением: электродуговая, плаз-

менная, электрошлаковая, электронно-лучевая, лазерная, газовая, термитная.

Электрическая дуговая сварка является наиболее важным и распространенным промышленным видом сварки. Нагрев и плавление металла во всех существующих способах дуговой сварки осуществляются дугой, горящей обычно между концом металлического стержня (электрода) и свариваемым (основным) металлом (дуга прямого действия). Значительно реже в производстве применяется дуга косвенного действия, горящая между двумя электродами.

В зависимости от способа защиты зоны сварки от окружающего воздуха различают сварку покрытыми электродами, сварку в защитном газе, под флюсом и без дополнительной защиты.

По свойствам электрода различают сварку неплавящимся электродом (вольфрамовым, угольным или графитовым) и сварку плавящимся электродом. В качестве плавящихся применяются покрытые электроды, проволока сплошного сечения и порошковая проволока. Иногда применяется также электродная лента и специальные электроды сложной формы.

В зависимости от числа применяемых электродов различают одно-, двух- и многоэлектродную сварку (если электроды подсоединены к одному полюсу источника питания) или двухдуговую (многодуговую) сварку, если каждый из электродов получает независимое питание.

Шов формируется в результате выполнения ряда последовательных операций: возбуждение и поддержание дугового разряда, манипуляция электродом для придания шву нужной формы и для направления электрода по оси соединения, перемещение дуги вдоль свариваемых кромок по мере формирования шва заданного сечения, прекращение процесса. В зависимости от степени механизации указанных операций различают ручную, механизированную и автоматическую сварку.

Таблица 2.6. **Вспомогательные знаки для обозначений**

Значение вспомогательного знака	Обозначение вспомогательного знака	
	ИСО 2553	ГОСТ 2.312—72
Форма шва:		
плоский	—	Отсутствует
выпуклый	⌒	»
вогнутый	⌣	»
Усиление шва снять	Отсутствует	Ω
Наплывы и неровности шва обработать с плавным переходом к основному металлу	»	⌓
Шов выполнить на монтаже	⚑	⚐
Шов прерывистый (точечный) с цепным расположением отрезков, K — катет, l — длина шва, e — шаг или расстояние между швами (ИСО)	$K \triangleright n \times l(e)$	l/e
Шов прерывистый (точечный) с шахматным расположением отрезков, n — число отрезков шва	$\frac{K}{K} \triangleright \frac{n \times l(e)}{n \times l(e)}$	$l Z e$
Шов по замкнутой линии	○	○
Шов по незамкнутой линии	Отсутствует	⊐

В приведенных ниже кратких характеристиках способов сварки основное внимание уделено вопросам, позволяющим правильно оценить технико-экономические возможности, преимущества и недостатки каждого из способов, без детального описания сущности процесса, применяемых сварочных материалов и оборудования, учитывая наличие в книге соответствующих разделов.

При описании способов сварки применяют определения и термины по ГОСТ 2601—84. Некоторые определения, не приведенные в указанном стандарте и имеющие важное значение для практики, даны ниже.

Сварочная ванна — часть металла свариваемого шва, находящаяся при сварке плавлением в жидком состоянии.

Вылет электрода — расстояние от точки токоподвода до конца электрода, на котором горит дуга. Учитывая сложность определения длины дуги, на практике вылетом часто считают расстояние от точки токоподвода до свариваемого объекта.

Горелка для дуговой сварки — устройство для дуговой сварки в защитном газе, под флюсом или самозащитной проволокой, обеспечивающее подвод электрического тока к электроду (газа в зону сварки).

Магнитное дутье — отклонение дуги в результате действия магнитных полей или ферромагнитных масс при сварке. Наблюдается при сварке на постоянном токе, сопровождается резким увеличением разбрызгивания и затрудняет выполнение сварки.

Источник питания — устройство, дающее рабочий ток при сварке (резке). В качестве источников питания применяются специальные трансформаторы, генераторы, выпрямители, преобразователи и агрегаты, состоящие из сварочного генератора и приводного двигателя.

Прямая полярность — полярность, при которой электрод присоединяется к отрицательному полюсу источника питания дуги, а объект сварки — к положительному.

Обратная полярность — полярность, при которой электрод присоединяется к положительному полюсу источника питания дуги, а объект сварки — к отрицательному.

Присадочная проволока — сварочная проволока, используемая как присадочный металл и не являющаяся электродом.

Ручная сварка покрытыми электродами

Сущность процесса. Схема процесса сварки и образования сварного шва представлена на рис. 2.13. В результате плавления конца электрода и кромок соединяемых элементов образуется сварочная ванна, при кристаллизации которой (по мере удаления дуги) формируется сварной шов.

Защита дуги и сварочной ванны происходит шлако- и газообразующими веществами, входящими в состав покрытий. Расплавленное покрытие всплывает на поверхность в сварочной ванне и после остывания образует шлаковую корку.

Сварочные материалы. В качестве электрода применяется металлический стержень с нанесенным на поверхность специальным покрытием. Наиболее широко используются стержни диаметром 2—6 мм, в ряде случаев используют электроды большего диаметра. В зависимости от диаметра и

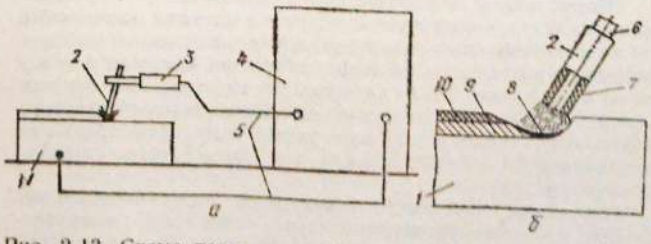


Рис. 2.13. Схема поста ручной дуговой сварки покрытыми электродами (*а*) и формирования шва (*б*):
1 — свариваемое изделие; *2* — электрод; *3* — электрододержатель; *4* — источник питания; *5* — кабели сварочные; *6* — стержень электрода; *7* — покрытие; *8* — сварочная ванна; *9* — металл шва; *10* — шлаковая корка.

Таблица 2.7. **Выбор диаметра электрода**

Толщина свариваемого элемента, мм	Пространственное положение шва	Слой многослойного шва	Рекомендуемый диаметр, мм
1—2	Все	—	Не более 2
2—3	»	—	3
Не менее 4	»	Корневой	3
	Вертикальное и потолочное	Заполняющие и облицовочный	Не более 4
Не менее 6	Нижнее	То же	Не менее 5

материала стержня длина его составляет 250—450 мм, что обеспечивает удобство в работе, позволяет избежать перегрева стержня и разрушения покрытия. Для закрепления электрода в электрододержателе и подвода тока на один конец стержня длиной 20—35 мм покрытие не наносится. Противоположный торец электрода должен быть зачищен от покрытия и ржавчины, что облегчает возбуждение дуги.

К электродам предъявляется ряд общих требований, а также специальные требования в зависимости от назначения. Для удовлетворения всех требований в покрытие вводятся определенные вещества, применяются стержни различного химического состава.

Электроды для ручной сварки классифицируют по следующим основным признакам: назначению, типу покрытия, механическим свойствам, химическому составу наплавленного металла и др. Эти признаки положены в основу классификации электродов в государственных стандартах и национальных стандартах ряда стран.

Назначение, состав и свойства каждой конкретной марки наиболее полно отражены в паспорте. Марка электрода, назначение, технологические указания по температуре прокалки и режимам сварки приведены также на этикетках упаковок для электродов.

При оценке качества электродов прежде всего проверяется прочность и целостность покрытия, состояние стержня (отсутствие ржавчины), а также стабильность горения дуги и равномерность плавления электрода. Большая разность толщин покрытия приводит к неравномерному его плавлению, затрудняет ведение процесса сварки и приводит к образованию дефектов в швах.

Покрытия электродов всех типов при хранении не в герметичной упаковке поглощают атмосферную влагу, которая является одним из источников водорода, попадающего в металл шва и способствующего образованию пор и холодных трещин, особенно при сварке низколегированных сталей повышенной прочности и закаливающихся сталей. Для удаления влаги электроды непосредственно перед использованием должны быть прокалены при температуре, зависящей от типа покрытия и указанной в сопроводительной документации. Чрезмерная температура прокалки приводит к разрушению покрытия.

Оборудование и рабочее место сварщика. Для проведения ручной сварки требуется источник питания постоянного или переменного тока, электрододержатель, сварочные провода, один из которых обычно снабжается зажимом для надежного крепления его к свариваемому изделию. Для очистки швов от шлака, других вспомогательных операций сварщик должен иметь молоток, зубило, щетку и др., для защиты от излучения дуги и брызг металла — защитный щиток или маску и спецодежду.

Источники питания: переменного тока — сварочные трансформаторы; постоянного тока — сварочные выпрямители и генераторы. Генераторы, снабженные электродвигателями, относятся к сварочным преобразователям, а двигателями внутреннего сгорания — к сварочным агрегатам.

Источники питания для ручной сварки должны иметь падающую внешнюю характеристику. Для многопостовых источников питания падающая внешняя характеристика создается последовательным включением в цепь балластных реостатов.

Рабочее место сварщика в заводских условиях обычно устраивается в виде сварочной кабины, имеющей соответствующее оборудование и надежную вытяжную вентиляцию.

При сварке крупногабаритных узлов сварщик работает непосредственно у изделия или на нем. Рабочее место должно быть ограждено переносными щитами или ширмами. В условиях монтажа на открытом воздухе рабочее место должно быть надежно защищено от атмосферного воздействия и прежде всего от дождя, ветра, снега, ухудшающих условия работы сварщика и качество сварного шва.

Технология и качество сварного соединения. При разработке технологии сварки в документации указывают марку электрода, его диаметр и параметры режима сварки. Диаметр электрода выбирают в зависимости от толщины свариваемых элементов, пространственного положения и слоя шва (табл. 2.7). Для сварки конструкций ответственного назначения и материалов, у которых наблюдается ухудшение свойств в зоне термического влияния из-за перегрева, электроды диаметром более 5 мм не применяются.

Основным параметром режима ручной дуговой сварки является ток. Правильный выбор тока имеет большое значение для качества сварки и ее производительности.

Оптимальный ток указывается в технической документации на электроды. Для электродов диаметром 3—6 мм сварочный ток (А) может ориентировочно определяться по формуле $I = (20 + 6d)\,d$, где d — диаметр электрода, мм.

При сварке в вертикальном и потолочном положениях ток должен быть на 10—20 % ниже, чем при сварке в нижнем положении.

При чрезмерном для данного диаметра электрода токе повышается разбрызгивание металла, снижается качество шва. Выбор вида тока и его полярности зависит от типа электрода. Для большинства электродов с покрытием основного типа сварка должна производиться постоянным током обратной полярности. При сварке на постоянном токе возможно магнитное дутье, когда под влиянием магнитных полей и ферромагнитных масс дуга отклоняется на одну из кромок. Магнитное дутье вызывает также повышенное разбрызгивание расплавленного металла, приводит к образованию внутренних дефектов.

Эффективных методов борьбы с магнитным дутьем, кроме перехода на переменный ток, нет. Ослабить нежелательное действие дутья можно также выбором рационального места подключения сварочного провода, наклона электрода, изменением направления сварки.

При ручной сварке все операции, в результате которых формируется шов, выполняются вручную, поэтому качество сварного шва зависит прежде всего от квалификации сварщика и применяемой им техники. Основные требования к технике сварки: 1) равномерное поступательное движение электрода с постоянной амплитудой поперечных колебаний при постоянных зазоре и расстоянии между кромками; 2) поддержание постоянной, возможно более короткой длины дуги, особенно для электродов с покрытием основного типа, так как удлинение дуги часто является причиной образования пор в шве; 3) выбор правильного наклона электрода и согласование этого наклона с пространственным положением свариваемого в данный момент участка шва неповоротного стыка; 4) тщательная заварка кратера и выбор участка перекрытия, обеспечивающего полное его переплавление. Для сварки ряда ответственных конструкций, например технологических трубопроводов, в зарубежной практике часто вводят обязательную зачистку кратера шлифмашинкой после любого прекращения и перед повторным возобновлением процесса сварки.

Запрещается выводить кратер на основной металл, не допускаются случайные ожоги дугой основного металла вне свариваемых кромок. В начальный момент сварки проплавление металла несколько меньше, чем при установившемся режиме, поэтому необходимо снижать скорость сварки, начинать сварку и заканчивать ее на выводных планках.

При сварке лежащих ниже слоев необходимо избегать образования на кромках углублений, узких полостей, особенно при сварке горизонтальных швов, которые могут стать

причиной появления шлаковых включений и несплавлений. Эти слои должны тщательно зачищаться от шлака.

Основные принципы выбора сварочных материалов. Электроды для изготовления сварных конструкций следует выбирать в зависимости от класса материала и его химического состава, назначения и условий эксплуатации конструкции, а также требований, предъявляемых к сварным соединениям. Чаще всего сварные соединения должны быть равнопрочны основному металлу, иметь такие же или более высокие служебные свойства.

Для сварки углеродистых и легированных конструкционных сталей выбирают электроды, обеспечивающие получение наплавленного металла требуемой прочности при удовлетворительной пластичности. По прочности наплавленного металла классифицируются электроды для ручной сварки сталей этого класса в соответствии с ГОСТ 9467—75, который предусматривает выпуск электродов классов прочности Э38—Э150.

Важным при выборе электродов является требование обеспечения высокой стойкости сварных соединений против образования холодных трещин и хрупкого разрушения, особенно при сварке сталей повышенной и высокой прочности, сталей с повышенным содержанием углерода. Для сварки таких сталей должны применяться электроды с покрытием основного типа, обеспечивающие низкое содержание водорода в металле шва.

Для сварки легированных жаростойких и нержавеющих сталей должны применяться электроды, обеспечивающие не только прочностные свойства, но и высокую стойкость против горячих трещин, стойкость против коррозии, долговечность работы конструкции при высоких температурах. Это достигается выбором электродного стержня и покрытия, дающих наплавленный металл требуемого химического состава для данного класса сталей.

Требования к квалификации сварщика. При выполнении шва вручную сварщик должен совершать электродом взаимоувязанные перемещения в трех направлениях: поступательные по оси электрода (обеспечивающие постоянную длину дуги) и вдоль оси шва, а также колебательные движения поперек шва. Кроме того, сварщик должен контролировать течение процесса, предупреждать образование внутренних дефектов, добиваться максимальной производительности, обеспечивая одновременно высокое качество швов.

Подготовка сварщика к ручной дуговой сварке достаточно продолжительна и требует значительно большего времени, чем подготовка оператора механизированной сварки.

При изготовлении конструкций, подведомственных надзорным органам, сварщик проходит аттестацию — проверку его теоретических знаний и практических навыков компетентной комиссией в соответствии с Правилами аттестации сварщиков или требованиями других нормативных документов.

Преимущества и недостатки процесса. Основные преимущества: универсальность (возможность сварки различных металлов и сплавов во всех пространственных положениях); мобильность и технологическая гибкость; простота и сравнительно низкая стоимость оборудования. Недостатки: низкая производительность и высокая удельная стоимость наплавленного металла; сложность и длительность подготовки сварщиков высокой квалификации; выделение вредных для здоровья человека сварочных дымов и аэрозолей.

Область применения. Ручная дуговая сварка может быть использована для соединения большинства применяемых в промышленности металлов и сплавов: углеродистых и легированных конструкционных сталей, в том числе повышенной и высокой прочности: теплоустойчивых сталей; высоколегированных коррозионно-стойких, жаростойких и жаропрочных сталей; чугунов; алюминия и его сплавов; меди и ее сплавов; никеля и его сплавов.

Этот процесс применяется также для наплавки слоев с особыми свойствами.

Ручная сварка непригодна для сварки легкоплавких металлов и металлов, обладающих высокой химической активностью, для которых покрытие не обеспечивает надежную защиту от воздуха, и прежде всего кислорода (титан, цирконий, ниобий и др.).

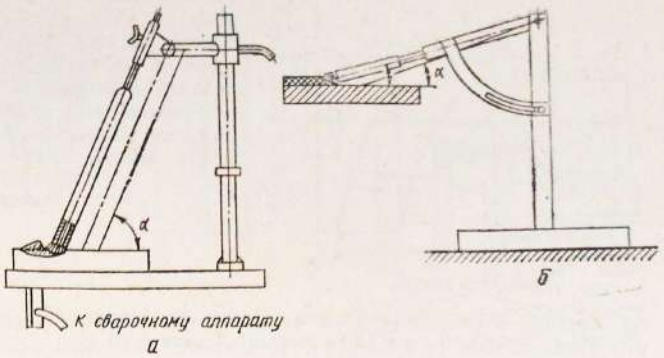


Рис. 2.14. Схема сварки наклонным электродом:
а — с постоянным углом наклона; *б* — с переменным углом наклона.

Простота, универсальность и технологическая гибкость обеспечили ручной дуговой сварке широкое применение в строительной индустрии и ремонтном деле, где этот способ является основным. Среди всех видов сварки плавлением ручная сварка покрытыми электродами занимает главное место в общем объеме наплавленного металла.

Специальные способы сварки покрытыми электродами. *Сварка наклонным электродом.* Электрод расположен наклонно вдоль свариваемой кромки и одним концом опирается на свариваемое изделие. Второй конец закреплен в специальном электрододержателе, скользящем по направляющей (рис. 2.14). После возбуждения дуги на конце электрода образуется козырек из обмазки, препятствующий короткому замыканию. По мере расплавления электрод движется под действием силы тяжести или пружины, формируя валик. Сечение шва регулируется изменением угла наклона.

При сварке наклонным электродом применяются удлиненные стержни. Способ применяется при сварке однотипных швов, при этом один сварщик может одновременно обслуживать 2—3 рабочих поста.

Сварка лежачим электродом. Неподвижный электрод укладывается вдоль свариваемых кромок и обычно прижимается тяжелым медным бруском. Дуга возбуждается между торцом электрода и свариваемым изделием и перемещается по длине электрода, образуя валик. Длина электрода достигает 1200 мм, толщина покрытия несколько больше, чем для обычной сварки. Сварка лежачим электродом особенно удобна в труднодоступных местах. Как и при сварке наклонным электродом, при сварке лежачим электродом один сварщик может обслужить несколько постов.

Сварка в ванне плавящимся электродом применяется обычно для сварки стержней различной формы небольшого сечения. Способ характеризуется увеличенными размерами сварочной ванны, удерживаемой в специальной форме — остающейся стальной или съемной: керамической, медной. Обычно применяются электроды большого диаметра, а также несколько электродов в виде гребенки или пучка.

Другие способы повышения производительности сварки. Более высокая производительность ручной дуговой сварки достигается при использовании электродов с повышенным коэффициентом наплавки (с железным порошком в покрытии) и электродов для сварки с опиранием электрода (с глубоким проплавлением).

Перспективы развития. Доля ручной сварки покрытыми электродами должна непрерывно уменьшаться. Такая тенденция вызвана не только экономическими соображениями и стремлением снизить себестоимость наплавленного металла, но и дефицитом рабочей силы, сложностью и длительностью подготовки сварщиков высокой квалификации. Ручная дуговая сварка должна использоваться лишь в тех случаях, когда применение механизированных способов окажется технически невозможным.

Совершенствование процесса ручной дуговой сварки направлено на создание высокопроизводительных электродов с улучшенными сварочно-технологическими свойствами и

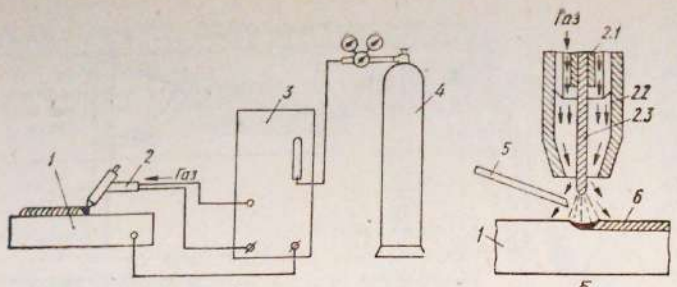


Рис. 2.15. Схема установки для сварки неплавящимся электродом в инертном газе (*а*) и формирования шва (*б*):

1 — свариваемое изделие; *2* — сварочная горелка (2.1 — токоподводящий наконечник, 2.2 — газовое сопло, 2.3 — вольфрамовый электрод); *3* — источник питания с регулирующей и контрольной аппаратурой; *4* — баллон с инертным газом, запорной, регулирующей и контрольной аппаратурой; *5* — присадочный металл; *6* — металл шва.

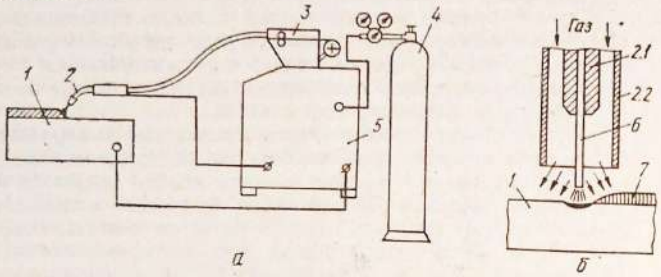


Рис. 2.16. Схема установки для сварки плавящимся электродом в защитном газе (*а*) и формирования шва (*б*):

1 — свариваемое изделие; *2* — сварочная горелка (2.1 — токоподводящий наконечник, 2.2 — газовое сопло); *3* — подающий механизм с кассетой для проволоки; *4* — баллон с регулирующей, запорной и контрольной аппаратурой; *5* — источник питания с регулирующей и контрольной аппаратурой; *6* — электродная проволока; *7* — наплавленный металл.

санитарно-гигиеническими характеристиками, на повышение качества их изготовления, а также на разработку экономичных источников питания с программным управлением режимов сварки.

Одним из наиболее распространенных способов механизированной сварки является сварка в защитном газе. Схема процесса сварки в защитном газе плавящимся и неплавящимся электродами показана на рис. 2.15 и 2.16. Дуга и сварочная ванна изолируются от вредного воздействия атмосферы потоком защитного газа, который оттесняет воздух из зоны сварки.

Классификация разновидностей процесса по типу электрода, составу защитной среды и степени механизации представлена на рис. 2.17.

Сварка неплавящимся электродом в защитном газе

Сущность процесса. Дуга горит между неплавящимся (вольфрамовым) электродом и свариваемым металлом (см. рис. 2.15). Этот способ часто сокращенно обозначается TIG (Tungsten Inert Gas).

Сварку выполняют без присадочного металла (стыковые соединения без разделки кромок или с отбортовкой, торцевые соединения) или с введением в сварочную ванну присадочного металла в виде прутков, специальных профилей и др.

Электроды изготовляют из чистого вольфрама или из вольфрама с добавками лантана, иттрия или тория. Наиболее широкое применение находят электроды диаметром 1—4 мм. Торированные вольфрамовые электроды нежелательны для широкого производственного применения из-за естественной радиоактивности тория.

Защитные газы. Для сварки неплавящимся электродом применяют в основном чистые аргон или гелий, а также их

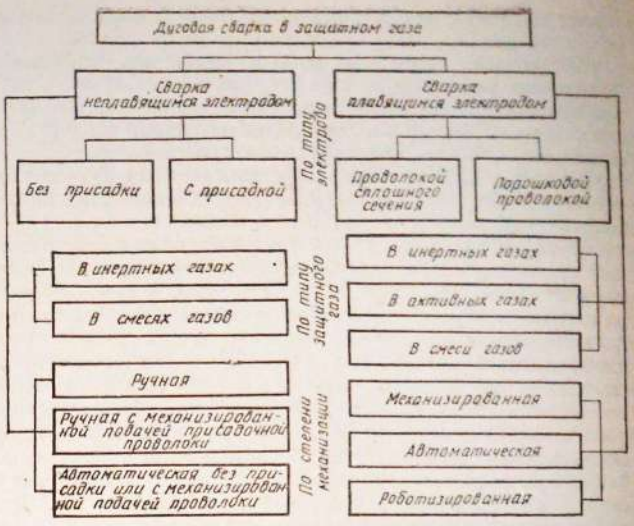


Рис. 2.17. Классификация способов дуговой сварки в защитном газе.

смеси. Активные газы — водород и азот — находят ограниченное применение. Водород в небольших количествах иногда добавляют к аргону или гелию при автоматической сварке нержавеющих сталей, а азот — к аргону при сварке меди и ее сплавов.

Введение окислительных газов приводит к быстрому сгоранию вольфрамового электрода. Если из технологических соображений добавка окислительных газов полезна, применяют комбинированную защиту, когда по внутреннему соплу подают чистый аргон, а по концентрично расположенному внешнему — смесь газов.

Оборудование. Сварку неплавящимся электродом выполняют на постоянном или переменном токе. В качестве источника питания применяются выпрямители, преобразователи или трансформаторы с падающими внешними характеристиками. Для облегчения возбуждения и поддержания устойчивого горения дуги при сварке переменным током в сварочную цепь включается постоянно действующий осциллятор. Осциллятор включается в цепь постоянного тока и служит для возбуждения дуги без короткого замыкания электрода на изделие. Сварку неплавящимся электродом выполняют вручную, с механизированной подачей присадочной проволоки и автоматически, в том числе с механизированной подачей присадочной проволоки. Горелка для ручной сварки имеет систему водяного или воздушного охлаждения, токоподводящую цангу с закрепленным электродом, газозащитное сопло. При сварке с присадочной проволокой по направляющему каналу подается присадочная проволока.

Промышленностью выпускаются универсальные или специализированные установки, укомплектованные источником питания, горелкой, механизмами подачи присадочной проволоки, перемещения горелки, другой необходимой аппаратурой, инструментом и приспособлениями. Рабочий пост должен быть оборудован баллонами с защитными газами или другими системами питания поста газом с регулирующей и контрольной аппаратурой (редуктор, ротаметр, смеситель).

Дуга при сварке неплавящимся электродом, как и при ручной сварке, открыта, отличается высокой излучательной способностью, поэтому сварщик должен быть обеспечен средствами защиты (щиток или маска, защитная одежда)

Технологические особенности процесса и качество сварных соединений. Качество сварного соединения определяется надежностью газовой защиты, правильным выбором рода тока и его параметров, а также умением сварщика применить надлежащую технику.

Эффективность газовой защиты зависит от свойств защитного газа и его чистоты, расхода газа, конструкции, размеров сопла горелки и способа ввода газа в сопло, расположения

горелки относительно изделия, интенсивности воздействия возмущающих факторов.

Аргон — более тяжелый газ и обладает лучшими защитными свойствами по сравнению с гелием. Для обеспечения одинаковой защиты расход гелия должен быть на 30—40 % больше, чем расход аргона. Расход защитного газа устанавливается в зависимости от условий и режимов сварки, типа материала, конструкции изделия и др. Расход газа указывается в технологической документации на сварку конкретных изделий. При нормировании расходов газа следует учитывать потери на продувку газопроводов перед началом работы, задержку истечения газа после обрыва дуги, на неиспользуемый остаток в баллоне. При сварке химически активных металлов и ответственных изделий должны применяться аргон и гелий высокой чистоты.

Защитные свойства струи зависят от конструкции сопла. Струя более устойчива, если применять сопло сложной формы, состоящее из цилиндрической части и конфузора. Для гашения турбулентности потока газа в сопло иногда устанавливают металлические сетки или керамические пористые пластины (газовые линзы). На защитные свойства струи влияет способ ввода газа в сопло. Для улучшения защитных свойств газа его необходимо вводить через мелкие отверстия тонкими струями, направленными на стенки сопла. Оптимальная защита сварочной ванны достигается при расстоянии сопла от свариваемого изделия не более 10 мм, максимальное расстояние — 18 мм.

В реальных условиях струя защитного газа подвергается возмущающему воздействию дуги, конвективных потоков газов. При сварке на ветру увеличивают расход защитного газа, уменьшают зазор между соплом и изделием, применяют экраны и подвижные микрокамеры. Зависимость расхода газа от скорости ветра и расстояния сопла до изделия показана на рис. 2.18 [4].

При сварке высокоактивных металлов необходимо защищать зону металла, нагретую до температуры больше 300 ° С, для чего применяют дополнительные колпаки, защиту обратной стороны шва инертным газом. Наиболее эффективная защита металла шва и зоны термического влияния обеспечивается при сварке в камерах с контролируемой атмосферой, которые иногда применяются для сварки ответственных изделий из высокоактивных металлов (титан, цирконий, тантал).

Выбор рода тока обусловливается особенностями дуги при переменном и постоянном токе. Дуга постоянного тока в аргоне на прямой полярности легко возбуждается, горит спокойно и устойчиво, электрод нагревается мало, допустимы высокие плотности тока. Значительная часть тепла расходуется на расплавление основного металла, что обеспечивает глубокое проплавление. При обратной полярности напряжение дуги выше, на электроде выделяется большое количество тепла, что приводит к его разогреву и оплавлению конца электрода. Это вынуждает применять низкие плотности тока. Глубина проплавления уменьшается. Дуга при обратной полярности оказывает очищающее воздействие, при котором в зоне сварки разрушаются и удаляются оксидные пленки и загрязнения на поверхности основного металла. Это позволяет сваривать алюминий, магний и их сплавы без применения специальных флюсов. Такое же очищающее действие наблюдается при сварке на переменном токе в полупериод, когда анодом является вольфрам.

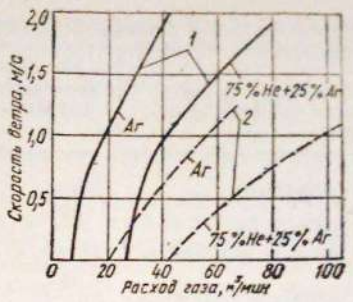


Рис. 2.18. Зависимость расхода газа от скорости ветра и расстояния от сопла до изделия (сварка неплавящимся электродом) при расстоянии от сопла до изделия 5 мм (*1*) и 14 мм (*2*).

Выбор рода тока в зависимости от основного металла и некоторые технологические характеристики дуги переменного и постоянного тока приведены в табл. 2.8.

Ток зависит от толщины свариваемого металла, пространственного положения, конструкции соединения, умения сварщика. Типичные диапазоны токов для электродов различных диаметров приведены в табл. 2.9.

Напряжение дуги зависит от расстояния между концом электрода и основным металлом и защитного газа. При сварке в гелии напряжение на дуге, а при одном и том же токе и количество выделяемого тепла в 1,5—2 раза выше, чем при сварке в аргоне. Дуга в гелии обладает большей проплавляющей способностью.

Геометрия заточки конца электрода также влияет на напряжение дуги. При одних и тех же условиях напряжение тем выше, чем острее конец электрода. От геометрии конца электрода и его стойкости при сварке зависит стабильность процесса. С уменьшением угла заточки увеличивается глубина проплавления и уменьшается ширина шва.

При заданном токе и напряжении скорость сварки определяет количество энергии на единицу длины шва, а изменение удельной энергии сильно влияет на форму и размеры шва.

Выбор защитного газа и присадочной проволоки. Дуга в аргоне отличается высокой стабильностью, но меньшей, чем в гелии, проплавляющей способностью. Аргон несколько тяжелее воздуха и в 10 раз тяжелее гелия, его струя хорошо

Таблица 2.8. **Технологические характеристики дуги при сварке вольфрамовым электродом**

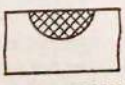
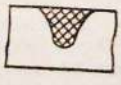
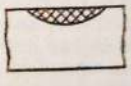
Характеристика	Переменный ток	Постоянный ток	
		прямой полярности	обратной полярности
Форма проплавления			
Очищающее действие	Есть в полупериоде, когда электрод положителен	Нет	Есть
Стойкость электрода	Хорошая	Отличная	Плохая
Рекомендации к применению:			
углеродистые и легированные стали, хромоникелевые сплавы	Может применяться	Рекомендуется	Не рекомендуется
алюминий и его сплавы, магниевые сплавы	Рекомендуется	Не рекомендуется	Может применяться
медь и медные сплавы	Не рекомендуется	Рекомендуется	Не рекомендуется
титан и его сплавы	Может применяться	То же	То же
активные металлы (Zr, Mo, Ta)			

Таблица 2.9. Диапазоны токов для сварки вольфрамовыми электродами [4а]

Вид тока	Защитный газ	Ток, А, при диаметре электрода, мм				
		1—2	3	4	5	6
Переменный	Аргон	20—100	100—160	140—220	200—280	250—300
	Гелий	10—60	60—100	100—160	160—200	200—250
Постоянный:						
прямой полярности	Аргон	95—150	140—180	250—340	300—400	350—450
	Гелий	50—110	100—200	200—300	250—350	300—400
обратной полярности	Аргон	10—30	20—40	30—50	40—80	60—100
	Гелий	10—20	15—30	20—40	30—70	40—80

защищает дугу и зону сварки. Аргон получают в основном из воздуха. Он сжижается при более высокой температуре по сравнению с гелием. Аргон может транспортироваться в баллонах, как и гелий (в сжатом состоянии), а также в жидком виде в изотермических цистернах. Аргон значительно дешевле гелия. С экономической точки зрения аргон как защитный газ предпочтительнее гелия и чаще применяется при сварке.

Чистый гелий или смесь его с аргоном рекомендуется применять для сварки металла большой толщины, а также алюминия и меди, обладающих высокой теплопроводностью, так как дуга в гелии обладает большей проплавляющей способностью.

В качестве присадочного металла используются прутки или проволока сплошного сечения, близкие по составу к основному металлу. Все электродные проволоки, применяемые для сварки плавящимся электродом в защитном газе, могут использоваться в качестве присадочных при сварке неплавящимся электродом. При сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей для повышения стойкости швов против пор следует применять проволоки с небольшим количеством раскислителей (типа Св-08ГС). Для сварки однотипных изделий массового производства присадочный металл может закладываться в разделку шва.

Квалификация сварщика. Для получения качественного шва сварщик должен поддерживать постоянной длину дуги, не допуская коротких замыканий электрода на основной или присадочный металл, иначе в металле шва будут встречаться включения вольфрама.

Техника формирования шва с использованием присадочного металла несколько сложнее, чем при ручной сварке покрытыми электродами. Сложнее также оборудование и аппаратура сварочного поста.

При работе на автоматических установках оператору необходимо подготовить оборудование к работе, установить и настроить его на сварку. Подготовка оператора проще и требует меньших затрат.

Преимущества и недостатки процесса. Преимущества сварки неплавящимся электродом: раздельные ввод тепла и подача присадочной проволоки, что позволяет точно контролировать глубину проплавления и форму шва во всех пространственных положениях; высокие защитные свойства инертных газов; возможность сварки без присадочного металла.

Недостатки способа: зачастую более низкая производительность процесса, чем при сварке вручную; высокая стоимость защитных газов и неплавящихся электродов; возможность загрязнения швов частицами вольфрама.

Область применения. Сварка неплавящимся электродом может использоваться практически для всех металлов, кроме самых легкоплавких: олова, свинца, цинка. Этот процесс является основным при изготовлении тонкостенных труб из нержавеющих сталей и сплавов. Он широко применяется в химическом и энергетическом машиностроении, в самолето- и ракетостроении для соединения легких и химически активных металлов.

Широко используется данный процесс для сварки корневых слоев ответственных технологических трубопроводов и труб энергетического оборудования из углеродистых и низколегированных теплоустойчивых сталей. При этом обеспечивается полное проплавление и даже обратное формирование шва, заполняющие слои часто выполняются более производительными способами.

Разработаны специальные автоматические установки для сварки неповоротных стыков труб различных диаметров как без присадки, так и с присадочным металлом.

Сварка неплавящимся электродом иногда применяется для оплавления кромок швов, выполненных другими способами. Заплавляются подрезы, обеспечивается плавный переход шва к основному металлу, повышается прочность соединения при переменных нагрузках.

Используются различные методы повышения эффективности процесса: нанесение на поверхность свариваемых кромок бескислородных флюсов и паст, применение газообразных и жидких галогенидов, подача предварительно подогретой присадочной проволоки и др.

Сварка плавящимся электродом в защитном газе

Дуга возбуждается и поддерживается между непрерывно подающейся электродной проволокой и свариваемым металлом (см. рис. 2.16). В зависимости от химической активности защитных газов различают сварку в инертном или активном газе (смесях газов). Эти способы сокращенно обозначаются соответственно MIG (Metal Inert Gas) и MAG (Metal Active Gas).

Сварку практически всегда выполняют постоянным током обратной полярности. Лишь при использовании электродных проволок, активированных редкоземельными элементами, сварку проводят на прямой полярности.

Теплом дуги расплавляются основной и электродный металлы, образуя сварочную ванну. По мере удаления дуги ванна кристаллизуется и формируется сварной шов.

Перенос и разбрызгивание электродного металла. Перенос электродного металла через дуговой промежуток при сварке плавящимся электродом в защитном газе может происходить тремя путями (рис. 2.19): 1) при коротких замыканиях промежутка; 2) отдельными довольно редкими каплями, размерами больше диаметра проволоки (крупнокапельный перенос); 3) мелкими каплями, стекающими с конца электрода (струйный перенос). Вид переноса зависит от рода тока, его величины и плотности, химического состава проволоки, вылета электрода, защитного газа и характеристик источника питания.

Короткие замыкания происходят при сравнительно малых токах и напряжениях, когда дуговой промежуток мал и капля, образовавшаяся на конце электрода, периодически замыкает его. При таком переносе размеры сварочной ванны относительно невелики, она быстро кристаллизуется, что важно при сварке тонкого металла, сварке элементов с повышенными зазорами и во всех пространственных положениях.

Перенос металла происходит при разрушении шейки, образовавшейся на границе жидкого и твердого металлов в результате перегрева и воздействия электродинамических сил. При использовании источников питания с определенными динамическими характеристиками или наложении импуль-

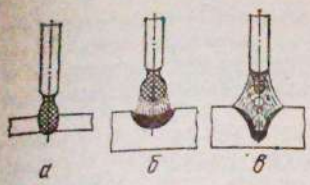


Рис. 2.19. Схема переноса металла при сварке плавящимся электродом в защитном газе: *а* — при коротких замыканиях промежутка; *б* — крупнокапельный перенос; *в* — струйный перенос.

сов разбрызгивание металла в момент взрыва перемычки может быть незначительным.

При сварке с короткими замыканиями защитный газ оказывает незначительное влияние на этот тип переноса. Обычно используют проволоку диаметром не более 1,2 мм, так как с увеличением диаметра электрода перенос металла сопровождается более мощным тепловым и механическим импульсами со значительным разбрызгиванием.

Крупнокапельный перенос наблюдается при относительно низких плотностях тока. Длина дуги должна быть больше, чем размер капли.

В инертном газе капли переносятся через дуговой промежуток соосно с электродом с незначительным разбрызгиванием.

При защите дуги углекислым газом образующаяся на конце электрода капля всегда смещается с оси электрода под действием избыточного давления в зоне активного пятна в результате диссоциации молекул CO_2. Капля растет до такого объема, когда ее вес превышает силы, удерживающие каплю на конце электрода, и она отрывается. Разрушение перемычки между каплей и электродом в момент отрыва капли сопровождается выбросом мелких брызг.

Струйный перенос происходит, когда с увеличением тока растет электродинамическая сила, уменьшается размер капель, и при определенном значении тока, называемом критическим, капельный перенос металла переходит в струйный. Мелкие капли, срываемые с конца электрода электромагнитными силами, следуют столь часто, что иногда образуют как бы непрерывную тонкую струйку жидкого металла.

Струйный перенос обычно наблюдается при сварке в чистых инертных газах или при содержании их в смеси более 80 %.

Кислород уменьшает поверхностное натяжение металла, поэтому с увеличением его содержания в смеси с аргоном критический ток уменьшается. Добавка других газов (N_2, H_2, CO_2) приводит к увеличению критического тока.

Величина критического тока также зависит от химического состава проволоки, ее диаметра и вылета. Например, критические значения тока при защите дуги аргоном для проволок различного типа диаметром 1,6 мм составляют для низкоуглеродистых сталей более 280 А, для нержавеющих сталей 240 А, для алюминия 180 А, для меди 310 А и для бронзы 270 А. Чем меньше диаметр электрода и больше вылет, тем меньше критический ток.

Критический ток в среде аргона можно существенно уменьшить, если электродную проволоку активировать РЗМ путем введения их в состав проволоки или нанесения на ее поверхность.

При сварке в углекислом газе с увеличением тока капли измельчаются, однако обычно струйный перенос не наблюдается. Лишь при введении в проволоку элементов с низким потенциалом ионизации (РЗМ) можно получить в углекислом газе или смеси его с кислородом струйный перенос.

Возможная область применения тех или иных сварочных материалов и режимов сварки определяется и характером переноса электродного металла. От характера переноса зависит уровень разбрызгивания, степень выгорания легирующих элементов, формирование и внешний вид швов. Наибольшее разбрызгивание наблюдается при сварке в углекислом газе в среднем диапазоне режимов. Разбрызгивание электродного металла при сварке в диапазоне 280—380 А проволокой марки Св-08Г2С диаметром 2,0 мм может достигать 12—14 %. Уменьшение диаметра проволоки смещает максимум разбрызгивания в сторону меньших значений тока.

От степени разбрызгивания зависят не только потери электродного металла. Снижается также производительность сварки, увеличиваются расходы на зачистку сварных узлов от брызг, нарушается стабильность защиты из-за засорения сопла горелки.

Среди существующих методов предупреждения разбрызгивания следует отметить прежде всего выбор оптимальных режимов сварки, применение источников питания с программным управлением, переносом электродного металла импульсами тока, использование проволок с РЗМ, более широкое применение проволоки диаметром не более 1,4 мм, применение смесей газов на основе аргона.

В зависимости от характера переноса металла изменяется в широких пределах интенсивность теплового и механического воздействия дуги на сварочную ванну и, следовательно, геометрические параметры швов.

При малых токах, когда происходит крупнокапельный перенос, проплавление имеет форму кругового сегмента. При токе больше критического и струйном переносе металла проплавление имеет местное углубление в результате воздействия сосредоточенного потока электродного металла (см. рис. 2.19, *в*). Форма и размеры проплавления изменяются в зависимости от состава защитного газа. Добавки кислорода или углекислого газа к аргону позволяют избежать глубокого и узкого проплавления, характерного для сварки в чистом аргоне (рис. 2.20).

При сварке сталей в чистом аргоне иногда наблюдается блуждание дуги, что приводит к образованию дефектов формирования шва: неравномерной ширины, подрезов, наплывов и грубой чешуйчатости. Добавка кислорода или углекислого газа стабилизирует дугу, швы имеют гладкую ровную поверхность без подрезов, с плавным переходом к основному металлу.

Защитные газы. Как и при сварке неплавящимся электродом, в качестве защитных газов широко применяются инертные газы аргон и гелий, а также их смеси. Эти газы в основном используются для сварки алюминия, титана, других химически активных металлов и их сплавов.

Для сварки углеродистых и легированных сталей широко применяется диоксид углерода (углекислый газ), смеси инертных газов с активными различного состава, а также смеси активных газов. Находит ограниченное применение и азот. Его используют в качестве защитной среды при сварке меди, по отношению к которой азот является практически инертным газом. Как аустенизатор азот иногда используют для сварки аустенитных сталей. Для сварки цветных металлов и аустенитных сталей применяют в отдельных случаях смесь аргона с водородом.

Выбор газа определяется не только его защитными свойствами. Защитный газ влияет также на характер переноса электродного металла, форму проплавления, формирование и внешний вид шва.

Состав наиболее широко применяемых газов и газовых смесей, область их применения и краткая характеристика даны в табл. 2.10.

Электродные проволоки. Наиболее широко применяются проволоки сплошного сечения диаметром 0,5—2,0 мм — для механизированной сварки и диаметром до 5,0 мм — для автоматической сварки. Для сварки плавящимся электродом в инертном газе обычно применяются проволоки, близкие по составу к основному металлу.

Углекислый газ и другие защитные среды, содержащие активные газы, оказывают на металл сварочной ванны окисляющее воздействие. При недостаточном количестве раскислителей выделяется оксид углерода, являющийся причиной образования пор в металле шва. Поэтому при сварке в угле-

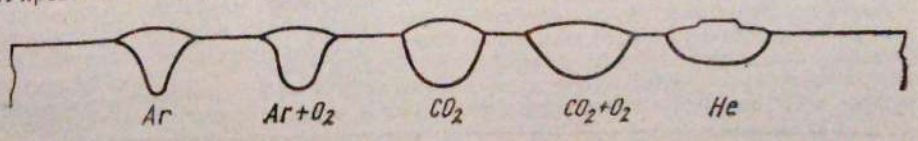


Рис. 2.20. Влияние защитного газа на форму проплавления.

кислом газе применяют кремнемарганцевую проволоку, которая раскисляет металл шва, препятствует образованию пор, обеспечивает получение швов с хорошими механическими свойствами.

Введение в кремнемарганцевую проволоку других легирующих элементов позволяет получить ряд электродных проволок для сварки в углекислом газе большинства марок углеродистых и низколегированных сталей с широким диапазоном прочностных и вязких свойств.

Следует также отметить, что при содержании углерода в электродной проволоке и основном металле менее 0,07 % металл шва при сварке в углекислом газе науглероживается. Поэтому этот способ неприменим для сварки сталей с низким содержанием углерода, если повышенное содержание углерода в металле шва снижает работоспособность соединения.

Сварка в углекислом газе проволокой сплошного сечения отличается высокой степенью разбрызгивания, а часто и неудовлетворительным формированием шва, особенно если применяется проволока диаметром 1,6—2,0 мм. В ряде случаев металл шва обладает недостаточной вязкостью при низких температурах.

Применение порошковой проволоки, в сердечник которой вводятся шлакообразующие вещества, раскислители, легирующие элементы, в сочетании с дополнительной защитой углекислым газом позволяет хорошо раскислить металл шва, снизить содержание газов и неметаллических включений, получить шов с плавным переходом к основному металлу при высокой производительности. Используются порошковые проволоки диаметром 1,6—3,2 мм, в последнее время начали изготовляться проволоки меньшего диаметра.

Проволока поставляется в бухтах, мотках или катушках массой от нескольких килограммов до нескольких десятков килограммов.

Оборудование может быть универсальным или специализированным. Сварку выполняют на сварочном посту или установке. В состав поста (установки) входит сварочное, технологическое, механическое, вспомогательное оборудование и инструмент.

Технологическое оборудование — установочные и зажимные приспособления, стенды, а также механическое и вспомогательное оборудование — кантователи, манипуляторы, вращатели, подъемные площадки, столы и др.— не зависит от способа сварки, а определяется конструкцией узла. Это оборудование применяется и для других способов сварки (ручной, под флюсом, без дополнительной защиты).

Сварочное оборудование состоит из источников питания и сварочных аппаратов с приборами управления и регулирования процесса.

Для сварки плавящимся электродом в защитном газе применяются источники питания постоянного тока (выпрямители или преобразователи) с жесткой или пологопадающей характеристикой.

В зависимости от степени механизации процесса сварочные аппараты делятся на шланговые полуавтоматы и универсальные аппараты для автоматической сварки.

Наиболее важным узлом любого сварочного аппарата является горелка. Горелка должна быть прочной, удобной в работе, обеспечивать стабильность процесса сварки, эффективную газовую защиту, легкую смену изнашивающихся деталей. Горелка для механизированной сварки (ручная) должна иметь небольшую массу.

Ручные горелки для сварки плавящимся электродом выполняют с держателем молоткового или пистолетного типа. В держателе закрепляется токоподводящий наконечник и сопло, формирующее защитную газовую струю. К держателю крепятся направляющий канал с проходным диаметром, за-

Таблица 2.10. Состав, характеристика и применение защитных газов

Состав защитной среды, %				Химическая активность	Свариваемые металлы	Преимущества	Недостатки
Ar	He	CO_2	O_2				
100	—	—	—	Инертный	Практически все металлы. Для сварки сталей в чистом виде почти не применяется	Тяжелее воздуха, обеспечивает хорошую защиту. Высокая стабильность дуги. Струйный перенос при токах выше критического. Очищающее действие при сварке алюминия, магния и их сплавов. Поставляется в баллонах и изотермических цистернах	Высокая стоимость. Нестабильность катодного пятна, блуждание дуги и ухудшение формирования шва
—	100	—	—	То же	Медь, алюминий, некоторые марки нержавеющих и жаропрочных хромоникелевых сплавов	Обеспечивает более интенсивный нагрев металла. Высокая проплавляющая способность. В основном поставляется в баллонах	Более высокая стоимость, чем аргона. Легче воздуха. Увеличенный расход для хорошей защиты
10—50	50—90	—	—	»	Алюминий, магний, медь большой толщины	Более высокая интенсивность выделения тепла, чем при сварке в аргоне. Лучшие защитные свойства струи, чем чистого гелия. Более высокая стойкость против пор	Высокая стоимость. Потребность в специальных смесителях (иногда готовая смесь поставляется в баллонах)
—	—	100	—	Окислительный	Углеродистые, низколегированные и некоторые марки нержавеющих высоколегированных сталей	Обеспечивает хорошую защиту. Благоприятная (линзообразная) форма проплавления. Допустима высокая скорость сварки. Низкая стоимость. Поставляется в баллонах и изотермических цистернах	Высокая степень разбрызгивания. Окисляющее и науглероживающее воздействие на металл

Продолжение табл. 2.10

Состав защитной среды, %				Химическая активность	Свариваемые металлы	Преимущества	Недостатки
Ar	He	CO_2	O_2				
98—99	—	—	1—2	Слабоокислительный	Нержавеющие стали, медные сплавы, содержащие раскисляющие элементы	Высокая стабильность и устойчивость процесса. Струйный перенос при более низких значениях критического тока, чем в аргоне. Хорошее формирование, отсутствие подрезов	Интенсивное излучение дуги
95—97	—	—	3—5	Окислительный	Низколегированные стали	То же. Повышенная стойкость против пор	То же
50—75	—	25—50	—	То же	Углеродистые и низколегированные стали	Низкая степень разбрызгивания. Хорошее формирование шва. Возможность сварки во всех пространственных положениях. Высокая ударная вязкость металла шва	»
70—75	—	20—25	5	»	То же	То же	
—	—	70—85	15—30	Сильноокислительный	Углеродистые и отдельные марки низколегированных сталей	Повышенная стойкость швов против трещин. Более низкая степень разбрызгивания, меньшая привариваемость брызг. Хорошее формирование шва. Низкая стоимость	Повышенное выгорание легирующих элементов. Повышенная жидкотекучесть металла

висящим от диаметра проволоки, токоподвод, газоподводящий канал.

В зависимости от номинального сварочного тока и продолжительности работы горелки могут быть выполнены с воздушным (160, 315 А) и водяным (315, 500 и 630 А) охлаждением.

Быстро изнашивающиеся детали горелки — токоподводящий наконечник и сопло. Наибольшей износостойкостью обладают наконечники из меди, изготовляемые точением или штамповкой, а также полученные методом порошковой металлургии (например, из смеси медного и вольфрамового порошков). Наибольшей долговечностью обладают сопла, изготовленные из медной трубки. Им легко придать оптимальную форму, они отличаются высокой теплопроводностью, что снижает их нагрев и налипание брызг. Для уменьшения налипания брызг сопла желательно полировать и хромировать или покрывать слоем силиконовой смазки.

Сварка плавящимся электродом выполняется в основном полуавтоматом — сварочным аппаратом, в котором механизирована подача электродной проволоки, а перемещение горелки вдоль шва осуществляется вручную.

Шланговые полуавтоматы различной конструкции выпускают на токи от 150 до 500 А. В зависимости от размещения механизма подачи — на корпусе сварочной горелки или вне ее — различают полуавтоматы тянущего и толкающего типов. Полуавтоматы тянущего типа применяются при сварке проволоками малых диаметров, имеющими низкую жесткость. Выпускаются также полуавтоматы тянуще-толкающего типа. Полуавтоматы могут быть переносными, ранцевыми, передвижными и стационарными.

Аппараты для дуговой автоматической сварки позволяют выполнять зажигание дуги, подачу электрода в зону дуги, передвижение дуги вдоль свариваемых кромок, направление электрода по шву, защиту дуги и сварочной ванны, прекращение процесса сварки с совмещением операций заварки кратера и прекращения подачи защитного газа через определенный промежуток времени.

Аппараты делятся на переносные, подвесные и самоходные. Переносные аппараты чаще всего выполняют в виде сварочных головок, автоматов для сварки неповоротных стыков труб и др. Подвесные сварочные головки применяют, когда в процессе сварки передвигается изделие или когда головка закреплена на перемещающейся части установки. Широкое промышленное применение получили самоходные аппараты, передвигающиеся вдоль свариваемых кромок со скоростью сварки. В зависимости от конструкции перемещающего устройства автоматы бывают следующих типов: тракторного, кареточного, консольного и портального.

Для сварки отдельных типов швов, соединений или однотипных изделий выпускаются специальные установки. Они содержат сварочное, механическое и вспомогательное оборудование; могут иметь струйную защиту или специальные камеры с защитной контролируемой атмосферой.

Существует индивидуальная и централизованная системы питания сварочных постов (установок) защитным газом. При индивидуальной системе каждый сварочный пост питается от одного или нескольких баллонов с защитным газом и комплектуется редуктором, запорной и контрольно-измерительной аппаратурой, а при сварке в углекислом газе — и подогревателем. Вся аппаратура поставляется совместно со сварочным агрегатом. При централизованной системе защитный газ по трубопроводу подается на каждый пост от рампы с баллонами или изотермической цистерны.

Особенности технологии сварки. Решающее влияние на качество сварного соединения оказывает режим сварки, т. е. совокупность основных характеристик (параметров) сварочного процесса. Основными параметрами режима сварки плавящимся электродом в защитном газе является диаметр и вылет электродной проволоки, величина тока, напряжение на дуге, скорость сварки, наклон и колебания электрода, состав и расход защитного газа. Выбор параметров режима сварки зависит от химического состава, структуры и толщины основного металла, состава электродной проволоки, пространственного положения и требуемых свойств сварного соединения.

Режим сварки определяет форму и размеры шва, ширину зоны термического влияния, скорость охлаждения металла шва и околошовной зоны, долю основного и электродного металла в шве, производительность процесса. При выборе

Таблица 2.11. Зависимость параметров режима сварки от скорости подачи проволоки

Вылет, мм	Скорость подачи проволоки, м/ч	Диаметр электрода 1,6 мм			Диаметр электрода 2,0 мм		
		I, А	U, В		I, А	U, В	
			холостого хода	на дуге *		холостого хода	на дуге *
20	81	100	27	23—24	150	30	24—25
	104	120	28	24—25	180	32	24—25
	137	140	30	25—26	230	34	26—27
	172	170	31	25—26	290	39	29—30
	215	210	33	26—27	360	43	31—32
	283	260	34	26—27	430	48	32—33
	363	300	37	27—28	490	49	33—34
	453	350	40	29—30	540	52	34—35
	598	420	46	32—33	620	54	35—36
40	81	80	34	27—28	130	33	28—29
	104	100	34	27—28	160	34	28—29
	137	120	35	28—29	180	36	29—30
	172	150	36	29—30	230	41	32—34
	215	180	37	30—31	280	42	33—34
	283	210	39	31—32	340	44	34—35
	363	260	40	32—33	380	48	34—35
	453	290	42	32—33	460	50	35—36
	598	360	43	33—34	520	52	35—36
60	81	60	34	29—30	110	34	29—30
	104	80	35	29—30	130	35	29—30
	137	100	36	30—31	170	37	30—31
	172	130	38	31—32	200	38	31—32
	215	150	39	32—33	240	40	32—33
	283	190	40	32—33	290	41	33—34
	363	220	41	33—34	340	44	35—36
	453	250	42	34—35	400	48	36—37
	598	310	45	35—36	470	53	37—38

* Суммарное напряжение на дуге и вылете.

режимов сварки следует руководствоваться требованиями к качеству соединений при максимальной производительности и минимальной стоимости процесса.

Диаметр электродной проволоки выбирают, учитывая толщину металла и пространственное положение. Механизированная сварка сталей в защитном газе проводится проволоками следующих диаметров: до 1,4 мм — с обычным вылетом во всех пространственных положениях; 1,2—2,0 мм — с обычным и увеличенным вылетом в нижнем положении, а также в горизонтальном положении стыковых швов с разделкой кромок. Диаметр применяемой электродной проволоки ограничивают при сварке ответственных конструкций, сварные соединения которых должны обладать высокой стойкостью против хрупкого разрушения. Например, если при сварке в углекислом газе конструкций из низколегированных сталей в северном исполнении применяется проволока марки Св-08Г2С, то ее диаметр не должен превышать 1,2 мм.

Таблица 2.12. **Зависимость вылета электрода и расхода защитного газа от диаметра проволоки**

Диаметр проволоки, мм	Вылет, мм	Расстояние от сопла до свариваемого металла, мм	Расход газа, л/мин
0,8—1,0	8—11	8—10	5—10
1,2	8—15	8—15	8—12
1,4	8—20	8—18	8—16
1,6	15—22, 35—40	14—20	12—18
2,0	16—25, 50—60	15—25	15—20

Сварочный ток определяется диаметром электрода и устанавливается скоростью подачи электродной проволоки. Для каждого значения диаметра проволоки определенного состава существует диапазон тока, в котором обеспечивается устойчивость процесса, минимальное разбрызгивание и удовлетворительное формирование шва.

Напряжение на дуге устанавливается в зависимости от силы тока с учетом формирования шва, разбрызгивания металла и производительности процесса. При чрезмерно высоком напряжении в швах образуются поры, увеличивается разбрызгивание, появляются подрезы. Напряжение на дуге при сварке в гелии должно быть выше, чем при сварке в аргоне. С увеличением вылета напряжение на дуге должно быть также увеличено.

Для сварки плавящимся электродом в основном применяются механизмы подачи проволоки с постоянной скоростью. Значение тока в зависимости от скорости подачи проволоки, диаметра и вылета электрода, а также номинальное напряжение на дуге, при котором обеспечивается удовлетворительное формирование и минимальное разбрызгивание для данного тока, приведены в табл. 2.11. Данные получены при использовании стандартных источников питания ВС-300, ВС-600 и механизма подачи полуавтоматов А-537 или ПДГ-508 (низколегированная проволока, углекислый газ).

Видно, что с увеличением вылета при одной и той же скорости подачи проволоки ток уменьшается. С увеличением вылета скорость сварки увеличивается, даже если значение тока остается постоянным, так как при этом количество расплавленного металла в единицу времени больше. В случае применения проволоки диаметром 1,6—2,0 мм сварку в нижнем положении швов большого сечения рекомендуется выполнять с вылетом 40—60 мм. Дополнительного направления проволоки не требуется, так как она обладает достаточной жесткостью.

Скорость сварки обычно находится в пределах 15—80 м/ч, ее выбирают с учетом качества формирования и требу-

емых свойств шва. Сварку металла большой толщины лучше выполнять на большей скорости более узкими валиками. При малой скорости сварки размеры сварочной ванны увеличиваются, ухудшается газовая защита расплавленного металла в результате интенсивных конвективных потоков воздуха, в шве могут возникать поры.

При сварке как с обычным, так и с увеличенным вылетом электрода для обеспечения надежной защиты расплавленного металла газом расстояние от торца сопла горелки до свариваемого металла остается постоянным. Рекомендуемое значение обычного вылета, расстояние от сопла горелки до изделия в зависимости от диаметра проволоки приведены в табл. 2.12.

Сварку плавящимся электродом в защитных газах можно выполнять как вертикально расположенным электродом, так и с наклоном его углом вперед и углом назад. Зависимость глубины проплавления и ширины шва от угла наклона показана на рис. 2.21. При сварке углом назад, как и при сварке на подъем, глубина проплавления несколько увеличивается, а ширина шва уменьшается.

Механизированная сварка обычно выполняется с колебаниями конца электрода.

Расход защитного газа зависит от диаметра проволоки, типа соединения и взаимного расположения деталей, наличия сносящих потоков воздуха, конструкции сопла и др. Расход защитного газа при сварке в цеховых условиях приведен в табл. 2.12. Наименьшее количество газа расходуется при сварке тавровых соединений в положении «в лодочку», наибольшее — при наружных угловых соединениях и соединениях с отбортовкой кромок. В последних случаях для улучшения газовой защиты расход защитного газа рекомендуется увеличить на 10 % по сравнению с данными, приведенными в таблице.

В предыдущей главе описано, как обеспечить надежную защиту при сварке неплавящимся электродом. Все это относится и к сварке плавящимся электродом. Необходимо лишь добавить, что в последнем случае, особенно при защите дуги углекислым газом, нарушение газовой защиты часто происходит из-за налипания брызг на внутренней поверхности сопла, поэтому его необходимо периодически очищать.

Квалификация сварщика. Техника механизированной сварки плавящимся электродом проще, чем техника ручной сварки или сварки неплавящимся электродом, что связано с автоматической подачей электродной проволоки и меньшей сложностью поддержания постоянной длины дуги. Сокращается время подготовки сварщика, качество сварных швов меньше зависит от его квалификации.

Преимущества и недостатки. Сварка плавящимся электродом в защитном газе получила широкое распространение благодаря следующим преимуществам: перед ручной сваркой — высокая производительность; низкая стоимость; минимальные затраты времени на освоение; широкая возможность механизации и автоматизации; перед механизированной сваркой под флюсом — возможность сварки в различных пространственных положениях; возможность наблюдения за ванной и дугой. Недостатки процесса: высокая степень разбрызгивания при сварке в углекислом газе; невозможность выполнения сварки на открытых площадках без дополнительной защиты места сварки экранами от ветра и сквозняков; более высокая стоимость оборудования; ограниченная область обслуживания.

Область применения и перспективы развития. Сварка плавящимся электродом в защитном газе по объему применения уступает лишь ручной и контактной сварке.

Для изготовления конструкций из углеродистых и низколегированных сталей наиболее широко применяется сварка в углекислом газе. Ввиду преимуществ процесса этот способ должен практически вытеснить ручную сварку при изготовлении узлов в цеховых условиях.

Сварка плавящимся электродом в инертных газах используется для изготовления конструкций из алюминия, меди, титана, никеля, других тугоплавких и химически активных металлов и сплавов.

Сварка в защитном газе наиболее пригодна для роботизации.

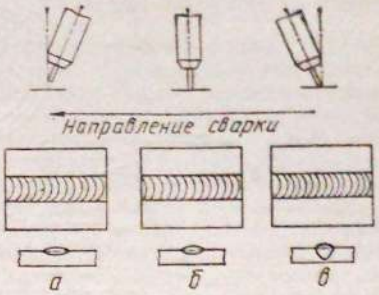


Рис. 2.21. Влияние угла наклона на форму шва:
а — сварка углом вперед; *б* — сварка при вертикальном расположении электрода; *в* — сварка углом назад.

Дальнейшее развитие процесса связано с увеличением выпуска электродных проволок малого диаметра (до 1,4 мм), проволок с РЗМ и другими активирующими добавками, порошковых проволок, обеспечивающих высокое качество сварных швов. Для значительного увеличения доли автоматизированной сварки и роботов нужны сварочные материалы с низкой степенью разбрызгивания, источники с программным управлением режимом сварки. Следует также увеличить производство оборудования для хранения и перевозки газов, увеличить выпуск и снизить стоимость аргона и гелия, повысить чистоту защитных газов.

Резко повысить производительность труда и снизить себестоимость наплавленного металла можно при использовании сварки в узкую щелевую разделку, с принудительным формированием шва, с дополнительным подогревом проволок, многодуговой и многоголовочной сварки.

Сварка под флюсом

Сущность процесса. Схема процесса сварки представлена на рис. 2.22. Дуга возбуждается между непрерывно подаваемой проволокой и основным металлом. В процессе сварки электрод и расплавленный металл со всех сторон укрыты слоем сыпучего вещества — флюса, насыпаемого на основной металл из специального бункера или флюсоаппарата, предназначенного также для последующей уборки нерасплавившегося флюса после остывания шва.

Дуга находится в заполненном парами и газами пузыре, сводом которого является прослойка жидкого шлака. Наличие пузыря обеспечивает надежную изоляцию зоны дуги от контакта с воздухом. Столб и ореол дуги при сварке под флюсом невидимы для глаз. Контроль за ходом процесса ведут по приборам и указателю положения электрода.

Плавление электродной проволоки происходит за счет тепловой энергии дуги и нагрева ее на участке вылета проходящим током. Средняя скорость плавления электрода зависит от его состава, вылета, силы и плотности тока, рода тока и других факторов. Жидкий металл с конца проволоки в виде капель и пара переносится на основной металл, смешивается с жидким металлом, образующимся при расплавлении соединяемых кромок. Формируется единая сварочная ванна, размеры и объем которой зависят от режимов сварки.

После удаления дуги идет процесс остывания и кристаллизации металла сварочной ванны. Образуется шов, покрытый коркой затвердевшего шлака. Химический состав металла шва зависит от состава и долей в нем основного и электродного металлов, а также от взаимодействия металла с газовой фазой и шлаком. Доля электродного металла в металле шва в среднем составляет до 35 %. Практически весь электродный металл участвует в образовании шва. Потери на угар и разбрызгивание не превышают 1—3 %. Набрызгивание отсутствует. Отношение массы расплавленного флюса к массе расплавленного электродного металла составляет примерно 1 : 1.

Основное промышленное применение находит сварка под флюсом одной электродной проволокой сплошного сечения, и прежде всего автоматическая сварка. Сварка полуавтоматом используется в ограниченном объеме.

Сварку, как правило, ведут в нижнем положении. Возможна сварка горизонтальных и вертикальных швов. Сварка

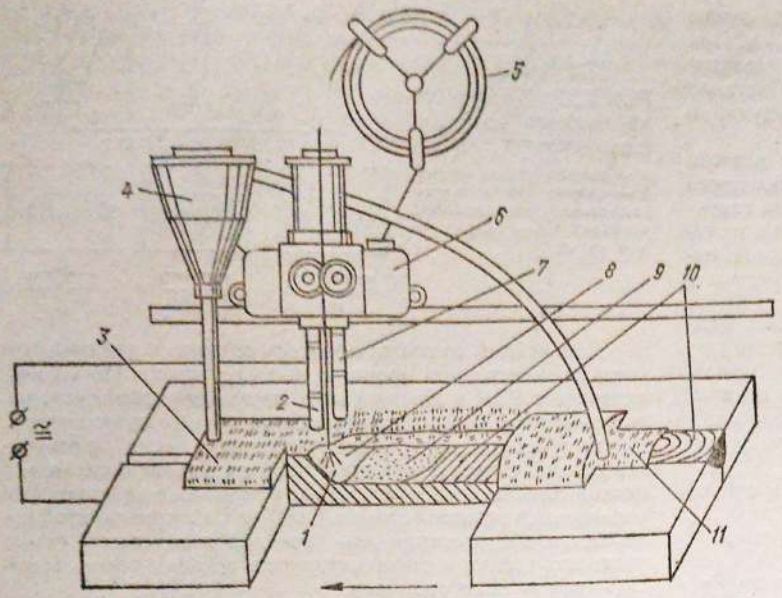


Рис. 2.22. Схема автоматической сварки под флюсом:

1 — дуга; *2* — электродная проволока; *3* — флюс; *4* — бункер для флюса; *5* — бухта проволоки; *6* — самоходная головка; *7* — токоподводящий мундштук; *8* — жидкий шлак; *9* — сварочная ванна; *10* — шов; *11* — шлаковая корка.

вертикальных швов ведется с принудительным удержанием сварочной ванны. Получены обнадеживающие результаты при сварке под флюсом в потолочном положении с принудительной подачей флюса. Этот вариант может найти применение при сварке корневых слоев с полным проплавлением сосудов, строительстве магистральных трубопроводов и пр.

Сварка под флюсом может осуществляться переменным и постоянным токами.

Сварочные материалы. Свойства соединений при сварке под флюсом зависят главным образом от применяемых сварочных материалов: плавящегося электрода и флюса. В качестве плавящегося электрода наиболее широко применяется электродная проволока сплошного сечения диаметром 2—5 мм. Используют также порошковую проволоку, холоднокатаную или специальную ленту, особенно при наплавочных работах.

Химический состав электродной проволоки выбирают в соответствии с химическим составом основного металла.

Флюсы классифицируются по следующим основным признакам: назначению, способу изготовления, химическому составу, строению и размеру частиц. Современные флюсы в зависимости от их назначения и преимущественного применения разделяются на флюсы, предназначенные для дуговой и электрошлаковой сварки и для наплавки. Различают флюсы для сварки и наплавки углеродистых и легированных сталей, цветных металлов и сплавов.

В настоящее время практическое значение имеют плавленые и керамические флюсы. Иногда применяют флюсы-смеси, состоящие из крупинок различных материалов и (или) флюсов. Большим недостатком механических смесей является склонность их к разделению при транспортировке и в процессе сварки вследствие различных плотности, формы и размеров частиц.

По химическому составу сварочные флюсы могут быть разделены на три группы: оксидные, солевые и солеоксидные. Оксидные флюсы состоят из оксидов металлов и могут содержать до 10 % фтористых соединений. Их применяют преимущественно для сварки углеродистых и низколегированных сталей. В зависимости от содержания кислотных и основных оксидов различают кислые, нейтральные и основные флюсы. Флюсы солевого типа состоят из фтористых и хлористых солей металлов, других не содержащих кислород химических соединений. Их используют для сварки активных металлов (титан, алюминий и др.). Флюсы солеоксидного типа состоят из фторидов или оксидов металлов. Применяются для сварки и наплавки легированных сталей.

В зависимости от строения частиц флюсы разделяют на стекловидные, пемзовидные и кристаллические. Пемзовидные флюсы имеют более низкую объемную массу, чем стекловидные и кристаллические.

При сварке флюсы выполняют ряд функций, важнейшими из которых являются физическая изоляция сварочной ванны от атмосферного воздействия, стабилизация дугового разряда, химическое взаимодействие с жидким металлом, легирование металла ванны и формирование поверхности шва.

Изолирующее действие флюса зависит от размеров его частиц и физического строения. Лучшей изолирующей способностью обладают флюсы с плотным строением, мелкой гранулящией или определенным соотношением частиц различного гранулометрического состава, обеспечивающими плотную их укладку.

В состав флюсов входят обычно оксиды металлов с низким потенциалом ионизации, что обеспечивает достаточно устойчивое протекание процесса.

Металлургические процессы между расплавленным флюсом и жидким металлом сварочной ванны зависят от химического состава флюса. Сильноокислительные флюсы (АН-17М, АН-43) обеспечивают высокое качество сварных соединений, однако вызывают больший угар легирующих элементов, чем низкокремнистые безокислительные флюсы. В этом случае следует применять сварочные проволоки с более высоким содержанием легирующих элементов.

Значительное легирование металла сварочной ванны может быть достигнуто при использовании керамических флюсов, в состав которых вводятся порошкообразные ферросплавы или металлы.

Формирующая способность флюсов зависит не только от их вязкости при высоких температурах и газопроницаемости, но и от мощности сварочной дуги. Лучшее формирование, особенно при высоких скоростях сварки мощными дугами, обеспечивают флюсы, имеющие пемзовидное строение.

Флюсы должны храниться в сухом месте. Для повышения стойкости против пор флюсы перед использованием должны быть прокалены при температуре, указанной в сопроводительной документации.

Принципы выбора сварочных материалов. Определяющим при выборе флюса является состав основного металла.

Для сварки углеродистых конструкционных сталей применяются следующие сочетания флюса и электродной проволоки: а) плавленый высококремнистый марганцевый флюс и низкоуглеродистая и марганцевая сварочная проволока; б) плавленый высококремнистый безмарганцевый флюс и марганцевая сварочная проволока; в) керамический флюс и низкоуглеродистая или марганцевая сварочная проволока.

В промышленности наиболее широко используют первое сочетание флюса и проволоки (флюс АН-348, ОСЦ-45 и Св-08А, Св-08Г2, Св-10ГС и др.). Эти же флюсы с низколегированными сварочными проволоками (Св-08ХМ, Св-21ОНМА, Св-10Г2) применяют для изготовления конструкций из низколегированных сталей.

Для сварки с большой скоростью (до 200 м/ч) пригодны флюсы пемзовидного или полупемзовидного строения. Флюсы этого типа (АН-60, АН-65) широко применяются при сварке труб для магистральных трубопроводов и других изделий.

Для сварки ответственных конструкций из низколегированных сталей разработаны низкокремнистые флюсы (марок АН-15, АН-20, АН-42, ФЦ-12 и др.). Они обеспечивают более высокую стойкость швов против трещин, высокую ударную вязкость металла шва.

При использовании указанных выше низкокремнистых флюсов несколько ухудшается формирование сварного шва, стойкость против пор по сравнению с высококремнистыми. Созданы более технологичные флюсы АН-17, АН-17М для сварки высокопрочных низколегированных сталей; АН-43, АН-47 — для сварки низколегированных сталей.

Разработан ряд марок керамических флюсов (АНК-44, АНК-46, АНК-47 и др.) для сварки углеродистых и низколегированных сталей, обеспечивающих высокие характеристики сварных соединений в широком диапазоне температур.

Для механизированной сварки высоколегированных сталей в основном используются низкокремнистые (АН-26), бескислородные (АНФ-5, серии ИМЕТФ) флюсы и флюсы других систем (АН-18, АН-45).

Флюсы для сварки алюминия и его сплавов полуоткрытой дугой (сварка по флюсу) состоят из хлоридов и фторидов щелочных и щелочноземельных металлов (АН-А1, АН-А4, АФ-5 и др.). Плавленые бескислородные флюсы на основе тугоплавких фторидов и хлоридов применяются и для сварки титана и его сплавов (АНТ-1, АНТ-3, АНТ-7).

Благодаря низкой химической активности меди и большинства ее сплавов для их сварки могут быть использованы стандартные флюсы, предназначенные для сварки стали. При сварке на постоянном токе обратной полярности эти флюсы обеспечивают получение плотных швов на металле толщиной до 25 мм. Для металла большей толщины разработан специальный флюс АН-М13.

Оборудование может быть универсальным и специализированным. При сварке под флюсом основной объем работ выполняется специализированными установками или универсальными сварочными аппаратами, приспособленными для сварки однотипных узлов и соединений. Сварочное оборудование состоит из источников питания, сварочных аппаратов, аппаратуры для регулирования и контроля сварочного процесса. В качестве источников сварочного тока применяются трансформаторы с пологопадающей характеристикой, преобразователи и выпрямители с падающей и пологопадающей характеристиками.

Аппарат для сварки плавящимся электродом, в том числе для сварки под флюсом, имеет ряд унифицированных узлов (механизм подачи проволоки, токоподводящий мундштук, правильный механизм, ходовой механизм для перемещения дуги и др.), не зависящих от вида защиты (газы, флюс). Другие узлы, например сварочные головки, приспособления для защиты зоны сварки, горелки для механизированной сварки, а также вспомогательное оборудование (флюсоаппараты), зависят от вида защиты.

Так как при сварке под флюсом дуга невидима, возникают трудности при корректировке электрода относительно стыка. Корректировочные системы могут быть предназначены для слежения по стыку и для перемещения электрода по запрограммированной траектории. Применяют различные корректировочные системы: ручное направление по шву с помощью механических или электрических корректоров, механические копирующие системы, следящие системы косвенного действия. Ручная корректировка эффективна при скорости сварки ниже 60—80 м/ч. При бóльших скоростях сварщик не всегда успевает среагировать на отклонение траектории.

Деление аппаратов для сварки под флюсом практически такое же, как и для сварки плавящимся электродом в защитном газе.

При автоматической дуговой сварке под флюсом появляются операции засыпки флюса на свариваемые кромки перед сваркой и уборки его по окончании сварки. Для уборки нерасплавившегося флюса пользуются флюсоаппаратами, которые работают от индивидуального вакуум-насоса или от заводской сети сжатого воздуха.

Основные принципы выбора режимов сварки. Свойства сварного соединения, размеры швов и производительность процесса определяются режимами сварки. К основным параметрам режима при сварке под флюсом, как и для других способов сварки плавящимся электродом, относятся величина, род и полярность тока, напряжение дуги и скорость сварки, диаметр электрода и его вылет. На формирование шва оказывают влияние наклон электрода, характер и частота поперечных перемещений конца электрода, наклон изделия. Выбор диаметра электрода и величины тока зависит от толщины металла, степени механизации и технологических задач. Для механизированной сварки диаметр электрода обычно не превышает 2 мм, для сварки корневого слоя применяются электрод меньшего диаметра и меньший ток, чем для сварки заполняющих слоев. Для автоматической сварки используют преимущественно проволоки диаметром 3—5 мм.

Сварочный ток выбирают в зависимости от диаметра электродной проволоки. Диапазон применяемых токов и напряжений для данного диаметра проволоки значительно шире, чем при сварке в защитном газе. При сварке под флюсом может быть воспроизведен любой режим, характерный для других способов дуговой сварки. Следует учитывать, что с увеличением тока увеличивается проплавляющая способность дуги и производительность наплавки. При чрезмерном токе могут быть прожоги, появляются подрезы, шов становится узким с неблагоприятным коэффициентом формы, при котором в шве могут возникнуть трещины, увеличивается склонность к порам.

При сварке на прямой полярности и сохранении той же силы тока глубина проплавления практически не изменяется, а количество расплавляемого электродного металла увеличивается в среднем на 30 %. Это приводит к увеличению доли электродного металла в металле шва. При сварке на прямой полярности и сохранении той же скорости подачи проволоки, что и при сварке на обратной полярности, существенно снижается сила тока и глубина проплавления, а количество расплавляемого электродного металла остается постоянным. В результате также повышается доля электродного металла в металле шва.

Напряжение на дуге определяет длину дуги и ширину шва. С увеличением напряжения дуги ширина шва увеличивается, а глубина проплавления практически не изменяется. При такой форме проплавления снижается вероятность образования пор, облегчается сварка корневого слоя при повышенных зазорах. С увеличением напряжения увеличиваются расход флюса и переход легирующих элементов в шов при их наличии во флюсе.

Чрезмерно высокое напряжение приводит к образованию подрезов, ухудшает отделимость шлаковой корки из разделки.

Скорость сварки в определенных границах подбирается в зависимости от размера шва и глубины проплавления. Необходимо учитывать, что при чрезмерно высокой скорости сварки в швах наблюдаются несплавления, повышается склонность к подрезам, образованию пор, неравномерности шва. При очень низкой скорости растет объем жидкого металла, в швах могут возникать шлаковые включения, поверхность шва имеет грубую чешуйчатость.

Характер влияния режимов на форму и размеры шва показан в табл. 2.4. Обычно параметры применяемых в промышленности режимов сварки одной проволокой таковы:

Диаметр электродной проволоки	1,6—6 мм
Вылет электрода	15—100 мм
Ток	150—1600 А
Напряжение на дуге	22—50 В
Скорость сварки	8—90 м/ч
Плотность тока	30—120 А/мм²

На формирование шва заметное влияние оказывают марки флюса, строение и размеры его частиц. При сварке мощной дугой лучшее формирование обеспечивают относительно вязкие флюсы, имеющие пемзовидное строение и более крупные размеры частиц.

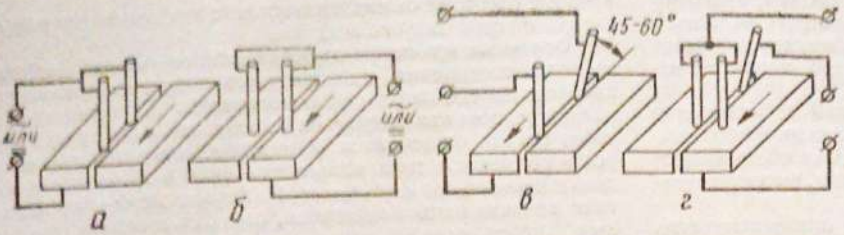


Рис. 2.23. Варианты сварки под флюсом несколькими проволоками:

а — сдвоенный электрод с продольным расположением; *б* — сдвоенный электрод с поперечным расположением; *в, г* — расположение электродов при сварке на больших скоростях

Эффективность процесса и способы ее повышения. Основное применение находит автоматическая сварка одной проволокой. По производительности, удельному расходу сварочных материалов и электроэнергии автоматическая сварка под флюсом проволокой диаметром 4 и 5 мм превосходит все другие способы дуговой сварки. Количество наплавляемого металла может достигать 20 кг/ч.

При массовом изготовлении сварных конструкций с целью повышения производительности при сварке многослойных швов одной дугой в разделку вводят дополнительный присадочный металл в виде проволоки, порошка, металлических окатышей, других гранулированных присадок. В некоторых случаях дополнительные присадки вводят не только для увеличения производительности, но и для улучшения качества шва. Производительность процесса повышается также при предварительном нагреве электродной проволоки за счет увеличения ее вылета или от постороннего источника.

Резко повысить производительность процесса и качество сварки можно за счет автоматической сварки под флюсом двумя и более электродами, которые или присоединены к одному полюсу источника питания (многоэлектродная сварка), или каждый из электродов присоединен к отдельному источнику и они электрически изолированы друг от друга (многодуговая сварка).

Многоэлектродная сварка ведется в общую ванну, кристаллизующуюся как одно целое, многодуговая — как в общую, так и в раздельные ванны. В этом случае каждая дуга образует свою ванну и последующая дуга расплавляет уже закристаллизовавшийся слой, сваренный предыдущей дугой. При сварке в раздельные ванны минимальное расстояние между электродами определяется длиной ванны, образованной первой дугой, а максимальное — длиной участка, на котором шлак, образовавшийся при плавлении флюса первой дугой, находится в жидком состоянии.

Расположение электродов при многодуговой и многоэлектродной сварке показано на рис. 2.23. Сварка сдвоенным электродом (рис. 2.23, *б*) применяется при увеличенных зазорах, при сварке первого слоя двустороннего шва, наплавочных работах. При использовании различных вариантов сварки несколькими проволоками (рис. 2. 23, *в, г*) скорость сварки каждого слоя может быть доведена до 300 м/ч.

Резко повысить производительность труда и снизить себестоимость наплавленного металла можно при использовании односторонней сварки, сварки с предварительным подогревом кромок и в узкую щелевую разделку.

Оценка процесса и рациональные области применения. При сварке под флюсом высокое и стабильное качество сварки достигается за счет надежной защиты металла шва. Благодаря наличию плотного слоя флюса вокруг зоны сварки можно резко повысить плотность тока на электроде без увеличения потерь на угар и разбрызгивание и ухудшения формирования шва. Снижается расход электродного металла и электроэнергии.

Увеличение силы тока позволяет сваривать металл значительной толщины без разделки кромок.

Большое преимущество сварки под флюсом — отсутствие брызг, благодаря чему отпадает необходимость очистки от них поверхности свариваемых деталей.

При сварке под флюсом создаются наименее вредные условия для оператора. Отпадает необходимость в защите глаз и лица рабочего, несколько уменьшается выделение вредных газов и аэрозолей.

Подготовка оператора для сварки под флюсом требует значительно меньших затрат средств и времени, чем подготовка сварщика для ручной дуговой сварки.

Тем не менее сварка под флюсом не лишена недостатков. Необходимо зачищать каждый слой от шлаковой корки, убирать нерасплавившийся флюс. Дуга невидима, поэтому требуются надежные системы слежения по шву, особенно при многодуговой сварке. Сварка возможна не во всех пространственных положениях.

Особенность процесса определяют рациональные области применения. Это прежде всего сварка в нижнем положении прямолинейных швов большой протяженности, сварка кольцевых швов. Сварка под флюсом является основным процессом при изготовлении прямошовных и спиральношовных труб, балок в мосто-, вагоно- и краностроении, котлов, сосудов, цистерн, полотнищ для судостроения и резервуаров и др.

Наиболее широко сварка под флюсом используется при изготовлении конструкций из углеродистых и легированных сталей. Этот способ применяется также для сварки алюминия (сварка по флюсу полуоткрытой дугой), титана, меди и их сплавов.

Сварка без дополнительной защиты

Рассмотренные способы механизированной сварки обеспечивают получение качественных швов благодаря защите зоны сварки флюсом или газом. Дополнительная защита усложняет процесс, не позволяет выполнять сварку во всех пространственных положениях (сварка под флюсом) или в монтажных условиях на ветру (сварка в защитном газе) без специальных мер по удержанию флюсов или препятствующих сдуванию газа. Поэтому способ механизированной сварки, с помощью которого качественное соединение может быть получено только с помощью электродной проволоки без дополнительной защиты, давно интересует сварщиков и найдет самое широкое применение в промышленности, особенно в строительстве на монтаже.

Достижение этой цели возможно при введении в электродную проволоку компонентов, создающих газовую или шлаковую защиту расплавленного металла от воздуха или связывающих азот и кислород в соединения, не вызывающие ухудшения механических свойств металла шва и не приводящие к образованию пор. Разработаны и нашли практическое применение как порошковые проволоки, так и проволоки сплошного сечения для сварки без дополнительной защиты.

Самозащитные порошковые проволоки состоят из металлической оболочки и наполнителя из порошкообразных материалов (сердечника), который должен обеспечить надежную газовую и шлаковую защиту расплавленного металла, его раскисление и легирование, а также получение удовлетворительных сварочно-технологических характеристик. Эффективность защиты расплавленного металла зависит от количества и состава защитных материалов сердечника, режимов сварки, конструкции проволоки и обычно оценивается содержанием азота в металле шва.

По составу сердечника в зависимости от наименования основных его составляющих самозащитные порошковые проволоки, выпускаемые промышленностью, делятся на рутил-органические, карбонатно-флюоритные и флюоритные.

Различное электрическое сопротивление оболочки и сердечника приводит к отставанию плавления сердечника, что снижает эффективность защиты металла от воздуха. Нерасплавившиеся частицы сердечника, попадая в сварочную ванну и засоряя ее неметаллическими частицами, могут быть

причиной образования пор. При больших значениях сварочного тока это явление становится особенно серьезным недостатком, ухудшающим показатели сварки. Для уменьшения отставания плавления сердечника в его состав вводят металлические порошки, легкоплавкие шлаковые системы, применяют проволоки сложной конструкции (с загибом оболочки, двухслойные).

Проволоки рутил-органического типа предназначены для сварки низкоуглеродистых сталей. Для предупреждения образования пор швов при сварке проволоками этого типа ограничивают силу тока, при этом снижается производительность сварки. Наплавленный металл содержит значительное количество азота и неметаллических включений, что снижает его пластичность; кроме того он насыщается водородом.

Проволоки рутил-органического типа обладают удовлетворительными сварочно-технологическими свойствами. Шов, полученный с их помощью в диапазоне рекомендованных режимов, мало склонен к образованию пор при увлажнении сердечника или наличии ржавчины и окалины на поверхности свариваемых деталей.

Проволоки карбонатно-флюоритного и флюоритного типов обеспечивают высокую производительность труда, допуская применение высоких плотностей тока. По механическим свойствам металла шва и сварного соединения они соответствуют электродам типа Э50А.

Шлаки, образующиеся при сварке проволоками карбонатно-флюоритного и флюоритного типов, плохо защищают расплавленный металл, особенно при удлинении дуги. Для нейтрализации вредного влияния азота в сердечник обязательно вводят активные нитридообразующие элементы — титан или алюминий. Нитридообразующие элементы в проволоки данного типа не вводятся, если последние имеют двухслойную конструкцию, которая обеспечивает более эффективную защиту металла от воздуха.

Проволоки с сердечником карбонатно-флюоритного типа следует предохранять от увлажнения и ржавления. Не допускается наличие волочильной смазки на их поверхности. Прокалка проволоки при 230—250 °С позволяет резко снизить содержание водорода в швах и предотвратить образование пор. Существенному снижению содержания водорода способствует сварка с увеличенным вылетом.

Сварку порошковой проволокой карбонатно-флюоритного типа выполняют на постоянном токе обратной полярности при питании от источников с жесткой внешней характеристикой.

Порошковые самозащитные проволоки широко применяются при сооружении доменных комплексов, крупных резервуаров, при строительстве электростанций, магистральных трубопроводов. Разработаны специальные порошковые проволоки для сварки вертикальных и горизонтальных швов с принудительным и полупринудительным формированием.

Проволоки сплошного сечения для сварки без дополнительной защиты. Разработаны комплексно-легированные электродные проволоки, содержащие сильные раскисляющие и нитридообразующие элементы (Si, Mn, Al, Ti, Zr) и редкоземельные металлы в виде ферроцерия для стабилизации процесса. Повышенное содержание кремния и марганца и наличие сильных раскислителей, образующих стойкие нитриды, обеспечивают получение швов с удовлетворительными свойствами.

В настоящее время выпускаются проволоки двух марок: Св-15ГСТЮЦА и Св-20ГСТЮА. Обе проволоки содержат церий, в последнюю церий вводится из расчета 0,3—0,4 % и химическим анализом не определяется.

Проволоки указанных марок находят ограниченное применение для сварки в монтажных условиях. Основными недостатками проволок для сварки без дополнительной защиты являются узкие диапазоны режимов и склонность к порообразованию.

Сварка проволокой марки Св-15ГСТЮЦА проводится на прямой полярности, с ее помощью можно сваривать швы во всех пространственных положениях. Для сварки могут быть использованы все существующие полуавтоматы в комплексе с источниками питания, имеющими жесткую или пологопадающую характеристику.

Плазменная сварка

Разновидностью дуговой сварки является плазменная сварка (сварка сжатой дугой). При плазменной сварке в качестве источника нагрева используется электрическая дуга с неплавящимся электродом, столб которой принудительно обжат с целью сосредоточения его тепловой энергии на обрабатываемом изделии. Основным инструментом при плазменной сварке является плазменная горелка (плазмотрон).

В промышленности находят применение главным образом плазменные горелки постоянного тока. Наиболее распространены способы получения плазменных струй путем интенсивного охлаждения газовым потоком столба дуги, горящей в сравнительно узком водоохлаждаемом канале плазменной горелки. Различают горелки для сварки плазменной дугой (горелки прямого действия), в которых одним из электродов является свариваемый металл, и горелки для сварки плазменной струей (горелки косвенного действия), в которых дуга горит между вольфрамовым электродом и соплом горелки.

В плазменную горелку подают одновременно два независимых потока: плазмообразующий — по внутреннему соплу, формирующему дугу, и защитный — по внешнему (рис. 2.24). В качестве плазмообразующего газа применяют аргон либо смеси его с водородом или гелием, а для защиты металла — аргон, гелий, смесь аргона и водорода, углекислый газ в зависимости от свариваемого металла. Расход плазмообразующего газа выбирают таким, чтобы истечение плазмы из сопла не было турбулентным, а силовое воздействие на поверхность сварочной ванны не вызывало разбрызгивания.

Более широкое распространение получил способ сварки плазменной дугой, при котором дуга возбуждается между неплавящимся электродом горелки и свариваемым изделием (см. рис. 2.24).

По проплавляющей способности плазменная дуга занимает промежуточное положение между электронным лучом и дугой, свободно горящей в аргоне. Плазменная дуга отличается высокой стабильностью, струя плазмы обычно имеет цилиндрическую форму и постоянный диаметр пятна нагрева, что обеспечивает равномерное проплавление кромок. Применением специальных сопел или наложением неоднородного магнитного поля пятну нагрева можно придать наиболее выгодную форму.

Плазменной дугой сваривают листы, трубы без разделки кромок и присадочного металла. В ряде случаев за один проход сваривают листы толщиной до 12 мм. При сварке более толстых деталей требуется разделка кромок, причем глубина и угол разделки меньше, чем для сварки неплавящимся электродом в аргоне.

Присадочный металл вводят в плазменную струю в конце сварочной ванны.

Сварка плазменной дугой находит применение при изготовлении изделий из нержавеющей стали, титана, никелевых сплавов, алюминия и других металлов в авиационной промышленности, нефтехимическом машиностроении.

Замена сварки неплавящимся электродом в аргоне сваркой плазменной дугой позволяет увеличивать скорость сварки в 1,5—3 раза.

Для сварки листов толщиной 0,025—0,8 мм из углеродистой и нержавеющей стали, меди, титана, тантала, молибдена, других металлов в радиоэлектронике и приборострое-

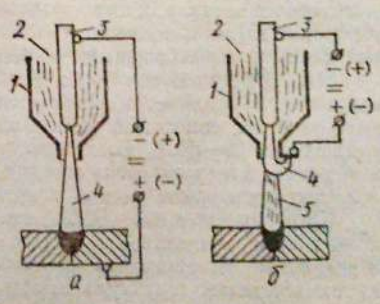


Рис. 2.24. Схема плазменной сварки:
а — дуга прямого действия; *б* — дуга косвенного действия; *1* — водоохлаждаемое медное сопло; *2* — плазмообразующий газ; *3* — вольфрамовый электрод; *4* — столб дуги; *5* — плазменная струя.

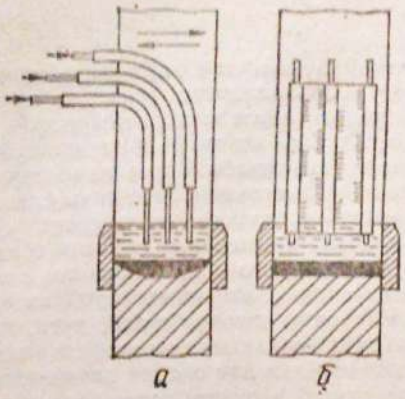


Рис. 2.25. Схема электрошлаковой сварки:
а — несколькими электродами; *б* — плавящимся мундштуком.

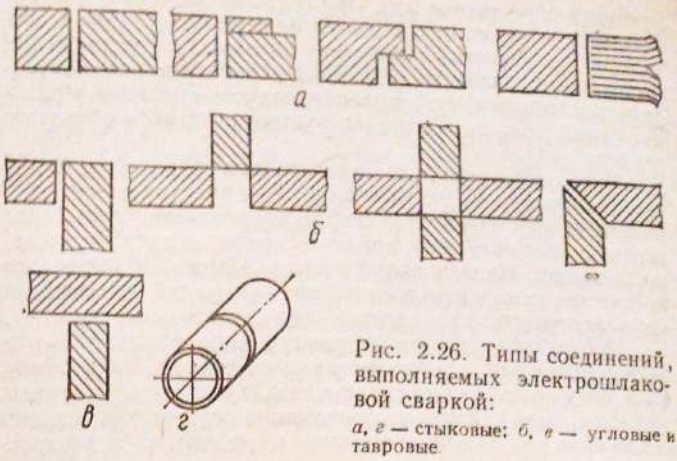


Рис. 2.26. Типы соединений, выполняемых электрошлаковой сваркой:
а, г — стыковые; *б, в* — угловые и тавровые

нии широкое применение находит микроплазменная дуга (ток от 0,1 до 10 А).

Применяется в промышленности и плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом. Этот способ представляет собой сочетание сварки плазменной дугой и сварки плавящимся электродом в инертном газе. Производительность расплавления электродной проволоки может достигать 30 кг/ч. Форма проплавления может меняться в широких пределах. Так, при сварке на обратной полярности наблюдается вращение дуги на плавящемся электроде, в результате чего образуется широкий шов с неглубоким проплавлением.

Сварка плазменной струей (дуга косвенного действия) используется редко. При этом виде сварки должны применяться малые скорости истечения газа, иначе расплавленный металл выдувается из зоны соединения. Вследствие этого энергия дуги используется лишь на 20—30 %, скорость сварки невелика.

Электрошлаковая сварка

Схема процесса приведена на рис. 2.25. Электрошлаковая сварка — процесс образования неразъемных соединений, при котором расплавление основного и присадочного металла осуществляется благодаря теплу, выделяемому при прохождении электрического тока через шлаковую ванну. Шлаковая ванна наводится путем расплавления флюса в пространстве, образованном свариваемыми кромками и формирующими ползунами. Флюс плавится дугой, возникающей в начале процесса. После расплавления определенного количества флюса дуга шунтируется жидким шлаком и гаснет. Электродная проволока непрерывно подается в шлаковую ванну со скоростью, равной скорости ее плавления. Расплавленный основной и электродный металл стекает на дно шлаковой ванны, образуя сварочную ванну. Расплавленный шлак надежно защищает металл от воздействия воздуха.

По мере заполнения зазора между свариваемыми кромками мундштук и ползуны передвигаются вдоль свариваемого изделия. Установившийся процесс обычно протекает спокойно с малым выделением газов и незначительным разбрызгиванием.

Расход флюса на образование тонкой шлаковой корки под ползунами незначителен и составляет не более 5 % наплавленного металла. Для восполнения расхода шлака на образование корки и поддержания постоянной глубины шлаковой ванны в нее небольшими порциями добавляется флюс.

Для ЭШС требуются сравнительно небольшие удельные мощности. Применяется обычно электродная проволока диаметром 3 мм, сварочный ток на один электрод 600—900 А, напряжение 30—50 В, вылет электрода 100—500 мм. Удельный расход электроэнергии меньше, чем при сварке под флюсом, так как меньше расход энергии на плавление флюса.

Швы, выполненные ЭШС, имеют высокое качество — практически отсутствуют поры, шлаковые включения. В результате замедленного нагрева и охлаждения образуется крупнозернистая структура наплавленного металла и зоны термического влияния, что приводит к снижению прочностных характеристик по сравнению с дуговой сваркой. Для улучшения структуры после сварки требуется термообработка изделия (нормализация, закалка с последующим отпуском).

Электрошлаковая сварка выполняется, как правило, в вертикальном положении. Применяются чаще всего стыковые соединения, возможны также тавровые и угловые (рис. 2.26).

При сварке прямолинейных швов необходимы начальные и выводные планки или медные кокили для наведения шлаковой ванны и вывода ее за пределы шва, так как в конце шва скапливаются неметаллические включения и образуется значительная усадочная раковина. По окончании сварки планки удаляют кислородной резкой.

Широкое применение ЭШС нашла в тяжелом машиностроении, котлостроении, турбостроении, в других отраслях промышленности, где применяется металл большой толщины. С помощью ЭШС изготовляются конструкции из сталей различных классов, никелевых сплавов, алюминия, титана, меди и их сплавов. Диапазон свариваемых толщин 8—2600 мм, в принципе можно соединять металл неограниченной толщины.

Электрошлаковая сварка непрерывно совершенствуется. К разработанным основным разновидностям процесса (сварка проволочными электродами, плавящимся мундштуком и электродами большого сечения) добавились новые способы и приемы ЭШС: с применением порошкообразного присадочного материала, с принудительным сопутствующим охлаждением, с дозированной подачей мощности.

Разрабатываются также стали для конструкций, выполняемых ЭШС, для которых не требуется последующей высокотемпературной обработки. Совершенствуются рациональные методы местной высокотемпературной обработки.

Электрошлаковый процесс успешно применяют не только для сварки, но и для наплавки, например для восстановления уникальных деталей металлургического, горнорудного, прокатного и размольного оборудования.

Для выполнения ЭШС создано современное оборудование. Сварочная аппаратура оснащается информационно-измерительной системой на базе микропроцессора для оперативного контроля параметров режима сварки и поддержания их значений на заданном уровне.

В англоязычной литературе по аналогии с ЭШС (Electroslag Welding) встречается термин Electrogas Welding, который обозначает дуговую сварку вертикальных швов с принудительным формированием в защитном газе проволокой сплошного сечения или порошковой проволокой. Оборудование и технология дуговой сварки с принудительным формированием мало отличаются от применяемых при ЭШС.

Электронно-лучевая сварка

Сущность процесса сварки электронным лучом состоит в использовании кинетической энергии электронов, движущихся в вакууме с большой скоростью. При попадании электронов на поверхность металла подавляющая часть их кинети-

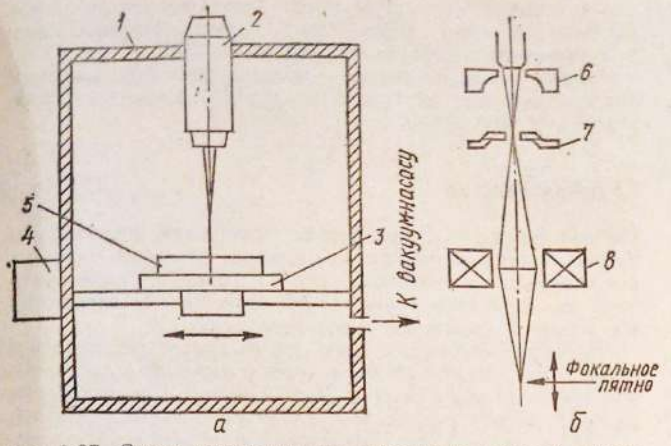


Рис. 2.27. Схема установки для электронно-лучевой сварки (*а*) и схематическое устройство пушки (*б*):

1 — вакуумная камера; *2* — электронная пушка; *3* — приспособление для крепления изделия; *4* — механизм перемещения изделия; *5* — изделие; *6* — катод; *7* — анод; *8* — фокусирующая магнитная линза.

ческой энергии превращается в тепло, которое используется для плавления металла.

Принципиальная схема установки для сварки электронным лучом показана на рис. 2.27. Она состоит из следующих основных узлов: электронной пушки, вакуумной камеры, приспособления для крепления изделия и механизма перемещения изделия под электронным лучом.

Электронная пушка — прибор для получения электронного луча (рис. 2.27, *б*). Источником электронов служит металлический катод (эмиттер), питаемый от низковольтного трансформатора. Ускорение электронов обеспечивается электрическим полем с высоким потенциалом между катодом и анодом. Поток электронов на пути от катода к аноду (благодаря форме прикатодного электрода и анода) фокусируется в пучок с диаметром, равным диаметру отверстия в аноде. Для увеличения плотности энергии в луче после выхода электронов из анода они фокусируются магнитными линзами в плотный пучок. Для перемещения луча по свариваемому изделию на пути электронов устанавливается магнитная отклоняющая система.

Для обеспечения свободного движения электронов, уменьшения их столкновения с газовыми молекулами, тепловой и химической изоляции катода в установке создается вакуум 10^{-4}— 10^{-6} мм рт. ст. Вакуум необходим также для обеспечения чистоты расплавленного металла, устранения его окисления и азотирования, уменьшения количества растворенных в нем газов. Вакуум поддерживается непрерывно работающими вакуум-насосами.

Малое поперечное сечение луча и его постоянство на значительном расстоянии от катода (до 500 мм и более), высокая концентрация энергии в луче (более чем на два порядка превышает плотность энергии сварочной дуги) позволяют получить узкие и глубокие швы с малым объемом расплавленного металла. Затраты энергии на плавление металла в десятки раз меньше, чем при дуговой сварке.

Высокая концентрация мощности в электронных пучках и практически идеальные защитные свойства вакуума обусловили использование ЭЛС для изготовления изделий из тугоплавких и химически активных металлов. Сварные соединения имеют очень узкую зону термического влияния с минимальными изменениями физико-механических свойств металла, уменьшаются их деформации.

Электронно-лучевая сварка успешно применяется для сварки изделий с малыми припусками или после окончательной обработки изделий большой толщины в химическом и энергетическом машиностроении, микроэлектронике и приборостроительной промышленности. Такой широкий диапазон применения возможен благодаря простоте управления положением луча и изменения его параметров.

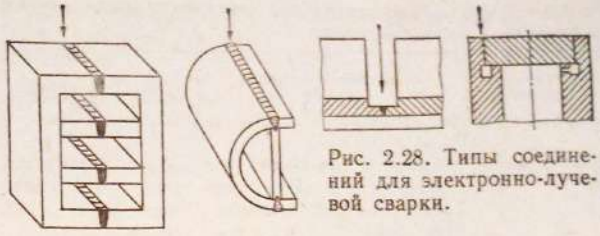


Рис. 2.28. Типы соединений для электронно-лучевой сварки.

Параметры процесса ЭЛС: ускоряющее напряжение (20—150 кВ и выше), ток пучка (до 1 А), расстояние от пушки до изделия и от пушки до плоскости фокусировки пучка, скорость сварки и вакуум. Изменяя параметры процесса сварки, удается в широких пределах изменять форму проплавления.

Для ЭЛС характерны как обычные типы соединений, так и принципиально новые (рис. 2.28). Общее требование ко всем типам соединения — точная сборка деталей перед сваркой. При сварке заглушек соединение необходимо подготовлять в соответствии с четвертым вариантом на рис. 2.28, при этом исключается концентрация напряжений в корне, имеется выход для парогазовой фазы.

Основные недостатки ЭЛС — высокая стоимость оборудования и его сложность, большие затраты энергии и времени на создание и поддержание глубокого вакуума, особенно при сварке крупногабаритных узлов. Снизить расходы на вакуумирование позволяют способы ЭЛС в локальном и мобильном вакууме (применение накидных камер и вакуумных уплотнений). Успешно применяется вневакуумная ЭЛС в автомобильной промышленности, проводятся дальнейшие исследования в этом направлении.

Лазерная сварка

При лазерной сварке нагрев и плавление металла осуществляются мощным световым лучом от оптического квантового генератора-лазера. Применяются импульсные твердотельные лазеры (стекло с неодимом, рубин) или лазеры непрерывного действия на углекислом газе. Принципиальная схема установки представлена на рис. 2.29.

Отличительной особенностью лазерной сварки является возможность получения плотности энергии того же порядка, что и при использовании электронного луча. Сваривать металл можно в вакууме, в защитной атмосфере, на воздухе, даже на значительном расстоянии от генератора. Для управления лучом служат специальные оптические системы. Сварку можно проводить через прозрачные стенки.

Перспективной областью применения лазерной сварки является сварка микросоединений в радиоэлектронике и электронной технике. Лазерным лучом можно сваривать самые различные композиции: золото с кремнием, германием, никель — тантал, медь — алюминий и др.

Луч газового лазера непрерывного действия характеризуется малым поглощением, простотой фокусировки и транспортировки энергии с помощью зеркал в труднодоступные места. Использование лазеров непрерывного действия на углекислом газе дает возможность получать сварные соединения в широком диапазоне толщин — от 0,15 до 20 мм, в будущем возможна сварка металла толщиной до 100 мм (многопроходная сварка).

Лазерная сварка стыковых соединений требует тщательной сборки свариваемых деталей. При сварке нахлесточных соединений из тонких листов необходим хороший тепловой

Рис. 2.29. Принципиальная схема установки для лазерной сварки:

1 — устройство накачки; *2* — активный стержень; *3* — зеркало резонатора; *4* — система фокусировки; *5* — защитный газ; *6* — свариваемое изделие.

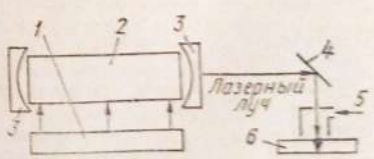


Таблица 2.13. Сравнительная характеристика электронно-лучевой и лазерной сварки

Характеристика	Электронно-лучевая сварка	Лазерная сварка
Проплавление	Узкое и глубокое; при мощности 3 кВт и скорости сварки 1 м/мин глубина 7—9 мм и ширина 0,5—2 мм	Менее глубокое, широкое; при мощности 3 кВт и скорости сварки 1 м/мин глубина 3,5—4,5 мм и ширина 1,5—2,5 мм
Защита зоны сварки	Обычно сварка проводится в вакууме, качество сварки стабильное	Сварка осуществляется на воздухе, необходим защитный газ для повышения качества сварки
Фокусировка луча	Расстояние до свариваемой детали может быть значительным; возможна сварка в узких щелях; расходимость луча незначительна, что обеспечивает глубокое проплавление	Расходимость луча больше, чем при ЭЛС
Свариваемый узел	Так как сварка проводится в вакуумной камере, вид и размеры узла ограничены размерами камеры	Нет ограничения по размерам и виду узла
Форма луча	Компактный, плотный; с помощью магнитных линз можно управлять формой луча	Компактный, рассеянный или в форме кольца; форма выбирается в зависимости от свариваемых деталей
Подготовка кромок перед сваркой	Нужна обработка и зачистка деталей; намагниченные детали перед сваркой должны быть размагничены	Допускается грубая обработка; размагничивание не требуется
Свариваемые материалы	Все металлы; в случае сварки черных металлов толщина деталей может колебаться от 0,05 до 300 мм	Черные металлы толщиной 0,15—20 мм (CO_2-лазер), до 0,5 мм (твердотельный лазер) и титан
Скорость сварки	Глубокое проплавление наблюдается при сварке со скоростью 1—2,5 м/мин	Скорость сварки выше, чем при ЭЛС
Коэффициент полезного действия, %	90—92	13—15
Подводимая энергия	Электрический ток, вода, сжатый воздух	Электрический ток, вода, сжатый воздух, защитный газ и газ для лазера
Площадь, занимаемая установками одинаковой мощности	Меньше	Больше

контакт между ними. Допустимая величина зазора между листами возрастает с увеличением толщины верхнего листа и повышением жесткости нагрева при сварке.

Выбору способа сварки — электронным или лазерным лучом — поможет их сравнительная характеристика, приведенная в табл. 2.13.

Газовая сварка

Газовая сварка — способ сварки плавлением, при котором нагрев металла осуществляется газовым пламенем посредством специальных сварочных горелок. Сварочное пламя получают при сжигании газообразных горючих или паров жидких топлив в технически чистом кислороде.

В качестве горючих газов применяются ацетилен, природный газ, пропан-бутановая смесь (сжиженный газ), а также пары бензина и керосина. Для каждого горючего скорость распространения горения и температура пламени различны.

Наиболее высокую температуру имеет ацетилено-кислородное пламя (3100—3200 °С), ацетилено-кислородная смесь обладает самой высокой скоростью распространения горения, а значит, и самой высокой концентрацией теплоты на свариваемой поверхности. Это обусловило широкое применение ацетилена для газовой сварки, и прежде всего для сварки сталей.

При использовании других горючих газов — заменителей ацетилена (природный газ, пропан-бутан, коксовый газ и др.) температура пламени ниже (не более 2700 °С), меньше и количество теплоты, выделяемой при сгорании. Для нагрева под сварку черных металлов этой теплоты недостаточно. Предварительный подогрев горючей смеси до 300 °С в горелках специальной конструкции позволяет использовать газы-заменители для сварки неответственных изделий из низкоуглеродистой стали. Пониженная теплонапряженность пламени газов-заменителей возмещается увеличением их расхода, что влечет за собой увеличение диаметров сопел, размеров газовой струи, площади нагрева металла и размеров сварочной ванны.

По составу горючей смеси (соотношение газа и кислорода) сварочное пламя подразделяют на нейтральное, окислительное и науглероживающее. Для сварки большинства металлов применяют нейтральное пламя.

Газовая сварка сравнительно проста, не требует сложного оборудования и источника электроэнергии. Преимущество газовой сварки заключается также в раздельном введении тепла и присадочного металла в сварочную ванну, что позволяет сварщику легко контролировать количество вводимого тепла, температуру нагрева, размеры и внешний вид швов.

Основные недостатки газовой сварки: меньшая скорость нагрева и большая ЗТВ, что вызывает ухудшение свойств сварного соединения и значительное коробление узлов; низкая производительность процесса: при сварке стали толщиной свыше 6 мм газовая сварка менее производительна, чем дуговая; стоимость газов выше стоимости электроэнергии, дефицитность ацетилена; взрыво- и пожароопасность при нарушении правил обращения с газами и оборудованием.

Эта сварка чаще всего используется при изготовлении и ремонте санитарно-технического оборудования и трубопроводов из труб малых диаметров в промышленном и жилищном строительстве, в ремонтных мастерских, в сельском хозяйстве и т. п. Ею можно выполнять швы во всех пространственных положениях. Наиболее часто применяют стыковые соединения, реже угловые и торцевые. Стыковые соединения с отбортовкой выполняют без присадочного металла.

Режим сварки зависит от теплофизических свойств металла, его толщины, формы и габаритных размеров изделия. Он характеризуется мощностью и составом пламени, углом наклона горелки, диаметром присадочного прутка и способом сварки. Различают левый и правый способы сварки. Левый способ применяют при сварке тонких и легкоплавких металлов. Пламя направляют на еще не сваренные кромки, а присадочный пруток перемещают перед пламенем. Дополнительного нагрева и защиты шва пламенем от окисляющего действия воздуха нет, кромки предварительно подогреваются.

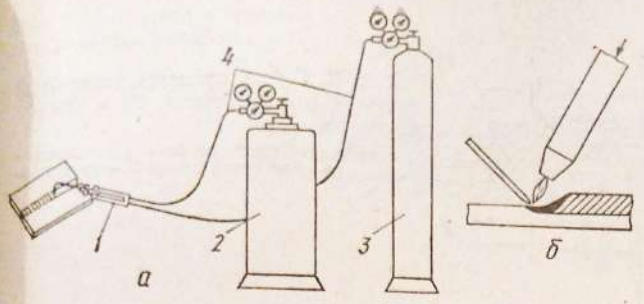


Рис. 2.30. Оборудование (*а*) и схема (*б*) газовой сварки:

1 — газовая горелка; *2* — ацетиленовый баллон с редуктором (или ацетиленовый генератор); *3* — кислородный баллон с редуктором; *4* — шланги.

При левом способе лучше формируется шов. При правом способе пламя направляют на уже сваренный участок шва, а присадочный пруток перемещают вслед за ним. Конец проволоки погружают в сварочную ванну. Правый способ повышает производительность, лучше используется теплота пламени, снижается коробление. Качество шва выше, чем при левом.

Скорость нагрева металла при газовой сварке можно регулировать, изменяя угол наклона горелки к поверхности металла. Чем больше толщина свариваемого металла, тем больше угол наклона.

Присадочные прутки по составу выбирают близкими к основному металлу, диаметр прутка равен примерно половине толщины основного металла.

При газовой сварке широко пользуются флюсами, применение которых является необходимым при сварке чугуна, цветных металлов, специальных марок сталей. Флюсы применяются в виде порошков и паст. Производительность газовой сварки низкая, особенно при толщине металла больше 2 мм. С увеличением толщины быстро растет стоимость газов на выполнение шва.

Газовое пламя менее ярко, чем сварочная дуга, излучение пламени не обжигает кожу лица, поэтому достаточна защита глаз сварщика цветными стеклами.

Состав необходимого оборудования и схема газовой сварки приведены на рис. 2.30.

Термитная сварка

Источником тепла служит перегретый расплавленный металл, образовавшийся в результате горения термитов — порошкообразных смесей металлов с оксидами других металлов.

Для сварки применяются чаще всего алюминиевые термиты, содержащие 20—25 % алюминиевого порошка и 75—80 % железной окалины. Кроме того в термиты могут вводиться легирующие элементы для улучшения механических свойств и металлический наполнитель — железная обсечка для увеличения выхода жидких продуктов реакции.

Воспламенение термитной смеси происходит при температуре свыше 1300 °С. Для этого применяют термитные спички или электрозапальные устройства. Начавшееся горение протекает бурно, быстро распространяется на весь объем смеси, и термит полностью сгорает за 20—30 с. Термит сжигают в огнеупорном тигле. Размер тигля принимают в соответствии с величиной сжигаемой порции термита. После сжигания термита в тигле находится жидкая сталь и шлак в сильно перегретом состоянии: на 1 кг термитной смеси образуется 550 г расплавленной стали и 450 г шлака, состоящего главным образом из оксида алюминия.

Термитной сваркой сваривают в основном рельсы, стыки арматуры, провода, линии связи и электропередачи. Термитную сварку можно использовать для ремонта крупных стальных и чугунных деталей. Термитной сваркой можно приливать отломанные части стальных деталей, например зубья крупных шестерен.

Для удержания жидкого металла в месте сварки применяют сварочные разъемные формы. Наиболее распространена сварка способом промежуточного литья с предварительным подогревом стыка или без подогрева. В первом случае стык собирают с зазором 12—14 мм, устанавливают и закрепляют

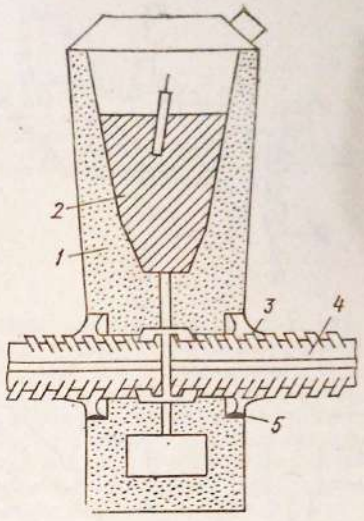


Рис. 2.31. Схема термитной сварки арматуры:

1 — тигель; *2* — термитная смесь; *3* — огнеупорная глина; *4* — свариваемое изделие; *5* — асбестовое уплотнение.

форму. Закрепленную форму промазывают огнеупорной глиной. Затем через отверстие в наружной половине формы вставляют горелку и концы стыкуемых деталей подогревают до 850—900 °С. Термитный металл, расплавленный в тигле, после выдержки в течение 4—6 с выпускают в форму.

Для термитной сварки способом промежуточного литья без предварительного подогрева стыка тигель и форма составляют одно целое. Тигельное пространство отделено от заливаемого заформованного пространства запорной пластиной, толщина которой выбрана так, чтобы она расплавилась после окончания термитной реакции. Перегретый металл заливается в форму, оплавляет концы стыкуемых деталей, и образуется сварное соединение. Первая порция металла, которая стекает в дополнительное пространство, образуя прибыль, подогревает концы стыкуемых деталей. Расход термита для сварки без подогрева почти в 2 раза больше, чем для сварки с подогревом, однако производительность сварки значительно выше, так как предварительный подогрев занимает 15—20 мин.

Поперечное сечение тигля для термитной сварки и принципиальная схема сварки арматурных стержней представлены на рис. 2.31.

Наличие влаги в форме, на соединяемых кромках, недопустимо, так как при заливке расплавленного металла образовавшийся пар может привести к выбросу жидкого металла. На рабочем месте не должны находиться горючие материалы. Персонал должен иметь защитную одежду, лицо закрывать прозрачным щитком.

2.2.2. Сварка с применением давления

Рассматриваемая группа способов объединена применением давления, прилагаемого к соединяемым деталям, в результате чего в большинстве случаев поверхностные загрязненные слои вытесняются из стыка, а чистые входят в соприкосновение и образуют единое целое. Для облегчения удаления загрязнений металл в зоне сварки подогревают, иногда до плавления поверхностных слоев. При последующем сдавливании металл может выдавливаться из стыка или оставаться в сварном соединении. Подогрев может и отсутствовать, для пластичных металлов возможна сварка холодного металла.

Сравнительно невысокий нагрев и затруднение доступа воздуха в зону сварки позволяют сохранить почти неизменными химический состав и структуру, а следовательно, и механические свойства металла в сварном соединении. Иногда зону сварки трудно отличить от основного металла даже при металлографических исследованиях. Способы сварки с применением давления достаточно универсальны, применимы к большинству технически важных металлов, с их помощью возможно соединение разнородных металлов.

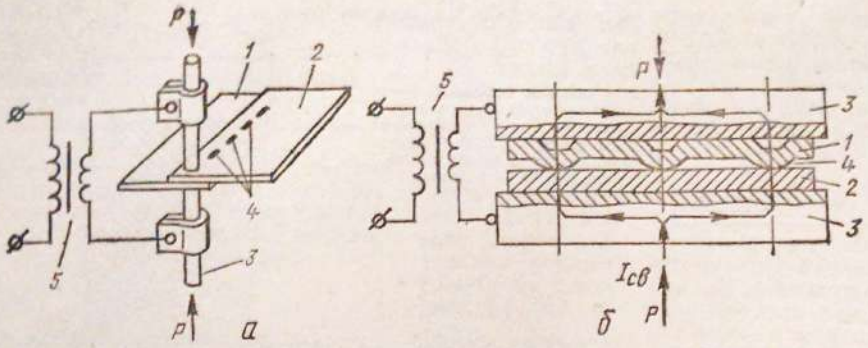
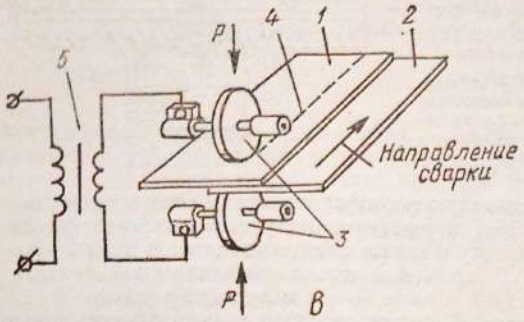


Рис. 2.32. Схема процесса контактной точечной (*а*), рельефной (*б*) и шовной (*в*) сварки:

1, 2 — свариваемые детали; *3* — электроды; *4* — сварные точки (шов); *5* — трансформатор.



К сварке с применением давления относятся контактная, высокочастотная, трением, диффузионная, взрывом, холодная и ультразвуковая. Контактная сварка — это процесс образования неразъемных соединений, при котором металл нагревается электрическим током и пластически деформируется под действием сжимающего усилия. Основными способами контактной сварки являются точечная, рельефная, шовная и стыковая сварка. Они различаются по конструкции соединений и технологии их получения.

Точечная, рельефная и шовная сварка

Нагрев металла и формирование соединения. При точечной рельефной и шовной сварке собранные внахлестку детали сжимают двумя медными электродами (рис. 2.32), связанными со сварочным трансформатором. Ток большой силы (до 100 000 А) кратковременно (0,01—0,5 с) проходит от одного электрода к другому, нагревая металл в месте контакта листов до появления расплавленной зоны или ядра точки. Расплавленный металл удерживается в ядре от выплеска и надежно защищается от окружающей атмосферы уплотняющим пояском, формирующимся в результате интенсивной пластической деформации металла, примыкающего к ядру. При шовной сварке ряд последовательно выполненных точек, перекрывающих друг друга, образует сплошной (герметичный) шов.

Пластическая деформация происходит в течение всего процесса образования соединения, начиная от создания электрического контакта до проковки деталей. Деформация металла происходит в основном под действием внешнего усилия, создаваемого приводом машины.

При точечной и шовной сварке роль пластической деформации ограничена созданием электрического контакта, уплотняющего ядро пояска и проковки (уплотнения ядра) при охлаждении. Высокое значение относительной площади физического контакта (до 100 %) достигается в результате плавления металла и удаления пленок в жидком металле под действием электродинамических сил. Глубина вмятины, определяющая степень пластической деформации, составляет обычно 10—20 % от толщины деталей.

Особенности формирования соединения при контактной сварке заключаются в нагреве металла на воздухе, кратковременности протекания тока и наличии усилия (давления). Обычно различают несколько этапов образования соединения.

В условиях точечной и шовной сварки формирование соединения проходит в три этапа. Первый этап начинается с момента включения тока и состоит в образовании электрического контакта, нагреве и расширении металла, приводящих к увеличению зазора, вытеснению под действием усилия металла в зазор и возникновению пояска, уплотняющего ядро. На втором этапе увеличивается площадь контакта, возникает и увеличивается расплавленное ядро. Поверхностные пленки под действием электродинамических сил и перемешивания расплавленного металла удаляются с поверхности контакта, формируется общая ванна жидкого металла. На этом этапе фактически заканчивается формирование соединения. С момента выключения основного импульса тока начинается третий этап. Металл охлаждается и кристаллизуется. Кристаллизация происходит с большой скоростью. Для большинства металлов характерна дендритная структура, оси дендритов совпадают с направлением наибольшего теплоотвода.

В зависимости от времени нагрева (длительности импульса) условно различают жесткие и мягкие режимы. Жесткие режимы характеризуются мощными импульсами тока малой продолжительности (обычно меньше 0,1 с при точечной сварке листов толщиной 1—4 мм) при относительно небольших деформациях и существенной роли контактных сопротивлений.

Мягкие режимы отличаются значительной длительностью протекания тока в условиях интенсивного теплообмена в самих деталях и между деталями и электродами. В этих условиях значительное развитие получают процессы пластической деформации металлов.

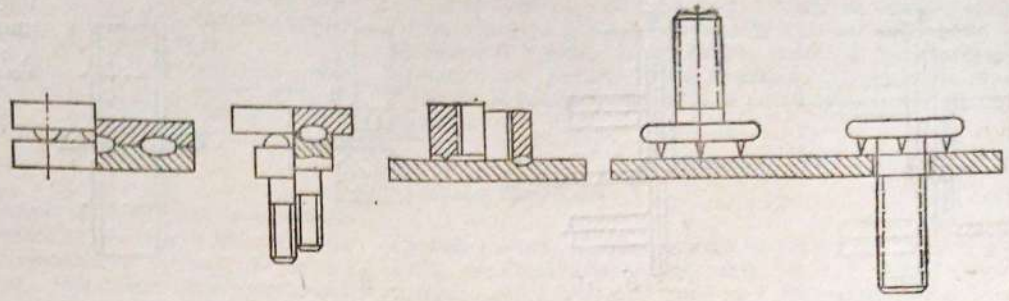
Обычно сварное соединение состоит из нескольких точек, поэтому при точечной или шовной сварке необходимо считаться с шунтированием тока, т. е. протеканием части тока через ранее сваренные точки или участки шва. Это явление может вызвать изменение формы, размеров и прочности шва. Для каждого сочетания толщин и марок металла существует минимальное расстояние между смежными точками (шаг), обеспечивающее одинаковые размеры и прочность точек.

Требования к соединениям и принципы выбора режимов сварки. Для точечной, рельефной и шовной сварки загрязнения поверхности металла в зоне сварки должны быть предварительно тщательно удалены щетками, пескоструйной обработкой, травлением в кислотах и т. п. Сборка под сварку должна как можно точнее обеспечивать плотное прилегание деталей до сварки (допустимый зазор 0,5—0,8 мм, для жестких штампованных деталей — 0,1—0,2 мм). Из-за наличия зазора между деталями значительная часть давления электродов затрачивается на деформацию деталей до плотного соприкосновения, действительное давление на точку становится недостаточным и наблюдается разброс прочности точек. Требования к точности сборки повышаются с увеличением толщины листов.

Для каждого конкретного металла можно найти некоторый оптимальный режим — наиболее благоприятную программу нагрева и напряженного состояния, которая обеспечила бы получение соединений заданных размеров и наилучшую свариваемость.

Оптимальный ток быстро растет с увеличением электропроводности свариваемого металла. Характерный параметр точечной сварки — плотность тока в контакте электрод —

Рис. 2.33. Примеры применения рельефной сварки.



деталь. Этот параметр, а также рекомендуемое удельное давление (отношение усилия, приложенного к электродам, к площади контакта электрод — деталь) для металла толщиной 1—3 мм составляют соответственно: низкоуглеродистая сталь — 160—400 А/мм² и 40—120 Н/мм²; аустенитная хромоникелевая сталь — 100—300 А/мм² и 90—180 Н/мм²; алюминиевые сплавы — 400—800 А/мм² и 60—100 Н/мм².

Бóльшие значения характеризуют сварку деталей большей толщины и более жесткие режимы. Давление проковки увеличивается по сравнению с приведенными данными в 1,5—3 раза.

Ток при шовной сварке в 1,5—2 раза больше, чем при точечной сварке такого же материала. Это отношение увеличивается с увеличением скорости сварки. Усилие сжатия электродов равно или на 10—30 % больше, чем при точечной сварке такого же материала. Шаг точек в герметичных швах составляет 0,5—0,7 диаметра точек, в негерметичных швах точки могут не перекрываться.

Для качественной рельефной сварки необходимо выполнить качественную штамповку рельефов, тщательно очистить детали и обеспечить плотное равномерное прилегание рельефов в местах сварки. Должны применяться жесткие режимы сварки, при которых выступы не успевают прогреться на большую глубину и расплющиться до достижения в месте контакта температуры, необходимой для сварки: в связи с этим рельефная сварка мало применима для материалов с высокой теплопроводностью.

Удельная мощность в зависимости от толщины стали равна 25—75 кВ · А на каждый выступ, а усилие сжатия изменяется от 500—800 Н при толщине 1 мм до 5—6 кН при толщине 5 мм.

Точечная сварка — это способ сварки, при котором детали соединяются отдельными точками. Электрический ток к местам сварки подводится электродами сварочной машины, и через эти электроды передаются необходимые усилия сжатия (см. рис. 2.32, *а*).

Точечная сварка может быть двухсторонней и односторонней. При двусторонней сварке ток подводят к верхней и нижней деталям, а при односторонней — только к одной из них. Одностороннюю сварку применяют при затрудненном доступе к одной из деталей, а также при необходимости увеличения производительности.

Основной технологический вариант точечной сварки — одноимпульсная сварка с постоянным давлением. Ток включается в виде одного импульса по достижении нормального давления, которое снимается несколько позже выключения тока. В зависимости от соединяемого материала и технологических задач применяют и другие варианты изменения тока и давления: одноимпульсную сварку с давлением проковки (сварка неответственных деталей из алюминия); многоимпульсную сварку с постоянным давлением (сварка горячекатаной стали толщиной более 5 мм); сварку при постоянном давлении с импульсом тока для термообработки точки после сварки (сварка закаливающихся сталей толщиной 4—6 мм); сварку при переменном давлении (с давлением проковки) и с импульсом тока для термообработки (сварка закаливающихся сталей толщиной более 6 мм); сварку с переменным давлением и постепенным нарастанием и спадом тока (сварка ответственных деталей из алюминиевых сплавов).

Точечная сварка применяется для изготовления тонкостенных конструкций с нахлесточными соединениями (двери, кабины, обшивка транспортных средств, элементы жесткости, гофрированные и сотовые конструкции, строительные фермы), а также пересекающихся стержней (арматурные сетки) и т. п.

В массовом производстве (автомобиле- и вагоностроение, строительная индустрия) широко применяются многоточечные машины. При двухсторонней сварке можно сваривать более двух деталей, но с увеличением числа деталей стабильность свойств сварного соединения снижается. При сварке трех и более деталей образуется общее литое ядро.

Могут свариваться детали различной толщины. При односторонней сварке со стороны электродов располагается более тонкая деталь. При двухсторонней сварке и соотношении толщин более 1 : 3 со стороны более тонкой детали применяется электрод меньшего диаметра или с меньшим радиусом сферы, иначе ядро смещается в толстую деталь.

При сварке деталей неодинаковой толщины режим выбирается по детали меньшей толщины с некоторым увеличением тока. При сварке толстой детали между тонкими режим определяется меньшей толщиной при некотором повышении тока, а при сварке тонкой детали между двумя толстыми режим определяется деталью большей толщины с уменьшением тока.

При сварке деталей из разнородных металлов для одинакового их проплавления со стороны детали с большей электропроводностью применяется электрод меньшего диаметра или с бóльшим электрическим сопротивлением.

Отсутствие заметной вмятины на поверхности одной из свариваемых деталей достигается при односторонней сварке на медной подкладке, а при двухсторонней сварке должен применяться плоский электрод большого диаметра. Продолжительность сварочного цикла должна быть минимальной (жесткие режимы).

В ряде случаев для повышения статической, а особенно усталостной прочности, а также коррозионной стойкости используют комбинированные клеесварные соединения.

Рельефная сварка — это разновидность точечной сварки (см. рис. 2.32, *б*). Детали соединяются точками, положение которых определяется формой или специальной подготовкой одной из свариваемых деталей. На деталях формируются рельефы (выступы) в форме полукруга или трапеции. В начальный период сварки наличие рельефа обеспечивает концентрированный нагрев в месте контакта. В дальнейшем рельефы постепенно деформируются и образуется ядро точки. Обычно на поверхности детали выполняют несколько рельефов или выступ в виде кольца.

Конструктивные особенности и типовое применение рельефной сварки показаны на рис. 2.33.

Размеры выступов зависят от толщины детали. Шаг между выступами и расстояние от их оси до края детали должны быть не менее 2,5 диаметра выступа. Число одновременно свариваемых точек (выступов) зависит от толщины металла и мощности машины и может составлять от 2 до 12.

Шовная сварка — это способ сварки, при котором между свариваемыми деталями создается непрерывный или герметичный шов, образованный последовательным рядом не перекрывающих или частично перекрывающих друг друга точек. При шовной сварке (см. рис. 2.32, *в*) подвод тока, передачу усилия к деталям и их перемещение осуществляют через дисковые электроды-ролики.

Шовная сварка, так же как и точечная, может быть двухсторонней и односторонней. В основном применяется двух-

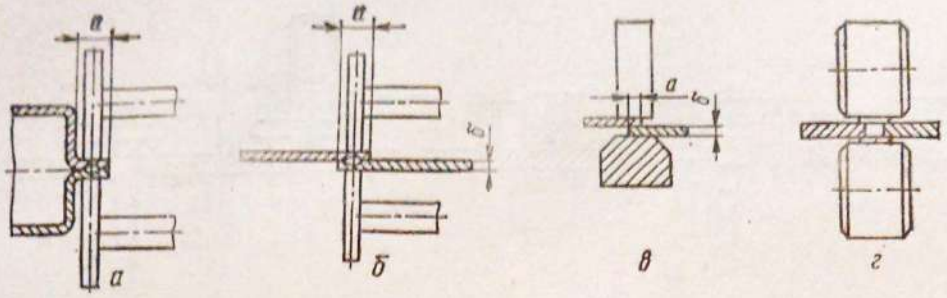


Рис. 2.34. Соединения, выполняемые шовной сваркой:
а, б — нахлесточные; *в* — с раздавливанием кромок; *г* — с накладками.

сторонняя сварка, односторонняя используется при изготовлении громоздких узлов в крупносерийном производстве.

Основной технологический прием шовной сварки — непрерывное перемещение свариваемых деталей и импульсное включение тока. Включение тока импульсами предупреждает перегрев поверхности свариваемых деталей и электродов и уменьшает износ последних.

При сварке легких сплавов хорошие результаты дает шаговая сварка, при которой включение тока и перемещение деталей чередуются (сварка происходит при неподвижных роликах). Несмотря на меньшую производительность, при шаговой сварке образуется меньше дефектов, уменьшается перегрев наружной поверхности деталей и повышается стойкость роликов.

Известны некоторые разновидности шовной сварки: шовно-стыковая, с раздавливанием кромок (соединения с узкой нахлесткой), с накладками (рис. 2.34).

Шовная сварка отличается высокой производительностью (скорость сварки до 5 м/мин и более). Она используется для изготовления различных емкостей, баков, кожухов, воздуховодов и других конструкций из тонколистового металла.

Контактная стыковая сварка

Контактная стыковая сварка — один из основных видов стыковой сварки, при которой детали соединяются по всей площади касания без присадочного металла. Таким способом соединяются прежде всего детали с одинаковыми или близкими по конфигурации поперечными сечениями. Характерные примеры использования стыковой сварки приведены на рис. 2.35.

В зависимости от состояния металла в зоне соединения различают контактную стыковую сварку сопротивлением и оплавлением.

Стыковая сварка сопротивлением. Соединяемые детали закрепляются в токоподводах специальной машины. Один из токоподводов подвижен и связан с приводом машины. Детали приводят в соприкосновение, сжимают и через них пропускают ток от сварочного трансформатора (рис. 2.36), в результате чего они нагреваются до температуры, близкой к температуре плавления ($0{,}8—0{,}9T_{пл}$). До максимальной температуры нагревается и зона, прилегающая к контакту, так как здесь имеется значительное переходное сопротивление. После нагрева увеличивают усилие сжатия (осадка деталей), выключив сварочный ток. Происходит пластическая деформация металла в стыке и образование соединения в твердом состоянии.

При сварке сопротивлением не обеспечивается достаточно полное удаление оксидных пленок и трудно добиться равномерного нагрева деталей по всему сечению, особенно в случае сечений с развитым периметром. Сварка сопротивлением применяется в основном для соединения проволок, стержней и труб сечением до 250 мм².

Качество сварки повышается при плотном прилегании деталей и ограниченном доступе атмосферного воздуха. Иногда сварку выполняют в защитной среде, что уменьшает окисление поверхностных слоев.

К основным параметрам сварки сопротивлением относятся установочная длина, удельное давление осадки, плотность тока и длительность нагрева. Установочная длина при сварке стержней диаметром D равна: для стали $0{,}5—0{,}7D$, для меди $2{,}0—2{,}5D$, для латуни и алюминия $1{,}5—2{,}0D$. Удельное давление осадки при сварке стали составляет 20—50 Н/мм², при сварке цветных металлов — 10—15 Н/мм².

Стыковая сварка оплавлением — способ, при котором металл на торцах свариваемых деталей, сближенных при незначительном усилии, интенсивно нагревается до расплавления. При быстром сдавливании (осадке) жидкий металл вместе с загрязнениями (оксидными пленками) вытесняется из стыка: образуется сварное соединение. Схема и стадии процесса показаны на рис. 2.37.

Применяется сварка с непрерывным и импульсным оплавлением. Способ пригоден для сварки деталей как с компактными, так и с развитыми сечениями. Для качественной сварки

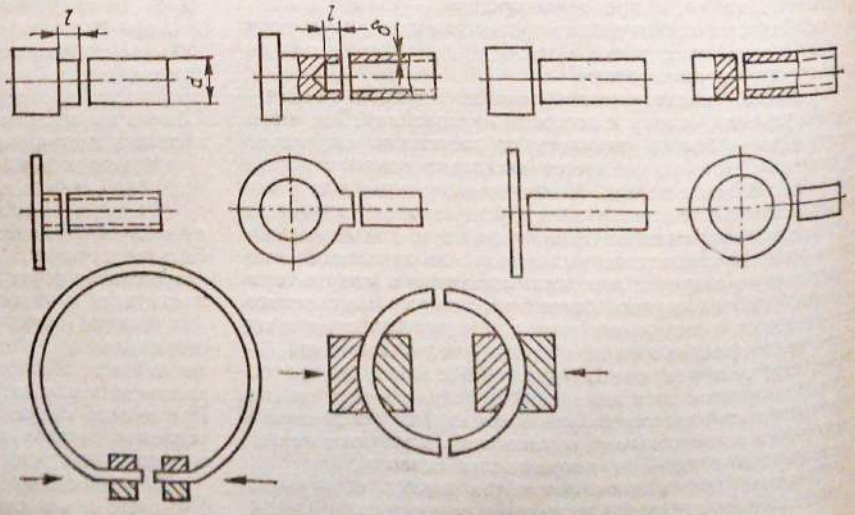


Рис. 2.35. Примеры использования контактной стыковой сварки.

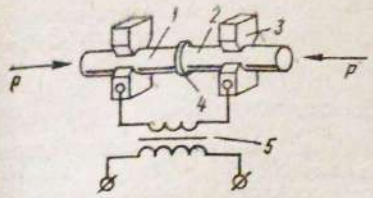


Рис. 2.36. Схема стыковой сварки сопротивлением:

1, 2 — свариваемые детали; *3* — электроды; *4* — сварной шов; *5* — трансформатор.

оплавление должно быть равномерным, интенсивным и устойчивым. Такой характер оплавления необходим для образования сплошной пленки расплавленного металла на торцах свариваемых деталей, которая защищает нерасплавленный металл от окисления, обеспечивает нагрев деталей до температуры, допускающей пластическую деформацию, достаточную для осадки на заданную величину.

Осадка должна проводиться с определенной скоростью для устранения зазора между оплавленными торцами до окончания кристаллизации пленки расплавленного металла или образования в ней тугоплавких оксидов. Осадка должна быть достаточной для удаления из зазора расплавленного металла и полного закрытия кратеров.

Для защиты металла от взаимодействия с газами при стыковой сварке оплавлением химически активных металлов используют инертные газы. Сечение деталей вблизи стыка должно быть одинаковым для обеспечения одинакового нагрева и пластической деформации при осадке.

Детали очищают от ржавчины и толстого слоя окалины на участках, зажимаемых в электродах машины. Усилие зажатия деталей в электродах должно обеспечивать хороший электрический контакт и правильное взаимное положение деталей, а при сварке без упоров воспринимать усилие осадки без проскальзывания.

Сваркой оплавлением сваривают трубы, железнодорожные рельсы, заготовки в условиях непрерывной прокатки, арматуру, прокат немерной длины для исключения отходов при резке заготовок и т. п. Способ применяют также для изготовления деталей замкнутой формы (колец, фланцев, звеньев цепей и др.).

Контактная сварка находит широкое применение в современной промышленности. Доля контактной сварки (по приведенной трудоемкости) в производстве сварных конструкций составляет примерно 30 %. Широкому использованию контактной сварки способствуют высокая производительность процесса, высокий уровень механизации и автоматизации, простота в управлении и малая зависимость качества сварки от квалификации оператора.

К недостаткам контактной сварки следует отнести отсутствие надежных методов неразрушающего контроля качества, применимость способов лишь к отдельным типам соединений, необходимость удаления грата.

Контактной сваркой можно сваривать углеродистые, низколегированные и высоколегированные стали, алюминиевые, магнитные, медные и титановые сплавы.

Для предохранения от искр и брызг наплавленного металла персонал должен иметь защитную одежду и очки или прозрачный щиток. Оборудование, особенно многоэлектродные машины, должно иметь надежную блокировку, исключающую попадание персонала в рабочую зону движущихся органов.

Сварка трением

Сварка трением осуществляется по различным схемам (рис. 2.38), позволяющим использовать теплоту, выделяемую в процессе относительного вращения (перемещения) деталей. Тепло, которое выделяется на поверхностях трения, нагревает прилегающие к ним тонкие слои металла до температур, необходимых для образования сварного соединения (для черных металлов 1100—1300° С).

В процессе трения пластичный металл вместе с разрушившимися оксидными пленками и другими загрязнениями под воздействием осевых и тангенциальных сил выдавливается из стыка в грат.

После практически мгновенного прекращения вращения производится осевая осадка деталей и образуется сварное соединение.

Для процессов нагрева и осадки применяют различные циклы осевого усилия сжатия — постоянный, двухступенчатый с повышенным ковочным усилием осадки, трехступенчатый и цикл с плавно нарастающим в течение процесса усилием сжатия.

Способ отличается высокой производительностью, низкими энергетическими затратами, стабильностью качества и независимостью последнего от чистоты поверхности. Он позволяет соединять не только однородные, но и разнородные металлы (алюминий с медью, алюминий со сталью, медь со сталью и т. п.).

Сварка трением выполняется с минимальными затратами ручного труда или на полностью автоматизированных установках. Процесс гигиеничен — отсутствуют излучение, выделение вредных газов и разбрызгивание.

Сварка трением не является универсальным процессом и применяется в основном для стыковой сварки деталей, из которых хотя бы одна является телом вращения.

Другие способы стыковой сварки. Существуют другие способы стыковой сварки: газопрессовая; дугой, вращающейся в магнитном поле; высокочастотная.

При *газопрессовой сварке* свариваемые детали нагревают многопламенными горелками (рис. 2.39) до пластического состояния или оплавления их кромок, а затем производят осадку внешним усилием до образования соединения. Этот способ применяют при сварке стержней, полос, труб и других деталей площадью сечения до 12 000 мм².

Сварка дугой, вращающейся в магнитном поле, — эффективный способ для сварки стыковых швов замкнутого контура (труб между собой и с фланцами, кольцевых швов сосудов,

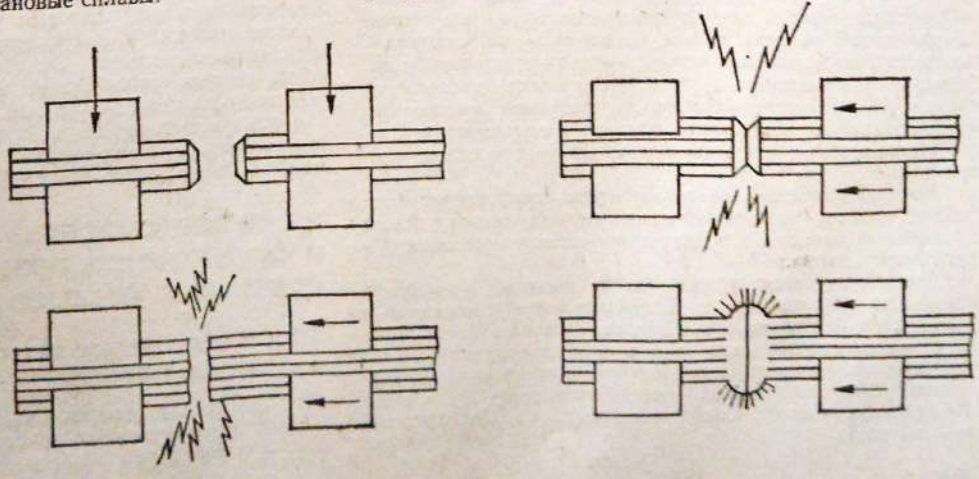


Рис. 2.37 Схема стыковой сварки оплавлением.

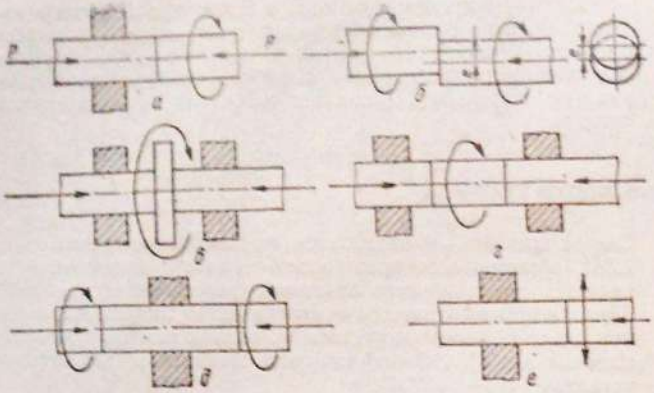


Рис. 2.38. Принципиальные схемы сварки трением:

а — сварка с помощью вращения одной детали; *б* — орбитальная; *в, г* — с помощью вращения третьего тела; *д* — одновременная сварка трех деталей на машине с двумя шпинделями; *е* — вибрационная сварка.

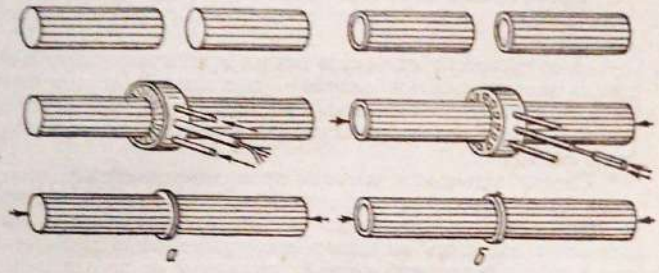


Рис. 2.39. Схема газопрессовой сварки стержней (*а*) и труб (*б*).

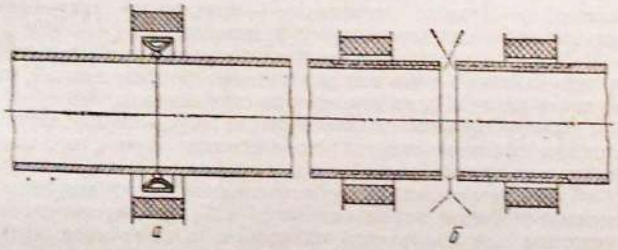


Рис. 2.40. Сварка дугой, вращающейся в магнитном поле:

а — дугой, горящей между кольцевым электродом и кромками; *б* — дугой, горящей между кромками.

при приварке труб к трубным решеткам). Схема процесса показана на рис. 2.40. Дуга возбуждается между кромками свариваемых деталей или внутренней поверхностью охлаждаемого водой медного кольца и свариваемыми кромками. Под действием магнитного поля столб дуги вращается по окружности свариваемых деталей, равномерно нагревая их кромки. После нагрева кромок до требуемой температуры они сдавливаются осадочным давлением и свариваются. Способ используется в основном при сварке неповоротных стыков труб.

При *высокочастотной сварке* стыки труб нагреваются токами высокой частоты специальным индуктором. После достижения сварочной температуры детали сжимаются и происходит сварка.

Высокочастотная сварка нашла широкое применение также при изготовлении труб. Применяются контактный и индукционный методы подвода тока. Наиболее распространена высокочастотная сварка с автоконцентрацией тока на свариваемых кромках. После нагрева к кромкам прикладывается усилие сжатия, которое обеспечивает образование сварного соединения. Способ отличается высокой производительностью.

Помимо сварки труб высокочастотная сварка находит применение при производстве тонкостенных тавровых профилей, оребрении труб и т. п.

Специальные способы сварки

Холодная сварка выполняется без применения нагрева, одним приложением давления со значительной объемной пластической деформацией и ее локализацией в зоне контакта соединяемых деталей. За счет интенсивной совместной пластической деформации оксидные пленки на поверхности соединяемых деталей разрушаются и удаляются из зоны контакта. Этим способом сваривают достаточно пластичные материалы (алюминий, медь, свинец, цинк, никель); он пригоден также для разнородных металлов.

Применяются способы стыковой, точечной и роликовой сварки. Особенно широкое применение холодная сварка получила при соединении проводов и шин в электротехнике.

Диффузионная сварка происходит как следствие взаимной диффузии атомов контактирующих поверхностей при относительно длительном воздействии повышенной температуры и незначительной пластической деформации.

Сварку проводят в специальной камере, в которой создается и поддерживается вакуум порядка 10^{-2}—10^{-5} мм рт. ст. Источником нагрева служит высокочастотный генератор, сжимающее усилие создается гидросистемой.

Образование соединения определяется температурой, давлением и временем выдержки. Температура сварки должна составлять 0,5—0,7 значения температуры плавления металла, а при сварке разнородных металлов — 0,5—0,7 значения температуры плавления более легкоплавкого металла. Удельное давление обычно равно 5—20 Н/мм². Поверхности деталей перед сваркой должны быть обработаны с высокой степенью чистоты и свободны от загрязнений и влаги.

Диффузионная сварка применяется для сварки однородных и разнородных металлов, металлов с металлокерамикой, металлов с керамикой, графитом и т. п. Возможна сварка крупногабаритных изделий.

Сварка взрывом — соединение металлов в твердом состоянии в процессе высокоскоростного соударения деталей, осуществляемого с помощью энергии взрывчатых веществ либо других источников энергии с большой удельной мощностью. Сварка происходит при условии очищения контактных поверхностей и их сближения до расстояния сферы действия межатомных сил и не имеет диффузионного характера.

Сварка взрывом применяется для получения двух- и многослойных материалов, плакирования цветными металлами крупногабаритных изделий, соединения многожильных кабелей, изготовления переходных элементов из трудносвариваемых металлов и сплавов.

Ультразвуковая сварка осуществляется при условии совместного действия на свариваемые поверхности механических колебаний высокой частоты и небольших сжимающих усилий. Продольные механические колебания очищают поверхность металла, удаляя загрязнения и разрушая поверхностные пленки. В результате трения поверхностные слои металла разогреваются. Скольжение деталей вдоль поверхности раздела способствует образованию соединения под действием сжимающих усилий.

Ультразвуковой сваркой соединяют многие термопластичные полимеры, металлические фольги с керамикой и стеклом, тонколистовые детали в приборостроении и радиоэлектронике.

2.3. ВЫБОР СПОСОБА И ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ОТДЕЛЬНЫХ КЛАССОВ СТАЛЕЙ

2.3.1. Современное состояние сварки в строительстве

Из всех способов сварки, описанных выше, основную долю в производстве сварных конструкций составляют традиционные способы сварки плавлением. Это положение сохранится

и в ближайшие годы, учитывая универсальность и простоту процесса, наличие большого парка надежного оборудования, налаженный выпуск сварочных материалов.

Сварка плавлением занимает ведущее положение и в промышленно развитых странах. Следует отметить, что там доля механизированных способов существенно выше.

Все способы дуговой сварки плавлением в последние годы интенсивно развиваются. Исследования в области дуговой сварки направлены на улучшение качества сварных швов, повышение производительности труда, экономию энергии и материалов, механизацию и автоматизацию трудоемких процессов, улучшение санитарно-гигиенических характеристик процессов.

Создаются высокопроизводительные электроды с железным порошком в покрытии, электроды общего назначения с увеличенной глубиной провара с целью снижения размеров катетов угловых швов, электроды для сварки ответственных конструкций в исполнении ХЛ.

Разработаны электроды рутилового типа с коэффициентом массы покрытия 25—30 %, что позволяет получить значительную экономию компонентов покрытия.

Сварка под флюсом развивалась по пути создания высокопроизводительных разновидностей процесса: совершествование многоголовочной сварки, создание аппаратуры и технологии сварки в узкую щелевую разделку, введение в ванну дополнительного присадочного металла.

Совершенствуются флюсы для скоростной сварки, созданы новые керамические флюсы для сварки конструкционных углеродистых и низколегированных сталей.

Сварка в защитном газе по объему применения уступает лишь ручной и контактной сварке. Наиболее широко применяется сварка в углекислом газе, в основном сварка осуществляется полуавтоматами проволоками сплошного сечения диаметром 0,8—2 мм.

Основные исследования и разработки направлены на совершенствование процесса сварки в углекислом газе — снижение потерь электродного металла на разбрызгивание. Разработаны новые марки проволок с добавками РЗМ и других активирующих элементов, отличающиеся низкими потерями на разбрызгивание, однако выпуск их недостаточен.

Расширяется область применения сварки в смеси газов на основе аргона, углекислого газа. Разработаны новые порошковые проволоки с улучшенными сварочно-технологическими свойствами. Эти работы позволяют повысить качество сварных соединений и производительность процесса, снизить расход сварочных материалов.

Созданы новые марки порошковых проволок для сварки без дополнительной защиты, которые предназначены для использования в монтажных условиях (ПП-АН19, ПП-АН24). Разработан комплекс оборудования для сварки с принудительным формированием неповоротных стыков трубопроводов.

2.3.2. Выбор рационального способа сварки

Каждый из рассмотренных выше способов сварки имеет свои особенности: одни из способов универсальны и могут применяться при сварке большинства металлов, другие имеют ограниченное применение. При выборе способа сварки для изготовления конкретной конструкции руководствуются положением, что он должен обеспечить высокое качество сварных соединений при минимальных затратах. Эта главная цель в большинстве случаев может быть достигнута несколькими путями.

Качество сварных соединений зависит от многих факторов. При прочих равных условиях качество зависит от профессиональных навыков сварщика, затраты на обучение которого определяются сложностью способа.

При выборе способа необходимо учитывать наличие оборудования и его стоимость. Объем работ может не соответствовать затратам на приобретение высокопроизводительного оборудования, и часть работ может выполняться малопроизводительным способом, если объемы работ невелики и высокопроизводительное оборудование большую часть времени будет простаивать.

Определить затраты на выполнение сварного шва на первый взгляд просто: они состоят из стоимости сварочных материалов и оплаты времени сварщика. Но стоимость одного метра шва не дает представления о реальных затратах. Необходимо учитывать также затраты на обработку деталей до сварки (подготовка кромок, сложность сборки, подогрев) и сваренного узла после сварки (механическая обработка швов, правка, термическая обработка и др.).

При сварке узлов, которые подвергаются последующей механической обработке, способы сварки, при которых образуется минимальное количество брызг и дыма, позволяют расположить сварочное оборудование совместно с механообрабатывающим, что сокращает расходы на транспортировку. Это также следует учитывать при выборе способа сварки.

Выбор способа сварки зависит от следующих трех основных факторов: марки свариваемых материалов, типов соединений и условий их выполнения.

Марка свариваемого металла. При выборе способа сварки конкретной марки металла или сплава необходимо учитывать: 1) температуру плавления металла и максимальные температуры источников нагрева при сварке. Для легкоплавких металлов мало пригодны дуговые способы сварки. Для сварки ответственных конструкций из низколегированных сталей температура пропан-бутан-кислородного пламени недостаточна, и этот газ не рекомендуется для использования; 2) наличие тугоплавких оксидных пленок на свариваемых поверхностях и возможность их разрушения в процессе сварки. При сварке алюминиевых сплавов в инертных газах постоянным током прямой полярности оксидная пленка не разрушается, что затрудняет образование качественного соединения; 3) активность расплавленного металла и требования к эффективности защитных свойств атмосферы, в которой протекает процесс. Сварку активных металлов (цирконий, титан) вручную покрытыми элетродами не выполняют, так как поглощение расплавленным металлом газов приводит к резкому ухудшению свойств шва. Для защиты дуги при сварке активных металлов пригодны лишь очень чистые инертные газы, причем наиболее высокие результаты могут быть получены при сварке в камерах с контролируемой атмосферой; 4) теплопроводность свариваемого металла и мощность источников нагрева при сварке. Для сварки медных и алюминиевых сплавов большой толщины следует применять в качестве защитного газа гелий, так как при этом дуга обладает большей проплавляющей способностью; 5) склонность металла к образованию трещин и наличие в атмосфере дуги веществ, способствующих их образованию. Низколегированные стали повышенной прочности склонны к образованию трещин, вызванных водородом. Для сварки этих сталей следует использовать сварку в защитном газе, при котором обеспечивается более низкое содержание диффузионного водорода в шве; 6) коррозионную стойкость основного металла и наличие остаточных веществ, вызывающих коррозию. При газовой сварке алюминия остатки неудаленного флюса могут вызвать коррозию изделия и требуется дополнительная операция для тщательной очистки и промывки места сварки; 7) свойства металла и способность сварочных материалов обеспечить требуемые свойства металла сварного соединения; 8) степень изменения свойств основного металла в зоне термического влияния и влияние способа сварки на ширину зоны термического влияния, а также глубину и необратимость процессов, протекающих в ней. При сварке термоупрочненного проката режимы сварки и способы с большими тепловложениями приведут к резкому снижению механических свойств и несущей способности конструкции; 9) стабильность свойств сварных соединений и простоту управления процессом для обеспечения стабильности свойств.

Тип соединения. Ряд способов пригоден для сварки определенных типов соединений. Сварку компактных сечений (круг, труба, полоса, профиль) экономически выгодно выполнять стыковой сваркой, при которой происходит соединение одновременно по всей стыкуемой площади.

Для соединения тел вращения сравнительно небольших сечений целесообразно применять сварку трением.

Большое влияние на выбор способа сварки оказывает положение шва в пространстве. При сварке в нижнем положении стыковых соединений и угловых соединений «в лодочку» можно применять высокопроизводительные способы. Для сварки в потолочном положении пригодны ручная сварка и сварка в защитном газе на ограниченных режимах.

В отдельных случаях взаимное расположение деталей может быть таким, что габаритные размеры горелок для механизированной сварки не позволяют выполнить сварку такого соединения и в этом случае возможна лишь ручная сварка покрытыми электродами.

Корневой слой односторонних швов с полным проплавлением без подкладки наиболее успешно может быть выполнен сваркой неплавящимся электродом в аргоне с присадкой.

При сварке заполняющих слоев в нижнем положении экономически выгодно применять сварку под флюсом или в защитном газе на режимах, при которых наблюдается струйный перенос.

Условия выполнения сварочных работ. При сварке сложных узлов, для сборки которых применяются специальные сборочные приспособления, не всегда возможно применить автоматические установки из-за наличия зажимов, других фиксирующих и установочных узлов приспособлений.

Сварка в нижнем положении более экономична, позволяет использовать более производительные способы. Для расположения узлов в нижнем положении следует широко использовать манипуляторы, вращатели, особенно в серийном производстве.

В монтажных условиях применение ряда способов ограничено. Так, сварка в защитном газе возможна при условии защиты зоны сварки от ветра.

Выбор способа сварки определяется и эксплуатационными требованиями. Если сварная конструкция должна работать при динамических нагрузках, сварные швы должны иметь плавный переход к основному металлу, а угловые швы — плоскую или вогнутую форму. Такую форму легче получить при сварке под флюсом и в защитном газе узлов в положении «в лодочку», чем при ручной сварке электродами с покрытием основного типа.

Основные преимущества и недостатки процессов сварки приведены выше. Выбор наиболее подходящего способа может быть сделан при тщательном анализе всех аспектов и расчете стоимости выполнения сварного соединения.

Затраты на изготовление сварных узлов состоят из следующих расходных статей: оплаты труда сварщика, оплаты подготовительно-заключительных и вспомогательных работ, накладных расходов, расходов на сварочные материалы и электроэнергию, амортизационных расходов, расходов на эксплуатацию и ремонт.

Известно, что лишь часть времени (время горения дуги) сварщик затрачивает непосредственно на сварку. Это время оценивается коэффициентом использования оборудования (поста), т. е. отношением времени горения дуги к общему времени работы сварщика. Коэффициент использования поста составляет [5]: для ручной сварки — 30—50 %, для механизированной — 10—60 %, для автоматической — 40—90 %, для сварки с использованием робота — 5—100 %.

Затраты на сварочные материалы подсчитать наиболее просто. Зная геометрию шва и коэффициент перехода присадочного или электродного металла в шов, легко подсчитать их общий расход и стоимость. Расходы на сварочные материалы могут быть снижены рядом организационных мероприятий, связанных с совершенствованием методов подготовки кромок под сварку и выбором наиболее экономичной разделки кромок, улучшением качества сборки, уменьшением усиления сварных швов. Если учесть, что согласно ГОСТам на основные типы и конструктивные размеры сварных соединений при сварке плавлением допуск на угол разделки кромок составляет $\pm(2...3^\circ)$, а высота усиления достигает 4 мм, то уменьшение угла разделки на 1° или высоты усиления на 1 мм дает 5—10 % экономии сварочных материалов.

Для этого необходимо более широко применять механизированную резку деталей с заданными допусками, использовать способы и режимы сварки, обеспечивающие получение швов с минимальным усилением, минимальным допуском на катет шва.

Снижение массы наплавленного металла при изготовлении сварных конструкций может быть достигнуто при использовании сварочных материалов, обеспечивающих получение швов повышенной прочности, или применении механизированных способов сварки. Эти мероприятия позволяют уменьшить катет углового шва без снижения прочности соединения.

Все мероприятия, направленные на снижение расхода и потерь сварочных материалов, обеспечивают и снижение затрат на электроэнергию. Амортизационные расходы определяются стоимостью сварочного оборудования.

Выбор рационального способа сварки — задача сложная, и однозначного ответа не существует. Обычно оптимальное решение может быть получено при использовании нескольких способов сварки с учетом конструкций узлов и условий конкретного производства.

2.3.3. Особенности сварки строительных конструкций из низколегированных высокопрочных сталей

Одним из эффективных путей снижения металлоемкости современных машин, механизмов и инженерных сооружений, повышения их несущей способности, эксплуатационный надежности и долговечности является применение сварных конструкций из низколегированных высокопрочных сталей с пределом текучести свыше 580 МПа. Особенностью таких сталей является низкое содержание углерода (до 0,2 %), что способствует получению необходимых показателей пластичности, вязкости и свариваемости. Требуемая прокаливаемость низкоуглеродистых сталей достигается при комплексном легировании марганцем, хромом, молибденом и никелем. Однако лишь молибден и ванадий эффективно задерживают разупрочнение закаленных сталей при высоком отпуске.

Для повышения прокаливаемости сталей при сравнительно низком содержании углерода и легирующих элементов эффективны микродобавки бора в количестве 0,001—0,006 %. В сочетании с 0,5 % молибдена бор обеспечивает получение устойчивой против разупрочнения бейнитно-мартенситной структуры металла зоны термического влияния в широком диапазоне режимов сварки. Эффективно введение в высокопрочную сталь небольших количеств азота (0,02—0,03 %) и нитридообразующих элементов — алюминия, ванадия, ниобия. Образующиеся мелкодисперсные нитриды снижают склонность стали к росту аустенитного зерна при сварке.

В последние годы разработан ряд марок низколегированных высокопрочных сталей с $\sigma_{0,2} = 580...790$ МПа, которые приобретают оптимальные механические свойства и высокую сопротивляемость хрупкому разрушению при отрицательной температуре после закалки на мартенсит и высокого отпуска. Из числа этих сталей наибольшее распространение при изготовлении ответственных строительных конструкций получили стали 14Х2ГМР, 12ГН2МФАЮ, 12ХГН2МФБАЮ, 12Г2СМФ, 12ХГН2МФБДАЮ и др. Главные трудности при сварке таких сталей связаны с необходимостью предотвращения образования в зоне термического влияния и металла шва холодных трещин, а также структур, резко снижающих сопротивляемость сварных соединений хрупкому разрушению.

Необходимость рационального использования таких сталей в сварных конструкциях ответственного назначения выдвинула ряд научных и практических задач. К важнейшим из них относятся разработка и практическое освоение технологии изготовления сварных конструкций из высокопрочных сталей, обеспечивающей получение сварных соединений со свойствами, равноценными служебным и технологическим свойствам основного металла, и удовлетворяющей требованиям и технологическим возможностям массового производства.

Особенности технологии сварки данного класса сталей определяются прежде всего их составом и свойствами. Поэто-

му последние изложены в настоящем разделе без учета особенностей конкретного класса конструкций, как это сделано для низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Свариваемость низколегированных высокопрочных сталей

Основными показателями свариваемости являются сопротивляемость сварных соединений холодным трещинам и хрупкому разрушению, а также механические свойства зоны термического влияния, которые связаны прежде всего с фазовыми превращениями и структурными изменениями в стали при сварке.

В зависимости от особенностей и полноты аустенизации и характера распада аустенита зону термического влияния легированных высокопрочных сталей (участки сплавления, перегрева, перекристаллизации, неполной перекристаллизации и рекристаллизации) можно разделить на три области. Первую из них можно условно определить как область перегретого аустенита (участки сплавления и перегрева), характеризующуюся крупнозернистой структурой, вторую — аустенита с оптимальными размерами зерна и удовлетворительными свойствами (участок перекристаллизации). К третьей области следует отнести участки неполной перекристаллизации и рекристаллизации, нагревающиеся в температурном диапазоне между A_{c_1} и уровнем отпуска стали [7].

Участки зоны термического влияния, составляющие первую температурную область аустенизации и нагревающиеся до температур, превышающих 1100 °С, называют околошовной зоной. В результате нагрева и охлаждения в ней, как правило, наиболее резко изменяются структура и свойства основного металла, определяющие свариваемость высокопрочных сталей: снижаются пластичность и ударная вязкость, образуются горячие и холодные трещины.

Общие сведения о фазовых превращениях и структурных изменениях в околошовной зоне высокопрочных сталей при воздействии сварочного термического цикла получают из термокинетических диаграмм непрерывного распада аустенита. При их построении используют любой из известных методов: дилатометрический, магнитометрический, термический и др.

Под воздействием сварочного термодеформационного цикла в широком интервале скоростей охлаждения низкоуглеродистые высокопрочные легированные стали приобретают мартенситно-бейнитную структуру. В зависимости от конкретного химического состава сталей и скоростей охлаждения мартенситное превращение начинается при 400—600 °С и заканчивается при 350—200 °С. Несмотря на низкое содержание углерода в сталях и происходящий в процессе охлаждения самоотпуск мартенсита, в зоне термического влияния они имеют высокую твердость: 350 HV и выше.

Скорость охлаждения заметно влияет и на значение временных напряжений в температурной области фазового $\gamma \rightarrow \alpha$-превращения. Различие в кинетике структурных превращений приводит также к изменению остаточных растягивающих напряжений в образцах. С повышением скорости охлаждения в диапазоне 0,6—50 °С/с у стали типа 14ХГН2МД они уменьшаются от 240 до 150 МПа.

Низкоуглеродистые мартенситно-бейнитные стали имеют ограниченное содержание углерода, никеля, кремния, серы и фосфора. Поэтому при соблюдении режимов сварки и правильном применении присадочных материалов задача получения металла шва без горячих трещин решается достаточно успешно.

Наиболее распространенным и опасным дефектом сварных соединений рассматриваемых сталей являются холодные трещины в зоне термического влияния и металла шва, возникающие в закаленной структуре под влиянием водорода и сварочных напряжений. При сварке многослойных швов часто встречаются поперечные трещины, пересекающие металл шва и частично металл околошовной зоны, а также внутренние продольные трещины металла корневых швов. В угловых и стыковых соединениях листового проката сталей толщиной более 12 мм возможно образование ламелярных трещин. Они располагаются в основном металле, направлены параллельно границе сплавления и могут вызывать разрушения типа отрыва.

Сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин оценивают по результатам испытаний специальных проб [8, 9]. Результаты испытаний на замедленное разрушение по методу Имплант образцов из сталей 14Х2ГМР, 12ГН2МФАЮ приведены на рис. 2.41, 2.42.

Высокая сопротивляемость сварных соединений низкоуглеродистых легированных сталей образованию трещин обеспечивается в случае, когда содержание диффузионного водорода в наплавленном металле не превышает 3,5—4,0 мл/100 г. Более высокая концентрация водорода приводит к снижению сопротивляемости соединений образованию холодных трещин. При выбранных условиях испытаний ($[H]_{диф}$ = 3,0...3,5 мл/100 г и $W_{6/5}$ = 9,0 °С/с) у сварных соединений сталей 14Х2ГМР и 12ГН2МФАЮ замедленное разрушение не происходит. Для предотвращения образования холодных трещин в стали 12ХГН2МФБДАЮ необходимы большие ограничения допускаемых скоростей охлаждения. По диапазонам допускаемых скоростей охлаждения зоны термического влияния, обеспечивающих достаточную сопротивляемость образованию холодных трещин, рассматриваемые стали могут быть расположены в следующий ряд: $W_{6/5}$ = = 13...18 °С/с — 14Х2ГМР и 12ГН2МФАЮ, $W_{6/5}$ = 7...

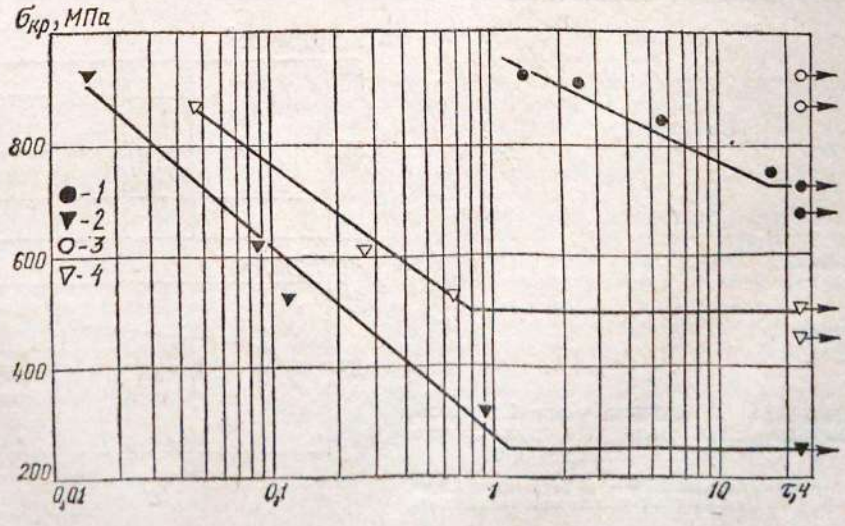


Рис. 2.41. Зависимость склонности к замедленному разрушению проб Имплант из стали 14Х2ГМР от скорости охлаждения $W_{6/5}$ и насыщенности швов водородом:
1 — $W_{6/5}$ = 18 °С/с, $[H]_{диф}$ = 3,0 мл/100 г;
2 — $W_{6/5}$ = 18 °С/с, $[H]_{диф}$ = 12,5 мл/100 г;
3 — $W_{6/5}$ = 9 °С/с, $[H]_{диф}$ = 3,0 мл/100 г;
4 — $W_{6/5}$ = 9 °С/с, $[H]_{диф}$ = 12,5 мл/100 г.

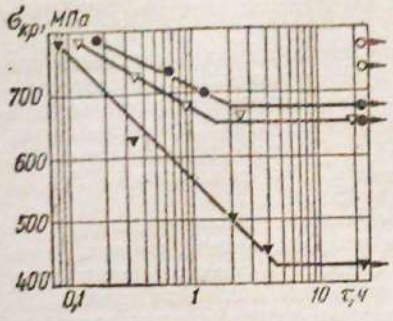


Рис. 2.42. Зависимость склонности к замедленному разрушению проб Имплант из стали 12ГН2МФАЮ от скорости охлаждения $W_{6/5}$ и насыщенности швов водородом (обозначения те же, что и на рис. 2.41).

Рис. 2.43. Зависимость твердости металла ЗТВ стали типа 14ХГН2МД от скорости охлаждения $W_{6/5}$:

1 — 20 °С/с; *2* — 3 °С/с; *3* — 1,5 °С/с.

12 °С/с — 12ХГН2МФБАЮ, $W_{6/5} = 4...6$ °С/с — 12ХГН2МФБДАЮ.

В последние годы при изготовлении ответственных металлоконструкций, эксплуатируемых в обширных регионах с климатически низкими температурами, находят применение низкоуглеродистые легированные стали повышенной хладостойкости. При изготовлении таких сталей на металлургических предприятиях применяют электрошлаковый переплав, обдувку аргоном, обработку синтетическими шлаками или другие мероприятия, позволяющие эффективно очищать расплавленный металл от вредных примесей. Однако в работах, посвященных вопросам свариваемости таких сталей, не имеется единого мнения о влиянии чистоты свариваемого металла на сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин.

Было установлено, что низкоуглеродистые легированные стали повышенной чистоты марок 12ГН2МФАЮ-Ш и 12ГН2МФАЮ-У при соблюдении основных требований к технологии сварки высокопрочных сталей (применении оптимальных диапазонов режимов сварки и ограничении концентрации водорода в швах) отличаются достаточно высокой сопротивляемостью замедленному разрушению. При несоблюдении этих требований высокопрочные рафинированные стали отличаются повышенной чувствительностью к замедленному разрушению по сравнению со сталью 12ГН2МФАЮ мартеновского изготовления. Это связано, по-видимому, с тем, что неметаллические включения в стали повышенной чистоты задерживают диффузию водорода и способствуют его поступлению в зону локальной пластической деформации у вершины развивающейся трещины.

Прочность металла зоны термического влияния оценивают на плоских или цилиндрических образцах, растягиваемых поперек шва. Прочностные свойства этого участка сварного соединения можно косвенно оценить путем измерения твердости. На кривых распределения твердости сварных соединений, замеренной поперек зоны термического влияния стали типа 14ХГНМД, наблюдаются участки с повышенной и пониженной, по сравнению с основным металлом, твердостью (рис. 2.43). Повышение твердости наблюдается в местах зоны, где происходят фазовые превращения при нагреве до температур, превышающих точку A_{c_3}. Твердость снижается в участках зоны, где температура металла не превышает точку A_{c_1}.

Считается, что низкоуглеродистые мартенситно-бейнитные стали при твердости 400 *HV* сохраняют хорошую пластичность. Поэтому высокую твердость металла околошовной зоны на высокопрочных сталях нельзя рассматривать как недопустимую. Снижение твердости у большинства сталей при замедленных скоростях охлаждения зоны термического влияния ($W_{6/5} = 0{,}8...2{,}0$ °С/с) не превышает 1,5—2,5 %. У стали 14Х2ГМР оно может достигать 2—5 %. Испытания на растяжение плоских полномерных образцов свидетельствуют, что такое снижение твердости зоны термического влияния практически не сказывается на равнопрочности сварных соединений сталей.

Наибольшее влияние термические циклы сварки оказывают на изменение хладостойкости зоны перегрева. При $W_{6/5} \leqslant 4$ °С/с в металле участка перегрева формируется преимущественно структура верхнего бейнита, которая характеризуется пониженной хладостойкостью. В связи с этим при исследованиях свариваемости каждой марки стали оценивают влияние скорости охлаждения на хладостойкость сварных соединений. Результаты подобных исследований, проведенных для стали 12ГН2МФАЮ, показаны на рис. 2.44. Они свидетельствуют, что с уменьшением $W_{6/5}$ от 20 до 2,7 °С/с показатели ударной вязкости зоны термического влияния понижаются, однако при этом сохраняются на уровне требований к основному металлу. Условия $KCU \geqslant 29$ Дж/см² и $KCV \geqslant 21$ Дж/см² для металла зоны сплавления при температуре —70 °С удовлетворяются, если $W_{6/5} \geqslant 3$ °С/с.

Для сталей 14Х2ГМР, 12ГН2МФАЮ, 12ХГН2МФБАЮ, 12ХГН2МФБДАЮ толщиной до 40 мм среднего уровня легирования допустимая минимальная скорость охлаждения металла зоны сплавления, обеспечивающая получение требуемых показателей хладостойкости сварных соединений, находится в диапазоне $W_{6/5} = 3{,}0...3{,}5$ °С/с.

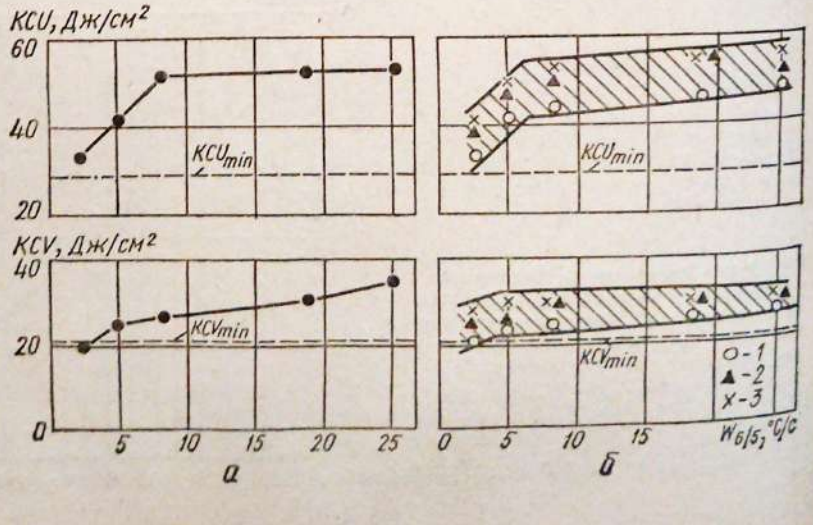


Рис. 2.44. Зависимость ударной вязкости металла ЗТВ стали 12ГН2МФАЮ при —70 °С от скорости охлаждения $W_{6/5}$:

а — зона сплавления; *б* — на расстоянии 1,5 мм (*1*), 3 мм (*2*) и 5 мм (*3*) от границы сплавления.

Определение оптимальных условий сварки и технологические меры предупреждения образования трещин в сварных соединениях

Выбор технологии сварки низкоуглеродистых легированных сталей возможен при условии учета влияния химического состава и толщины основного металла, параметров режима сварки и температуры подогрева соединения, химического состава материалов, содержания водорода в металле шва, разделки кромок и типа соединений.

Критериями при определении диапазона режимов сварки и температур предварительного подогрева служат допустимые максимальная и минимальная скорости охлаждения металла зоны сплавления, которые определяют стойкость против образования холодных трещин и свойства металла зоны термического влияния.

Диапазон оптимальных скоростей охлаждения $W_{6/5}$ для стали 14Х2ГМР составляет 3,5—13,5 °С/с, для сталей 12ГН2МФАЮ и 12ХГН2МФБАЮ соответственно 2—17 и 3—12 °С/с.

Установленные допустимые критерии W_{min} и W_{max} для каждой стали позволяют рекомендовать диапазоны режимов сварки различных соединений рассматриваемых сталей.

Погонные энергии сварки различных соединений некоторых низкоуглеродистых легированных сталей приведены в табл. 2.14—2.16.

Конкретные режимы ручной и механизированной сварки сталей устанавливаются в зависимости от диаметра сварочных электродов или проволок, пространственного положения швов и других факторов. Однако во всех случаях в зависимости от толщины металла и температуры предварительного подогрева выбранные энергии сварки должны находиться в диапазоне установленных граничных величин.

При сварке легированных сталей скорость охлаждения целесообразно регулировать, изменяя как погонную энергию, так и температуру предварительного или послесварочного подогрева соединений. Подогрев замедляет скорость остывания при температуре ниже 300 °С и способствует более полному удалению водорода из наплавленного металла. При этом повышается стойкость соединений против образования холодных трещин. Увеличение погонной энергии существенно продлевает пребывание металла в области высоких температур, что ухудшает его механические свойства. Поэтому наилучшее сочетание механических свойств соединений и их стойкости против образования трещин достигается при использовании оптимальных режимов сварки и температур предварительного и послесварочного подогрева.

Как правило, подогрев назначается при сварке низкоуглеродистых легированных сталей толщиной свыше 16 мм. Температура подогрева составляет 80—100° С. При сварке металла толщиной свыше 40 мм температура подогрева составляет 100—150 °С. Предварительный подогрев протяженных разделок кромок металла таких толщин — достаточно трудоемкая операция. В этом случае возможно ограничение температуры подогрева до 80—100 °С путем дополнительного послесварочного нагрева сварных соединений в диапазоне 150—200 °С. Такой прогрев осуществляется с поверхности металла шва, причем температура после сварки перед подогревом должна быть не менее 150 °С. Время нагрева назначается из расчета 1,5—2 мин на 1 мм толщины соединения. При температуре окружающего воздуха 0 °С необходим предварительный подогрев свариваемых кромок до 100—120 °С для металла всех толщин менее 30 мм и до 130—150 °С — для металла больших толщин. Подогрев сварных соединений наиболее эффективен, если его осуществлять равномерно по всей длине с двух сторон от разделки кромок на участках шириной не менее 100 мм. Положительное воздействие такой обработки в значительной степени связано с благоприятными условиями для удаления диффузионного водорода из металла шва и околошовной зоны.

Технологические участки следует сваривать без перерывов, не допуская охлаждения сварного соединения ниже температуры предварительного подогрева. В то же время технологические участки в зависимости от толщины свариваемой стали должны быть достаточно протяженными, чтобы не допускать перегрева сварных соединений между отдельными проходами выше 200—230 °С. При рациональном использовании автоподогрева в случае многопроходной сварки предварительный подогрев можно использовать только лишь при выполнении первых (корневых) проходов. Весьма эффективен послесварочный подогрев, т. е. подогрев непосредственно после окончания сварки.

Применение низководородных электродов и флюсов позволяет повысить стойкость высокопрочного металла шва и околошовной зоны против образования холодных трещин. Для уменьшения влаги в покрытиях электродов, сердечнике порошковой проволоки и флюсах, предназначенных для сварки высокопрочных сталей, применяют, как правило, прокалку и просушку.

Для повышения стойкости металла шва и околошовной зоны против образования холодных трещин при сварке высокопрочных легированных сталей необходимо выполнять технологические мероприятия, ограничивающие содержание водорода в наплавленном металле; при использовании рекомендованных низководородных сварочных материалов обеспечивается достаточно низкое содержание водорода в металле шва (до 6,0 мл/100 г), что значительно снижает вероятность образования холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей.

Весьма опасными в отношении образования холодных трещин являются монтажные соединения, а также узлы, в которых стыковые швы пересекаются угловыми или же сходится несколько угловых швов. Эффективным способом уменьшения напряженного состояния таких соединений может быть рационально подобранная последовательность выполнения сварных швов. Так, при наличии в конструкции стыковых и угловых швов в первую очередь следует сваривать стыковые. После этого сваривают угловые швы, соединяющие поперечный (относительно стыкового шва) набор жесткости с листовыми элементами, и затем продольный. Угловые швы, пересекающие стыковой, целесообразно выполнять «мягкими» сварочными материалами.

Стойкость сварных соединений против образования холодных трещин может быть повышена также применением технологии сварки с «мягкими» прослойками, при которой первые слои многослойного шва выполняются менее прочным и более пластичным металлом по сравнению с последующими слоями. В отдельных случаях («жесткие» соединения большой толщины) малопрочные пластичные швы в один-два слоя накладываются в процессе заполнения разделки кромок. При сварке под флюсом для выполнения мягких слоев могут быть рекомендованы сварочные проволоки марок Св-10ГА, Св-08ГС (ГОСТ 2246—70), при сварке покрытыми электродами — электроды УОНИ 13/45 (ГОСТ 9467—75), при сварке в углекислом газе — проволока Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70).

Подготовка конструкций под сварку

При изготовлении сварных металлоконструкций обычно проводится резка металлов, горячая и холодная формировка, механическая обработка и другие заготовительные операции, выполнение которых связано с определенными трудностями, обусловленными повышенной прочностью металла и особенностями его структуры.

Правка легированных сталей, как правило, осуществляется в холодном состоянии. Листы из низкоуглеродистых легированных сталей подвергают правке в состоянии поставки. Для проведения этой операции применяются многовалковые листоправильные вальцы (пяти — семивалковые) большой единичной мощности. Листы толщиной более 30 мм правят под прессом. Усиления швов при правке сварных соединений могут приводить к появлению трещин.

Резка и обработка кромок легированных высокопрочных сталей может происходить с использованием любого из промышленных методов механической или разделительной термической резки.

Механическую резку листовых деталей с прямолинейными кромками из металла толщиной до 25 мм выполняют

Таблица 2.14. Рекомендуемые температура предварительного подогрева и погонная энергия сварки стали 14Х2ГМР

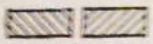
Форма поперечного сечения кромок	Температура подогрева, °С	q/v, кДж/см², при толщине металла, мм					
		6	8	10	16	20	25
	20	Не более 10,0	Не более 16,0	Не более 23,0	Не более 33,0	Не более 40,0	—
	50	Не более 9,0	Не более 15,0	Не более 20,0	Не более 30,0	Не более 35,0	—
	20	6,3—13,3	8,3—16,2	11,6—19,5	16,2—24,1	17,9—32,4	22,9—38,3
	100	—	—	—	13,3—25,0	18,7—30,0	20,0—37,4
	150	—	—	—	—	13,3—23,7	15,8—29,1

Таблица 2.15. Рекомендуемые температура предварительного подогрева и погонная энергия сварки стали 12ГН2МФАЮ

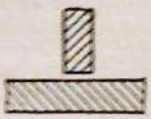
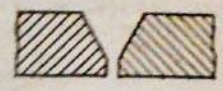
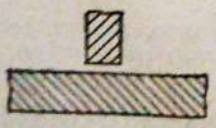
Форма поперечного сечения кромок	Температура подогрева, °С	q/v, кДж/см², при толщине металла, мм						
		16	20	24	28	32	36	40
	20	14,0—33,0	17,5—42,0	19,5—50,0	20,5—60,0	21,0—65,0	21,5—70,0	21,5—75,0
	100	9,5—25,0	12,0—33,0	13,0—40,0	13,5—45,0	13,5—50,0	13,5—55,0	14,0—60,0
	20	12,5—33,0	16,0—40,0	20,0—49,0	23,5—55,0	27,5—60,0	31,0—70,0	34,5—75,0
	100	9,0—25,0	11,5—30,0	14,5—35,0	17,0—44,0	20,0—55,0	21,5—55,0	23,5—65,0
	20	17,0—43,0	22,0—50,0	27,0—60,0	31,5—70,0	35,5—80,0	38,0—85,0	40,0—90,0
	100	13,0—33,0	15,5—40,0	19,0—45,0	22,0—55,0	24,0—60,0	25,5—65,0	26,0—70,0

Таблица 2.16. Рекомендуемые температура предварительного подогрева и погонная энергия сварки стали 2ХГН2МФБДАЮ

Форма поперечного сечения кромок	Температура подогрева, °С	q/v, кДж/см², при толщине металла, мм				
		16	20	24	30	40
	20	15,0—34,0	20,0—42,0	—	—	—
	100	12,0—25,0	15,0—30,0	—	—	—
	20	17,0—35,0	20,0—44,0	—	—	—
	100	12,5—27,0	15,0—34,0	16,0—42,0	17,0—48,0	18,0—62,0
	150	—	—	12,0—33,0	14,0—45,0	12,0—50,0
	20	17,0—35,0	20,0—42,0	—	—	—
	100	13,0—28,0	14,0—34,0	19,0—38,0	21,0—48,0	25,0—60,0
	150	—	—	14,0—32,0	18,0—39,0	20,0—50,0
	20	20,0—43,0	26,0—47,0	—	—	—
	100	15,0—34,0	19,0—43,0	23,0—47,0	27,0—60,0	30,0—70,0
	150	—	—	18,0—42,0	21,0—50,0	22,0—60,0

мм			
30	36	40	50
—	—	—	—
—	—	—	—
—	—	—	—
21,8—47,7	—	—	—
18,7—36,6	20,0—41,0	25,8—49,9	26,2—51,1

на гильотинных ножницах или пресс-ножницах. Гильотинную резку сталей до 25 мм осуществляют на стандартном оборудовании соответствующей мощности. Ножи гильотинных ножниц не должны сминать обрезаемую кромку и оставлять заусеницы более 0,5 мм.

Разделительная термическая резка менее производительна, чем резка ножницами, но более универсальна и применяется для получения стальных заготовок разных толщин как прямолинейного, так и криволинейного профилей.

Скорость газовой резки легированных высокопрочных сталей на 15—20 % ниже скорости резки низкоуглеродистых сталей. При этом происходит подкалка кромок, что может вызвать повышение их твердости и затруднить последующую механическую обработку. Шлак и окалину после газовой резки необходимо удалять.

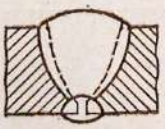
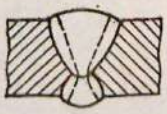
Наряду с газопламенной кислородной резкой все шире применяют плазменно-дуговую резку. Однако поверхностные слои реза при этом насыщаются азотом, что может приводить к образованию пор при сварке. Это в большинстве случаев заставляет зачищать кромки под сварку или подвергать их дополнительной механической обработке.

Механическую обработку кромок проводят для обеспечения требуемой точности сборки, для подготовки фасок, имеющих сложное очертание, а также если технические условия требуют удаления металла кромки реза.

Высокопрочные легированные стали поддаются механической обработке подобно другим легированным сталям соответствующей твердости. При этом следует применять быстрорежущие резцы или резцы с напаянными твердосплавными пластинами: скорость строгания кромок обычно не превышает 6—8 м/мин.

Гибка листовых элементов осуществляется в листогибочных вальцах. При отношении радиуса изгиба к толщине листа $R/\delta \geqslant 25$ гибку выполняют в холодном состоянии, при меньшем — в горячем. Горячую формовку производят также

Таблица 2.17. **Основные типы стыковых соединений высокопрочных сталей**

Форма подготовленных кромок	Тип шва	Форма шва	Способ сварки	Толщина свариваемых соединений, мм
Без скоса кромок	Односторонний (на флюсовой подушке, флюсомедной или стальной подкладке)		Механизированная под флюсом	3—8
			Механизированная в защитных газах	3—5
			Ручная покрытыми электродами	3—4
	Двухсторонний		Механизированная под флюсом	8—20
			Механизированная в защитных газах	3—8
			Ручная покрытыми электродами	3—6
Со скосом двух кромок	»		Механизированная под флюсом	8—30
			Механизированная в защитных газах	4—40
			Ручная покрытыми электродами	3—26
С криволинейным скосом двух кромок	»		Механизированная под флюсом	24—120
			Механизированная в защитных газах	24—100
			Ручная покрытыми электродами	24—40
С двумя симметричными скосами двух кромок	»		Механизированная в защитных газах	16—120
			Ручная покрытыми электродами	12—60
С двумя несимметричными скосами двух кромок	»		Механизированная под флюсом	24—160

при изготовлении деталей сложного профиля или при отсутствии мощного оборудования для холодной формовки.

Радиус гибки обечаек должен составлять не менее трех толщин листового проката. При гибке по оси, параллельной направлению прокатки, рекомендуется использовать пуансоны с бо́льшими радиусами, чем для гибки перпендикулярно к направлению прокатки. При подгибании кромок перед вальцовкой лист не должен иметь резких перегибов и наклепанных зон наклепа металла. Качество гибки существенно ухудшают концентраторы напряжений — надрезы, вырезы в деталях, маркировка, нанесенная клеймением, кромки после газовой резки. Все эти места необходимо зачищать шлифовальным кругом на глубину 0,2—0,3 мм.

Обязательным условием предотвращения образования трещин в сварном соединении при калибровке является тщательная его подготовка: снятие лишнего металла заподлицо с основным металлом, зачистка абразивным камнем резких переходов и концентраторов напряжений, зачистка начала и окончания шва по торцам обечаек для получения плавных переходов и термообработка обечаек (отпуск).

Горячую формовку низкоуглеродистых легированных сталей выполняют в диапазоне температур 530—600 °С для временного разупрочнения металла (при необходимости — 870—980 °С). Однако после формовки при такой температуре изделия должны подвергаться полной термообработке (закалке и отпуску) для восстановления первоначальных свойств стали.

Сборка. Типы сварных соединений, их форма и размеры принимаются в соответствии с требованиями ГОСТ 5264—80, ГОСТ 8713—79, ГОСТ 14771—76 (табл. 2.17 и 2.18) и с учетом особенностей сварки легированных высокопрочных сталей. Сборка должна обеспечивать возможность качественной сварки соединений. Для этого необходимо выдержать заданный зазор между соединяемыми деталями и зафиксировать их так, чтобы их взаимное расположение не нарушалось в процессе сварки и кантовки. Смещение кромок должно быть минимальным и не превышать 10—15 % от толщины металла (но не более 2 мм). В начале и в конце каждого соединения должны привариваться выводные планки размерами 400 × × 200 мм и толщиной, равной толщине свариваемых листов. Для качественного выполнения начала швов и заварки кратеров в планках могут подготовляться разделки кромок длиной 80—100 мм. Такие планки уменьшают угловые деформации, повышают качество сварных соединений, фиксируют взаимное расположение элементов.

В массовом и крупносерийном производстве для сборки применяются специальные сборочно-сварочные приспособления. В единичном производстве скрепление деталей осуществляется с помощью струбцин, клиньев, стяжных уголков, а в подавляющем большинстве случаев — прихватками длиной 50—100 мм и высотой (катетом) не менее 5—6 мм. Расстояние между прихватками не должно превышать 400—500 мм. Следует избегать постановки прихваток в местах пересечения швов. Прихватки выполняются электродами, по возможности, со стороны, обратной наложению первых проходов швов. К качеству прихваток предъявляются такие же требования, как и к качеству основных швов. Перед сваркой прихватки должны быть тщательно очищены, дефекты удалены и переварены. Кратеры прихваток должны быть заварены.

Протяженные стыковые соединения металла большой толщины скрепляются массивными прихватками («замками»), что позволяет разбивать их на равные участки («блоки»). Длина блоков выбирается в зависимости от толщины металла и длины стыка, применяемых способов сварки, продолжительности сварочного процесса и др.

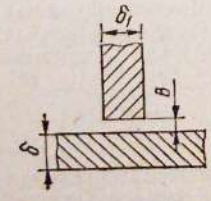
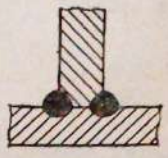
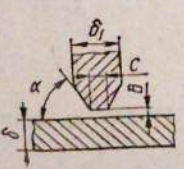
Следует избегать приварки сборочных приспособлений к изделию. При необходимости удаление швов временных креплений производится вырубкой зубилом или строжкой. Места с выхватами на основном металле расчищаются, заплавляются электродами и зачищаются шлифмашинками заподлицо с поверхностью детали.

Собранные конструкции из легированных высокопрочных сталей должны храниться в условиях, исключающих загрязнение мест сварки. В случае несоблюдения этих условий или при длительном хранении собранные конструкции должны быть осмотрены, а места наложения швов повторно очищены до металлического блеска.

Хранение и использование сварочных материалов. Электроды, флюсы, порошковые проволоки необходимо хранить в сухих отапливаемых помещениях при температуре не ниже 16 °С и относительной влажности не более 60 %. Электроды марок УОНИ 13/45, АНП-2 и АНП-6П перед сваркой прокаливают при температуре соответственно 400—420 и 380—400 °С в течение 2 ч. Сварочные флюсы прокаливают при 400—450° С. Флюс засыпается тонким слоем (не более 4—5 см) на противни электропечей. К месту сварки прокаленный флюс доставляется в закрытой таре. При длительном хранении флюса в условиях, приводящих к сильному его увлажнению, температуру прокалки следует увеличить до 550—700° С.

Сварочная проволока сплошного сечения перед сваркой должна быть тщательно очищена от ржавчины и других загрязнений. Порошковые проволоки перед использованием подвергаются прокалке при 230—250° С в течение 2—3] ч.

Таблица 2.18. **Характеристики сварных швов и основные типы тавровых соединений высокопрочных сталей** *

Форма подготовленных кромок	Вид кромок	Способ сварки	Форма поперечного сечения шва
Без скоса кромок		Механизированная под флюсом Механизированная в защитных газах Ручная покрытыми электродами	
С двумя скосами одной кромки		Механизированная под флюсом Механизированная в защитных газах Ручная покрытыми электродами	

* Тип шва — двухсторонний.

Таблица 2.19. **Содержание диффузионного водорода в наплавленном металле (хроматографический метод анализа)**

Способ сварки	Сварочные материалы	$[H]_{диф}$, мл/100 г
Ручная покрытыми электродами	Электроды марок: АНП-2, 48Н-11, 48Н-13	2,5—4,5
	АНП-6П, УОНИ 13/45	5,0—9,0
Полуавтоматическая в защитных газах	Проволоки марок Св-08Г2С, Св-08ГСМТ, Св-10ХГ2СМА, Св-08ХН2ГСМО (CO_2)	2,5—4,0
	Проволока марки Св-08ХН2ГМЮ (78 % Ar + 22 % CO_2)	3,0—4,0
	Порошковые проволоки марок ПП-АН54, ПП-АН57 (CO_2)	3,5—5,0
Автоматическая под флюсом	Проволоки марок Св-08ХН2Г2СМЮ, Св-08ХН2ГМЮ, флюсы АН-17М, АН-43	3,5—6,5

Подаваемый в зону сварки углекислый газ пропускается через осушитель. При сварке конструкций не реже одного раза в смену определяют точку росы углекислого газа, которая должна быть не выше —30° С.

После соответствующей подготовки материалов и условий сварки (удаление источников водорода с поверхности свариваемых кромок и предохранение зоны сварки от осадков и сквозняков) металл швов легированных сталей содержит ограниченное количество диффузионного водорода (табл. 2.19).

Технология сварки

Технология сварки низкоуглеродистых легированных сталей должна обеспечить требуемые механические свойства металла шва и околошовной зоны, достаточную стойкость сварного соединения к возникновению горячих и холодных трещин.

Необходимость получения сварного соединения, обладающего свойствами, равноценными или близкими к свойствам основного металла, предопределяет выбор сварочных материалов, режимов и технологических приемов, применяемых при сварке высокопрочных сталей.

Сварка покрытыми электродами. Ручную сварку высокопрочных сталей выполняют электродами марок АНП-2, АНП-6П или электродами других марок, которые отвечают требованиям ГОСТ 9467—75 (тип Э70) и имеют фтористокальциевое покрытие.

При сборке конструкций или сварке высокопрочных сталей с низколегированными сталями повышенной прочности 09Г2, 10Г2С1, 14Г2, 10ХСНД, 15ХСНД, а также с низкоуглеродистой сталью Ст3 применяют электроды с фтористокальциевым покрытием типа Э42А — Э50А по ГОСТ 9467—75, например марок УОНИ 13/45 или УОНИ 13/55.

Сварочный ток выбирают в зависимости от марки и диаметра электрода, при этом учитывают положение шва в пространстве, вид соединения и толщину свариваемого металла. Рекомендуемые режимы сварки электродами АНП-2 и АНП-6П приведены в табл. 2.20 и 2.21. Типичные механические свойства и ударная вязкость металла швов, выполненных электродами АНП-2 и АНП-6П, приведены в табл. 2.22.

Технологический процесс сварки осуществляется таким образом, чтобы обеспечить высокое качество металла швов. Длину дуги поддерживают в пределах 0,5—1,2 диаметра электрода. Не рекомендуется возбуждать дугу на основном металле вне зоны шва, так как это может привести к «ожогу» поверхности металла и стать причиной образования в этом месте надрывов и трещин. Кратеры швов должны быть тщательно заварены, так как они являются местами скопления надрывов и шлаковых включений и могут быть причиной разрушения соединений на этом участке. Оптимальная ширина валиков должна составлять 2,5—3 диаметра электрода. Сварку тонкого металла, горизонтальных и потолочных швов выполняют без поперечных колебательных движений, при этом получают узкие валики, ширина которых составляет 0,3—1,5 диаметра электрода.

При выполнении многослойных швов особое внимание уделяется качественному выполнению первого слоя в корне шва. Провар корня шва во многом определяет прочность сварного соединения. Последующее заполнение разделки проводят в зависимости от толщины металла любым из известных приемов наложения швов. Последовательное наложение швов применяется при сварке металла толщиной до 25 мм. Каскадный способ и способ горки используют при сварке металла большой толщины. Выбор любой из схем заполнения разделки кромок определяется прежде всего необходимостью сохранения рекомендуемой температуры подогрева высокопрочного металла в процессе сварки.

С обратной стороны соединений рекомендуется выполнять подварочный шов, предварительно очистив корень шва от наплывов металла и шлака. Иногда с обратной стороны ставят подкладку из низкоуглеродистой стали толщиной 3—4 мм. Корень шва удаляют подрубкой пневматическим зубилом, механической и воздушно-дуговой строжкой. После воздушно-дуговой строжки обязательна механическая зачистка поверхности до металлического блеска. При воздушно-дуговой строжке металла толщиной свыше 18 мм применяется предварительный подогрев до 100° С.

Сварку угловых швов лучше проводить в нижнем положении. Швы при положении «в угол» выполняют однослойными при катете до 6 мм, при катете свыше 6 мм — за несколько проходов.

Сварка в защитном газе. Значительное место при изготовлении сварных конструкций из высокопрочных легированных сталей занимает дуговая сварка в защитном газе. В основном это механизированная сварка в углекислом газе проволоками сплошного сечения и порошковыми. В последние годы все более широкое применение в качестве защитной среды находят смеси газов на основе аргона (например, 78 % Ar + 22 % CO_2).

При сварке в углекислом газе применяют проволоки марок Св-08Г2С, Св-10ХГ2СМА, Св-08ХН2Г2СМЮ (ГОСТ 2246—70) или порошковые проволоки марок ПП-АН54 и ПП-АН57 [10]. В смесях газов на основе аргона используют проволоку марки Св-08ХН2ГМЮ (ГОСТ 2246—70).

Проволоки марок Св-10ХГ2СМА, Св-08ХН2ГМЮ, Св-08ХН2Г2СМЮ, ПП-АН54, ПП-АН57 используют при сварке

Таблица 2.20. **Сварочный ток (постоянный, обратной полярности), А, при сварке электродами АНП-2**

Положение сварки	Диаметр электрода, мм		
	3	4	5
Нижнее	100—120	150—200	200—250
Вертикальное	90—120	120—160	160—200
Горизонтальное	90—120	120—160	160—200
Потолочное	90—120	120—160	160—200

Таблица 2.21. **Сварочный ток, А, при сварке электродами АНП-6П в нижнем положении**

Род тока	Диаметр электрода, мм		
	4	5	6
Постоянный	190—210	270—290	350—370
Переменный	220—240	300—320	380—400

Таблица 2.22. Механические свойства металла швов, стыковых соединений, выполненных электродами АНП-2

Марка электрода	Род тока	Марка стали	Толщина листа, мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %
АНП-2	Постоянный	14Х2ГМР	30	680	800	19,5	58,0
		12ГН2МФАЮ	40	651	771	21,3	62,0
АНП-6П	»	14Х2ГМР	30	600	721	20,7	61,0
		12ГН2МФАЮ	40	610	746	19,3	63,0
	Переменный	14Х2ГМР	30	606	722	20,0	60,0

Примечание. Здесь и в табл. 2.23 и 2.27 над чертой приведены минимальные и максимальные значения ударной вязкости.

Таблица 2.23. Механические свойства металла шва при многопроходной сварке в защитных газах стыковых соединений

Марка стали	Толщина листа, мм	Сварочная проволока	Защитный газ	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %	*KCU*, Дж/см², при температуре испытания, °С			*KCV*, Дж/см², при температуре испытания, °С	
								20	—40	—70	—40	—70
14Х2ГМР	20—30	Св-10ХГСМА	Углекислый газ	655	766	22,1	54,4	100—115 / 107	55—63 / 59	32—38 / 35	23—32 / 28	10—14 / 12
		ПП-АН54	То же	628	712	18,3	62,0	104—109 / 106	55—80 / 72	40—90 / 47	27—31 / 29	24—30 / 27
		Св-08ХН2Г2СМЮ	»	865	975	14,0	55,0	81—95 / 89	75—86 / 79	45—66 / 60	31—38 / 34	22—27 / 25
		ПП-АН57	»	656	785	19,0	56,0	104—115 / 108	68—84 / 78	47—56 / 52	40—45 / 43	25—30 / 28
12ГН2МФАЮ	20—30	Св-10ХГ2СМА	»	623	804	17,6	55,1	89—95 / 91	48—55 / 51	31—34 / 32	23—28 / 25	8—14 / 10
		ПП-АН54	»	618	740	15,3	59,9	123—137 / 132	66—73 / 68	51—67 / 57	36—38 / 37	21—28 / 24
		Св-08ХН2Г2СМЮ	»	784	880	16,3	56,1	98—105 / 102	85—93 / 88	78—93 / 83	27—31 / 29	23—25 / 24
		Св-08ХН2ГМЮ	78 % Ar + + 22 % CO_2	885	998	15,0	55,6	65—75 / 85	80—87 / 67	65—70 / 44	37—50 / 44	34—37 / 35

Таблица 2.24. Ориентировочные режимы сварки в углекислом газе проволоками сплошного сечения

Диаметр сварочной проволоки, мм	Пространственное положение					
	Нижнее		Вертикальное		Потолочное	
	$I_{св}$, А	$U_д$, В	$I_{св}$, А	$U_д$, В	$I_{св}$, А	$U_д$, В
1,0	80—190	15—23	150—200	21—22	145—165	21—23
1,2	120—200	18—24	150—200	22—24	150—170	22—23
1,6	150—350	20—30	200—240	26—28	—	—
2,0	200—400	25—35	—	—	—	—

Примечание. Расход газа 8—12 л/мин.

и АНП-6П

KCU, Дж/см², при температуре испытания, °С			KCV, Дж/см², при температуре испытания, °С		
20	—40	—70	20	—40	—70
110—180 / 120	80—105 / 89	55—80 / 70	83—95 / 89	35—41 / 38	24—31 / 27
117—124 / 122	82—95 / 87	72—94 / 82	87—102 / 93	37—44 / 40	22—37 / 31
95—102 / 98	70—72 / 71	65—77 / 70	76—87 / 83	34—40 / 37	12—25 / 17
96—115 / 105	51—77 / 65	36—56 / 48	65—80 / 73	27—42 / 33	14—20 / 17
98—116 / 107	78—86 / 81	70—74 / 72	89—101 / 96	38—45 / 42	15—27 / 20

под чертой — среднее значение для трех — пяти испытаний.

стыковых швов, а также угловых катетом свыше 10 мм. Для угловых швов с меньшим катетом в большинстве случаев используют проволоку марки Св-08Г2С. Последнюю применяют также при сварке высокопрочных сталей с низколегированными сталями повышенной прочности.

Характерные механические свойства металла швов стыковых соединений, выполненных в защитных газах, приведены в табл. 2.23.

Диаметр проволок сплошного сечения при сварке в углекислом газе и смесях газов выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла и пространственного положения шва. Проволоками диаметром 1,0—1,4 мм сваривают соединения толщиной 3—8 мм, швы в различных пространственных положениях, а также корневые слои многослойных соединений. В остальных случаях используют проволоки диаметром 1,6—2,0 мм. Ориентировочные режимы механизированной сварки проволоками сплошного сечения приведены в табл. 2.24 и 2.25.

Преимущества сварки в смесях газов на основе аргона особенно четко проявляются в диапазоне сварочных токов, обеспечивающих струйный перенос электродного металла. Поверхность швов при этом мелкочешуйчатая. Кроме того, обеспечиваются плавные переходы к основному металлу, что особенно важно для высокопрочных сталей, чувствительных к концентраторам напряжений. Следует также отметить более высокие значения ударной вязкости металла швов при отрицательных температурах по сравнению со сваркой в углекислом газе.

Сварку порошковыми проволоками выполняют в нижнем и горизонтальном на вертикальной плоскости положениях швов. С использованием порошковой проволоки могут проводиться все виды сварных соединений. При сварке стыковых соединений порошковую проволоку следует располагать перпендикулярно к изделию. При выполнении тавровых и нахлесточных соединений угол наклона электрода к вертикальной плоскости (стенке тавра) должен составлять 30—45°. При многослойной сварке не рекомендуется выполнять за один проход швы катетом более 10—12 мм. Швы сечением более 8 мм осуществляются с поперечными колебаниями электрода. Типичные режимы сварки порошковымипроволоками приведены в табл. 2.26.

Сварка под флюсом. При механизированной сварке низкоуглеродистых легированных сталей используют низкокремнистые окислительные флюсы марок АН-17М и АН-43 (ГОСТ 9087—81). В зависимости от характеристик сталей и требований, предъявляемых к сварным конструкциям, сварку осуществляют проволоками Св-08ХН2Г2СМЮ, Св-08ХН2ГНМЮ, Св-08ХН2М, Св-08Г2С, Св-10ГА, Св-10Г2 (ГОСТ 2246—70) и др. Сварка осуществляется на постоянном токе прямой и обратной полярности, величина тока обычно не превышает 800 А, напряжение составляет 40 В, скорость сварки 13—30 м/ч. Характерные механические свойства металла шва при сварке под флюсом высокопрочных сталей приведены в табл. 2.27.

Одностороннюю однопроходную сварку применяют для соединений толщиной до 8 мм и выполняют на стальной подкладке, на флюсовой подушке или по подварке, выполненной аргонодуговой сваркой. Подкладные планки изготовляют из низкоуглеродистой стали толщиной 3—6 мм и шириной 40—50 мм. Рекомендуемые режимы односторонней сварки под флюсом стыковых соединений приведены в табл. 2.28.

Толщина соединений без разделки кромок, свариваемых двухсторонними швами, не должна превышать 20 мм. В противном случае сварку необходимо вести на форсированных режимах, что приводит к снижению пластичности и хладостойкости металла зоны термического влияния. Техника сварки первого прохода такая же, как и односторонних швов. Глубина проплавления должна составлять 0,6—0,7 δ стали. После кантовки изделия второй проход шва выполняют с таким расчетом, чтобы перекрытие слоев составляло 3—4 мм

Таблица 2.25. **Ориентировочные режимы сварки высокопрочных сталей в смеси 78 % Ar + 22 % CO_2**

Диаметр сварочной проволоки, мм	$I_{св}$, А	$U_д$, В	Вылет электрода, мм	Расход газа, л/мин
1,0	150—200	24—26	10—13	12—15
1,2	180—280	25—27	12—15	14—16
1,4	220—350	25—28	15—18	15—18
1,6	280—400	26—29	18—20	16—20

Таблица 2.26. **Типичные режимы сварки в углекислом газе порошковыми проволоками**

Диаметр сварочной проволоки, мм	$I_{св}$, А	$U_д$, В	Вылет проволоки, мм	Расход газа, л/мин
2,2	220—250	25—26	20—25	8—10
2,2	250—280	25—26	20—25	10—12
2,2	280—320	26—28	25—30	10—12

Наиболее рационально такие швы сваривать с зазором в стыке. Режимы двухсторонней автоматической сварки приведены в табл. 2.28. Для получения стыковых соединений без скоса кромок (односторонних и двухсторонних) используют проволоку марки Св-08ХН2М.

Подкладные кольца и замковые соединения при сварке легированных сталей не рекомендуются, так как они снижают надежность изделия в эксплуатации.

Наиболее часто стыковые соединения подготовляют со скосом кромок. Сварку корневых швов стыковых соединений с V- или Х-образной разделкой кромок обычно выполняют проволоками марок Св-10ГА или Св-10Г2. Разделки кромок заполняются проволоками марок Св-08ХН2ГМЮ или Св-08ХН2Г2СМЮ последовательным наложением слоев. Первые два-три слоя выполняют по оси разделки, а все последующие — со смещениями последовательно то к одной, то к другой стороне разделки.

Порядок многопроходной сварки швов при Х-образной симметричной разделке кромок следующий: выполняют сварку с одной стороны, заполняя разделку на одну треть или на половину по глубине, кантуют соединение, зачищают корень шва и выполняют сварку с этой стороны, заполняя разделку на одну треть или на половину сечения по глубине, снова кантуют и окончательно сваривают шов с первой стороны, а затем — со второй стороны соединения. Режимы многопроходной сварки под флюсом приведены в табл. 2.29.

Сварку тавровых, угловых и нахлесточных соединений выполняют в двух основных положениях: «в лодочку» и «в угол» (табл. 2.30). Основная трудность сварки угловых швов «в лодочку» — предупредить протекание металла в зазоры, поэтому к сборке таких соединений следует предъявлять жесткие требования.

Основным условием получения качественных швов при положении «в угол» является выбор режима сварки (табл.2.31) и точное расположение конца электрода относительно кромок свариваемого изделия. Электрод располагают таким образом, чтобы угол, образуемый электродом и вертикальной стенкой, составлял 35—40°. При сварке наклонным электродом за один проход можно получить швы катетом до 8 мм. Швы с большим катетом выполняются в несколько проходов.

Рекомендуемые выше технологические процессы обеспечивают получение сварных соединений, равноценных основному металлу.

Известно, что с увеличением прочности стали повышается ее чувствительность к концентрации напряжений, обусловленных формой сварных соединений. При отрицательных температурах влияние этого фактора усиливается. Поэтому поверхность сварных соединений обрабатывается: усиление шва снимается абразивными кругами или места перехода от шва к основному металлу оплавляются неплавящимся электродом в аргоне. Такая обработка особенно эффективна для соединений, работающих при ударных и знакопеременных нагрузках.

Таблица 2.27. **Механические свойства металла шва при ш**

Марка стали	Толщина листа, мм	Марка сварочной проволоки, флюса	Форма подготовленных кромок
14Х2ГМР	40	Св-08ХН2ГМЮ, АН-17М	
12ГН2МФАЮ	40	Св-08ХН2ГМЮ, АН-17М	
12ГН2МФАЮ	40	Св-08ХН2ГМЮ, АН-43	
12ГН2МФАЮ	40	Св-08ХН2Г2СМЮ, АН-17М	
14ХГН2МДАФБ	20	Св-08ХН2ГМЮ, АН-17М	
14Х2ГМР	12	Св-08ХН2М, АН-17М	

2.3.4. Особенности сварки сталей с повышенным содержанием углерода

Для изготовления большинства сварных конструкций применяются низкоуглеродистые и низколегированные стали с ограничением содержания углерода до 0,22 %, так как с увеличением его содержания резко ухудшается свариваемость стали. Углерод определяет структуру, механические и технологические свойства стали, ее поведение при эксплуатации. Это наиболее дешевый и недефицитный элемент, повышающий прочность стали, причем он оказывает значительно большее влияние на временное сопротивление, чем на предел текучести, уменьшая отношение $\sigma_т : \sigma_в$. С повышением содержания углерода снижается пластичность и вязкость сталей.

Стали с повышенным содержанием углерода обладают хорошими литейными свойствами, поэтому стальное литье обычно содержит более 0,20 % углерода.

Углерод усиливает закаливаемость стали. Конструкционные стали с повышенным содержанием углерода (0,25—0,55 %), как правило, подвергаются закалке и отпуску, что придает им высокую твердость и износостойкость. Ценные свойства сталей с повышенным содержанием углерода широко используются для изготовления деталей машин: валов осей, зубчатых колес, звездочек, корпусов и других деталей самых различных форм. Применяются такие стали и для изготовления арматуры.

Таблица 2.28. **Режимы автоматической сварки под флюсом стыковых соединений без скоса кромок на флюсовой подушке**

Тип шва	Форма соединения	Толщина стали, мм	Ширина зазора, мм	Диаметр проволоки, мм	Режим сварки			Давление воздуха в шланге флюсовой подушки, МПа
					$I_{св}$, А	$U_д$, В	$v_{св}$, м/ч	
Односторонний		3	0—1,5	2	275—300	28—30	35—50	0,08
				3	400—450	30—32	40—55	0,08
		5	0—2,5	2	425—450	30—33	30—38	0,1—0,15
				4	550—620	32—34	35—40	0,1
		8	0—3,5	4	650—700	34—36	28—35	0,1—0,15
Двухсторонний		8	2—3	3	400—450	32—34	16—20	—
		12	2—3	3	550—580	36—38	25—30	—
		16	3—4	4	600—650	36—39	20—25	—
		20	3—4	4	650—700	38—40	16—20	—

томатической сварке под флюсом

$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	ψ, %	KCU, Дж/см², при температуре испытания, °С			KCV, Дж/см², при температуре испытания, °С	
				20	−40	−70	−40	−70
647	842	22,7	57,5	119—141 / 130	108—120 / 112	72—104 / 90	34—42 / 37	26—34 / 29
631	807	18,6	57,1	100—122 / 109	75—102 / 93	61—79 / 69	30—35 / 32	21—24 / 22
696	837	17,6	55,6	92—120 / 103	41—60 / 50	20—35 / 26	17—20 / 18	10—12 / 11
735	840	18,0	57,8	120—130 / 123	80—117 / 98	77—90 / 85	40—44 / 42	30—38 / 35
715	875	16,0	55,6	97—115 / 108	90—106 / 98	75—87 / 81	25—27 / 26	17—30 / 24
640	780	18,6	55,0	102—120 / 110	68—93 / 75	53—75 / 64	32—36 / 34	21—27 / 23

Сварка часто является единственным способом изготовления и ремонта деталей машин, станин технологического оборудования, поэтому целесообразно изложить особенности технологии сварки сталей с повышенным содержанием углерода.

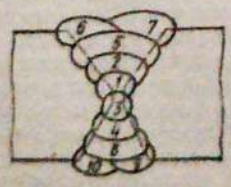
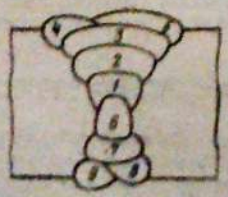
Сварку таких сталей затрудняют прежде всего низкая стойкость швов против образования горячих трещин и вероятность образования холодных трещин. Сложно также получить металл шва и зоны термического влияния со свойствами, равноценными свойствам основного металла.

Углерод уменьшает стойкость швов против образования горячих трещин, усиливает вредное влияние серы и фосфора. Критическое содержание углерода в шве зависит от конструкции узла, формы шва и содержания в нем других элементов, предварительного подогрева.

Существующие способы повышения стойкости против образования горячих трещин направлены на ограничение содержания в швах элементов, оказывающих отрицательное влияние, снижение уровня растягивающих напряжений, получение швов оптимальной формы с малой степенью их химической неоднородности.

Стали с повышенным содержанием углерода склонны к образованию малопластичных структур мартенситного типа в зоне термического влияния. Под воздействием сварочных

Таблица 2.29. **Ориентировочные режимы автоматической сварки под флюсом стыковых соединений со скосом двух кромок**

Форма подготовленных кромок	Форма соединения	Толщина стали, мм	Диаметр проволоки, мм	Номер прохода шва	Режим сварки			Полярность
					$I_{св}$, А	$U_д$, В	$v_{св}$, м/ч	
Со скосом двух кромок		8—30	3—4	1	400—450	36—38	18	Прямая
		8—12	3—4	2 и последующие	400—450	30—33	16—20	Обратная
		14—20	4—5		500—550	32—34	16—20	»
		22—30	4—5		570—620	34—36	16—20	»
С двумя симметричными скосами двух кромок		24—50	3—4	1	400—450	36—38	18	Прямая
		24—36	4—5	2 и последующие	520—650	36—38	16—24	Обратная
		38—50	4—5		620—700	36—38	16—24	»
С двумя несимметричными скосами двух кромок		24—50	4—5	1 и последующие	550—620	32—34	20—30	»
		52—160	4—5		650—760	34—37	20—35	»

и структурных напряжений может произойти разрушение малопластичного металла, чему способствует наличие в металле диффузионного водорода. Для предупреждения образования холодных трещин применяются способы, которые заключаются в устранении факторов, способствующих их образованию.

Технология изготовления сварных соединений на сталях с повышенным содержанием углерода, имеющих более низкую стойкость против образования трещин, должна предусматривать: 1) применение электродов и сварочной проволоки с низким содержанием углерода; 2) использование режимов сварки, конструктивных и технологических мер (разделка кромок, применение увеличенного вылета, введение дополнительной присадочной проволоки и др.), обеспечивающих минимальный переход углерода из основного металла в шов; 3) введение в шов элементов (марганец, кальций, РЗМ), способствующих образованию тугоплавких или изолированных округлых сульфидных включений; 4) применение оптимального порядка наложения швов, устранение излишней жесткости узлов, способов и режимов сварки, других мероприятий, обеспечивающих минимальное значение возникающих напряжений; 5) выбор оптимальной формы шва и уменьшение химической неоднородности; 6) снижение содержания диффузионного водорода до минимума (применение низководородистых электродов, очистка кромок и проволоки, осушка защитных газов, прокалка электродов, порошковой проволоки и флюсов); 7) обеспечение замедленного охлаждения сварного соединения (применение многослойной, двухдуговой или многодуговой сварки, наплавка отжигающего валика, использование экзотермических смесей и др.).

При сварке сталей с повышенным содержанием углерода основной металл тщательно очищается от ржавчины, масла, влаги, рыхлого слоя окалины и других загрязнений, так как они являются источниками водорода и могут вызвать образование пор и трещин. Очищать следует кромки и прилегающие к ним участки шириной не менее 10 мм. Это обеспечивает более плавный переход к основному металлу и повышенную прочность шва при переменных нагрузках.

Сборка под сварку деталей с повышенным содержанием углерода, как правило, выполняется с обязательным зазором, который зависит от толщины соединяемых деталей и должен быть на 1—2 мм больше, чем зазор при сборке элементов из хорошо свариваемых сталей. Свариваемые детали должны иметь разделку кромок при толщине металла 4 мм и более, что снижает переход углерода в шов. Учитывая высокую склонность к закалке, следует избегать прихваток малого сечения и длины или перед наложением прихваток применять местный предварительный подогрев.

Для сварки сталей с повышенным содержанием углерода (до 0,4 %) можно применять те же сварочные материалы, что и для сварки низколегированных сталей, с некоторыми ограничениями. Для ручной сварки применяют электроды с покрытием основного типа, обеспечивающие низкое содержание диффузионного водорода в наплавленном металле (марки УОНИ 13/45, УОНИ 13/55 и др.).

При механизированной сварке в защитном газе рекомендуется использовать проволоки марок Св-08Г2С, Св-09Г2СЦ или другие равноценные указанным, а также смесь углекислого газа и кислорода при содержании кислорода до 30 % или углекислый газ. Могут применяться смеси газов на основе аргона с окислительными свойствами (70...75 % Ar + 20...25 % CO_2 + 5 % O_2). Предпочтение следует отдавать проволоке диаметром 1,2—1,4 мм. Проволока диаметром более 1,4 мм может применяться для сварки заполняющих слоев соединений с разделкой кромок. При сварке сталей с повышенным содержанием углерода, прошедших термическую обработку или легированных одним или несколькими элементами (40Х, 38ХС, 45Г и др.), указанные выше электродные проволоки не обеспечивают требуемых механических свойств. В таких случаях для механизированной сварки применяют комплексно-легированные проволоки марок Св-08ГСМТ, Св-08ХГСМА, Св-08Х3Г2СМ и др.

Таблица 2.30. **Ориентировочные режимы механизированной сварки под флюсом тавровых соединений при положении «в лодочку»**

Катет шва, мм	Диаметр проволоки, мм	$I_{св}$, А	$U_д$, В	$v_{св}$, м/ч
6	2—3	450—500	34—36	25—30
8	3—4	550—600	34—36	25—30
10	4—5	620—670	34—36	20—25
12	4—5	650—700	36—38	16—20

Таблица 2.31. **Ориентировочные режимы автоматической сварки под флюсом тавровых соединений при положении «в угол»**

Катет шва, мм	Число швов	Диаметр проволоки, мм	$I_{св}$, А	$U_д$, В	$v_{св}$, м/ч
4	1	2	280—300	29—32	40—42
6	1	2	360—380	30—33	38—40
8	1	2	440—460	35—38	38—40
10	2	2	300—350	30—32	16—18
12	2	2	300—350	30—32	12—14
14	2—3	2	300—350	30—32	10—12
16	3	2	350—400	32—34	16—18
18	3—4	2	350—400	32—34	16—18

Автоматическую сварку под флюсом следует выполнять проволоками марок Св-08А, Св-08АА, Св-08ГА в сочетании с флюсами АН-348А, ОСЦ-45. Перспективно применение флюсов АН-43 и АН-47, обладающих хорошими сварочно-технологическими свойствами и высокой стойкостью против образования трещин.

Сварочные материалы должны соответствовать требованиям действующих стандартов и технических условий. Необходимо применять проволоки без ржавчины и загрязнений, флюсы и электроды непосредственно перед использованием прокаливать при температурах, указанных в сопроводительной документации. Должен применяться сварочный диоксид углерода (углекислый газ). Применение пищевого диоксида углерода разрешается при условии дополнительной осушки.

Режимы сварки обеспечивают минимальное проплавление основного металла и оптимальную скорость охлаждения. Правильность выбора режимов сварки, обеспечивающих оптимальную скорость охлаждения, можно оценить замером твердости металла сварного соединения, которая не должна превышать 350 *HV*.

Сварка ответственных узлов выполняется не менее чем в два прохода, сварные швы должны иметь плавный переход к основному металлу. Частые обрывы дуги, ожоги основного металла и вывод кратера на основной металл недопустимы.

После сварки следует обеспечить замедленное охлаждение сварных соединений. Для этого сваренный узел укрывают теплоизоляционным материалом, помещают в специальный термостат или применяют послесварочный нагрев.

Сварку ответственных конструкций из сталей с повышенным содержанием углерода, узлов с жестким контуром и т. п. выполняют с предварительным подогревом. Температура предварительного подогрева обычно находится в пределах 100—400 °С. Чем выше содержание углерода и легирующих элементов и толщина свариваемых элементов, тем выше температура предварительного подогрева.

2.4. СПОСОБЫ РЕЗКИ ПРОКАТА

К числу основных операций, используемых при изготовлении деталей, относится резка металлопроката, осуществляемая механическими и термическими способами. Металлопрокат, поступающий на резку, предварительно подвергается правке, очистке и консервации [13].

2.4.1. Механические способы резки проката

Механические способы резки используются при роспуске листов, вырезке деталей из листового и сортового проката, пазов, окон [13, 14, 18, 19].

Резка деталей с прямолинейными кромками из листов толщиной до 40 мм, как правило, проводится на ножницах с наклонным ножом (гильотинных) (рис. 2.45, *а*). Разрезаемый лист *2* заводится между нижним *1* и верхним *4* ножами до упора *5* и зажимается прижимом *3*. Верхний нож, нажимая на лист, производит скалывание. Прямой рез со скосом кромки под сварку можно получить, используя специальные ножницы (рис. 2.45, *б*). При включении гидроцилиндра *1* качающийся нажедержатель *3* поворачивается сначала вокруг оси *А*, выполняя прямой рез с помощью ножа *7*. Когда упор *2* нажедержателя *3* дойдет до выступа детали *4*, они поворачиваются совместно вокруг оси *Б*, отводя прижим *5* от регулируемого упора *6*. Нож *8* совершает рез на скос.

Дисковые ножницы (рис. 2.45, *в*) позволяют вырезать листовые детали с прямолинейными кромками толщиной 20—25 мм. Для получения листовой заготовки заданной ширины с параллельными кромками дисковые ножи целесообразно располагать попарно на заданном расстоянии друг от друга (рис. 2.45, *г*).

При резке на ножницах металл подвергается значительной пластической деформации. Если кромка реза в дальнейшем попадает в зону сварки и полностью переплавляется, то дополнительной обработки ее не требуется. Если же кромка остается свободной, а конструкция работает при переменных нагрузках, то слой пластически деформированного металла надо удалить последующей механической обработкой.

Усилие, необходимое для резки листовой стали на гильотинных ножницах, определяется по формуле [14]

$$P_р = K \cdot 0{,}6\sigma_в\delta_s \frac{h^2}{\operatorname{tg}\varphi} \times \left(1 + \frac{1}{1 + \dfrac{10\delta_s}{\sigma_в y^2 x}} + z\,\frac{\operatorname{tg}\varphi}{0{,}6\delta_s}\right), \qquad (2.2)$$

где $P_р$ — усилие, Н; K — коэффициент, зависящий от толщины разрезаемого металла и состояния режущих кромок ножей, при толщине разрезаемого металла 4—10; 12—20 и 22—32 мм значения K соответственно равны 1,2; 1,15 и 1,1; $\sigma_в$ — расчетное временное сопротивление металла при растяжении, МПа (табл. 2.32); δ_s — относительное удлинение ($\Delta l/l_0$), определяемое по графику, приведенному на рис. 2.46, в зависимости от величины $\sigma_{вр}$; h — толщина разрезаемого металла, мм; φ — угол наклона верхнего ножа (угол створа), град (см. рис. 2.45, *а*); y — относительный зазор между ножами, т. е. отношение зазора Δ к толщине разрезаемого металла (табл. 2.33); $x = H/h$, где H — расстояние между режущей кромкой нижнего ножа и центром прижима (см. рис. 2.45, *а*, табл. 2.34); z — коэффициент, зависящий от значения $\lambda = l \operatorname{tg}\varphi/\delta_s h$, где l — длина обрезаемой детали (см. рис. 2.45, *а*, рис. 2.47).

Существенным недостатком резки является возникновение в плоскости реза сколов и затяжек металла. На рис. 2.48 схематически показано влияние настройки ножей на характер дефектов реза.

Одним из параметров резки является угол наклона ножа. В зависимости от толщины разрезаемого металла он обычно колеблется от 0,5 до 4—5°. Для металла малых толщин требуется минимальный угол наклона ножа, в противном случае вырезаемая деталь будет иметь большое коробление.

Таблица 2.32. Значения $\sigma_в$ для строительных сталей

Класс прочности	Марка стали	$\sigma^к_{вр}$, МПа	$\sigma_в$, МПа
С 38/23	Ст3, В18Г, М16С	380	470
С 44/29	09Г2, 09Г2С	440	540
С 46/33	12Г2, 10Г2С1, 15ХСНД	460	655
С 52/40	10ХСНД	520	680
С 60/45	16Г2АФ, 15Г2СФ	600	740
С 70/60	12Г2СМФ, 14Х2ГМР	700	970
С 85/75	15ХГ2СМФР	850	1190

Примечание. $\sigma^к_{вр}$ — временное сопротивление стали при растяжении в соответствии с классом прочности; $\sigma_в$ — расчетное сопротивление стали при растяжении, полученное в результате статистических исследований технологических свойств стали, равное среднему значению временного сопротивления стали плюс два квадратичных отклонения.

Таблица 2.33. Значения Δ и y при заданной толщине разрезаемого металла

h	Δ	y	h	Δ	y
3	0,2	0,067	12	0,9	0,075
4	0,3	0,075	16	1,1	0,069
6	0,45	0,075	20	1,4	0,070
8	0,55	0,069	25	1,75	0,070
10	0,65	0,065	32	2,2	0,069

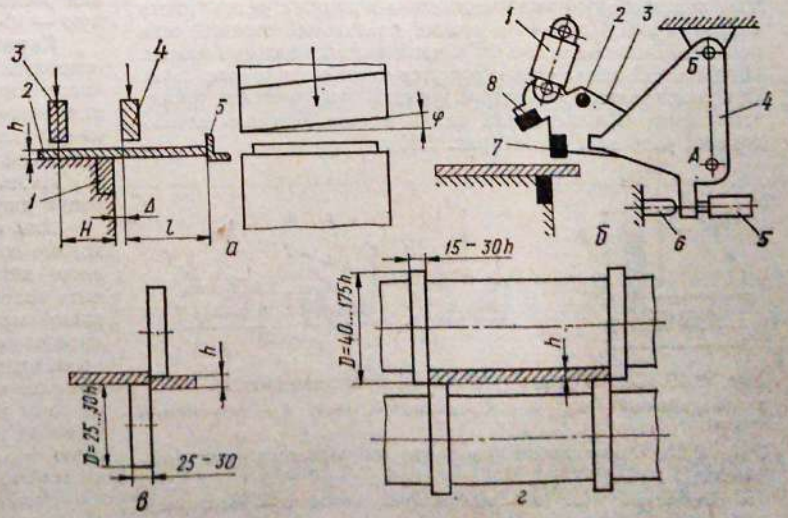


Рис. 2.45. Схема резки металла на ножницах различных типов.

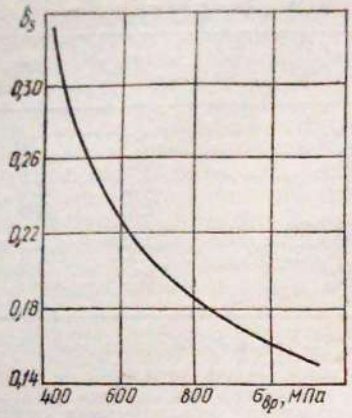


Рис. 2.46. Зависимость относительного удлинения от временного сопротивления.

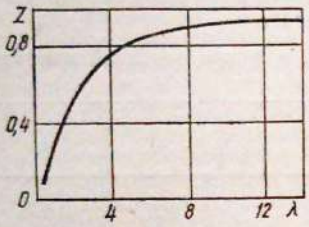


Рис. 2.47. Зависимость между параметрами λ и z.

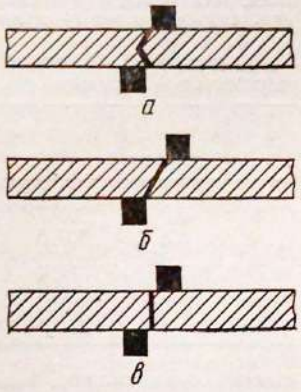


Рис. 2.48. Зависимость качества реза от зазора ножей:
а — малый; *б* — большой; *в* — нормальный.

Для резки листового и сортового проката применяют пресс-ножницы, в которых ножи расположены параллельно. Скалывание происходит одновременно по всей длине реза, совпадающей с длиной ножей. Усилие, необходимое для резки на пресс-ножницах любого профиля (полосы, листовой или угловой стали), определяется по формуле

$$P_р = \sigma_{ср} F, \qquad (2.3)$$

где F — площадь сечения разрезаемого профиля, мм²; $\sigma_{ср}$ — временное сопротивление металла срезу, МПа, значения которого для различных марок сталей приведены в [14].

Резка уголков выполняется на универсальных сортовых ножницах, комбинированных пресс-ножницах и специализированных уголковых ножницах. Схема резки уголков на всех видах оборудования одинакова и схожа с резкой листа скалыванием. При резке уголка подвижный верхний нож перемещается под углом 45° к неподвижным нижним ножам. При этом обе полки уголка режутся одновременно (рис. 2.49). При резке балок и швеллеров верхний нож вначале прорезает стенку швеллера или балки, а затем, двигаясь влево и вправо, разрезает полки (рис. 2.50).

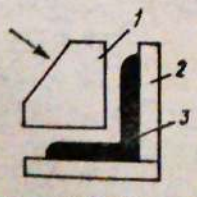


Рис. 2.49. Схема резки уголка на пресс-ножницах:
1 — подвижный нож; *2* — неподвижный нож; *3* — разрезаемый уголок.

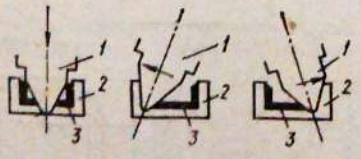


Рис. 2.50. Схема резки швеллера на сортовых пресс-ножницах:
1 — подвижный нож; *2* — неподвижные ножи; *3* — разрезаемый швеллер.

Таблица 2.34. Значения x при заданных H и h

H	h	x
65	3	21,7
	4	16,2
	6	10,8
70	10	7,0
	12	5,8
	16	4,4
90	20	4,5
	25	3,6
	32	2,8

Резка сортового и фасонного проката на фрезерно-отрезных станках (пилах) с зубчатыми дисками менее производительна, но обеспечивает бо́льшую чистоту и точность резки.

Повысить производительность можно с помощью абразивно-отрезных станков, в которых используются абразивные круги из карбида кремния на вулканитовой связке или из электрокорунда на бакелитовой связке. Последние позволяют увеличить скорость резки в три раза по сравнению с кругами из карбида кремния и не требуют охлаждения во время работы. Еще более эффективно применение кругов с включением искусственных алмазов. Скорость резки при этом достигает 80 м/с.

Резка труб выполняется на фрезерно-отрезных станках, фрикционных пилах, специальных трубоотрезных станках. Самая высокопроизводительная резка труб небольших диаметров круглого и прямолинейного сечения — рубка на прессах с помощью специальных штампов. Более качественную резку обеспечивают трубоотрезные станки.

2.4.2. Термические способы резки проката

При изготовлении деталей и заготовок сварных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей наибольшее распространение получили кислородная и плазменная резка, а в последние годы все шире применяется лазерная резка [11, 12, 15].

Способ резки выбирается с учетом толщины металлопроката, требуемой точности и качества резки, экономичности того или иного способа в каждом конкретном случае, а также имеющегося оборудования. Считается, что при резке низкоуглеродистых и низколегированных сталей кислородную резку наиболее целесообразно использовать для раскроя проката толщиной свыше 40 мм, плазменную — 10—40 мм, а лазерную — до 10 мм.

Кислородная резка. Процесс кислородной резки, основанный на свойстве нагретого металла сгорать в струе чистого кислорода, протекает нормально, если температура плавления образующихся оксидов меньше температуры плавления основного металла, а сами оксиды обладают достаточной жидкотекучестью [11].

Интенсивность окисления железа зависит от концентрации кислорода на поверхности, подвергаемой окислению.

Для получения оптимальных результатов резки необходимо соблюдать следующие условия: количество подаваемого кислорода должно быть достаточным, чтобы окислить возможно больший объем металла, определяемый толщиной металла, шириной и длиной реза; струя режущего кислорода имеет такую скорость, чтобы процесс окисления происходил по всей толщине металла, а образующиеся жидкие и газообразные продукты сгорания полностью удалялись из зоны реакции; струя режущего кислорода при выходе из сопла имеет и возможно дольше сохраняет цилиндрическую форму, чтобы обеспечить равномерную ширину реза по всей толщине разрезаемого металла.

Установлено, что уменьшение чистоты кислорода на 1 % снижает скорость резки в среднем на 20 %.

Зависимость скорости резки от чистоты кислорода приведена ниже:

Чистота кислорода, % (по объему)	99,8	99,5	99,2	99,0	98,5	98,0
Скорость резки, %	119	100	92	90	84	74

Наиболее целесообразно и экономически оправдано применение при машинной кислородной резке кислорода чистотой 99,5 % и более (ГОСТ 5583—78).

Давление режущего кислорода зависит в первую очередь от толщины разрезаемого металла и диаметра канала сопла режущего кислорода. Для увеличения скорости резки часто повышают давление кислорода, что для определенных толщин разрезаемого металла дает положительный эффект. Однако при повышении оптимального предела давления кислорода скорость резки понижается и ухудшается качество поверхности реза.

При резке листовой стали толщиной 5—100 мм оптимальным давлением является 0,2—0,6 МПа, а при резке стали толщиной более 100 мм — 0,8—1 МПа.

На заводах металлоконструкций обычно имеются кислородные станции или газификационные установки для получения газообразного кислорода из жидкого, доставляемого с других предприятий в специальных изотермических емкостях. При меньшем расходе кислорода его транспортируют в кислородных баллонах (емкость 40 л, масса 60 кг).

На современных заводах организуется централизованное обеспечение постов кислородом и горючими газами по цеховым разводкам. Для кислорода или газов, поставляемых в баллонах, применяются рампы — на группу баллонов приходится одно отборное устройство.

Подогревающее пламя при кислородной резке образуется в результате сгорания смеси горючих газов или паров с кислородом.

Наиболее распространенным горючим газом при кислородной резке является ацетилен. Однако он дорог, относительно дефицитен и взрывоопасен. Поэтому во многих случаях целесообразно использовать вместо ацетилена другие горючие газы — пропан, бутан, пропан-бутановую смесь, природный газ и др.

Подогревающее пламя в зависимости от соотношения в нем горючего газа и кислорода может быть нормальным, восстановительным и окислительным.

Для ацетилено-кислородного пламени характерны следующие соотношения: для нормального $\beta = \frac{\text{расход кислорода}}{\text{расход ацетилена}} = 1{,}15$; для восстановительного β — до 1,1; для окислительного β — до 1,7.

При разделительной кислородной резке от мощности подогревающего пламени зависит не только длительность начального подогрева, но и предельно достижимая скорость резки (при резке небольших толщин), предельная глубина прорезания (при резке больших толщин), а также качество поверхности реза (состояние верхних кромок, величина отставания линии реза и др.).

При резке тонколистовой стали (толщиной до 15 мм) увеличение мощности пламени на 90 % позволяет повысить скорость резки на 40 %. Экономически оправдано пламя с избытком кислорода ($\beta = 1{,}7$), так как при этом поверхность металла нагревается почти в 2 раза быстрее, чем при нагреве нормальным пламенем.

При резке металлопроката толщиной 15—100 мм чем меньше (до некоторого предела) мощность подогревающего

Таблица 2.35. **Режимы ручной кислородной резки резаком РЗР-62 с применением пропан-бутана**

Наименование показателей	Толщина металла, мм				
	5—15	15—20	50—100	100—200	200—300
Номер мундштука:					
наружного	1	1	1	2	2
внутреннего	1	2	3	4	5
Давление кислорода, МПа	0,22—0,25	0,25—0,30	0,30—0,40	0,40—0,70	0,70—1,1
Расход, м³/ч:					
режущего кислорода	2—2,5	5—10	10—15	15—26	26—40
кислорода на подогрев	1,4—1,8	1,7—2,1	1,7—2,3	2,1—2,6	2,5—3
пропан-бутана	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7
Скорость резки, мм/мин	400—300	350—200	200—120	150—90	100—80

Таблица 2.36. **Режимы ручной кислородной резки с применением природного газа**

Наименование показателей	Толщина металла, мм						
	10—15	20—25	30—40	45—55	60—65	70—80	85—100
Номер внутреннего наконечника	1	2	3	4	4	5	5
Давление, МПа:							
природного газа	0,02	0,025	0,025—0,03	0,035—0,04	0,045	0,045—0,050	0,05—0,06
кислорода	0,25—0,3	0,35—0,4	0,45—0,55	0,60—0,65	0,7	0,75—0,80	0,80—0,90
Скорость резки, мм/мин	320—285	257—237	220—192	182—167	158—151	147—137	133—124
Расход природного газа, м³/ч	0,575—0,634	0,770—0,785	0,860—0,960	0,99—1,1	1,14—1,19	1,25—1,32	1,37—1,5
Расход кислорода, м³/ч:							
на подогрев	0,42—0,47	0,53—0,57	0,62—0,70	0,73—0,8	0,83—0,86	0,88—0,96	0,98—1,06
на резку	1,34—1,83	2,30—2,77	3,22—4,1	4,57—5,55	5,96—6,42	6,98—7,92	8,47—10,2

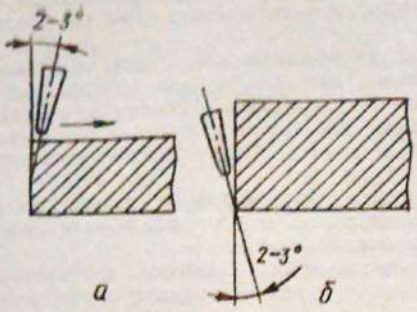


Рис. 2.51. Схема начала кислородной резки.

пламени, тем меньше оплавление верхних кромок реза и термическая деформация изделия; для этих условий наиболее экономично пламя с заметным избытком кислорода.

При резке стали толщиной 100—300 мм целесообразно вести процесс при $\beta = 1{,}1$.

Для предотвращения засорения резака при пробивке отверстия в момент пуска режущего кислорода резак необходимо поднимать над листом на высоту 15—25 мм, а при ручной резке наклонять его в сторону, обратную направлению резки на 15—20° от вертикали.

В процессе резки расстояние между торцом мундштука резака и поверхностью разрезаемого металла следует поддерживать постоянным. Зависимость расстояния между резаком и металлом от толщины металла приведена ниже:

Толщина металла, мм	3—10	10—25	25—50
Расстояние, мм	2—3	3—4	3—5
Толщина металла, мм	50—100	100—200	200—300
Расстояние, мм	4—6	5—8	7—10

Скорость резки зависит от толщины разрезаемого металла.

При чистовой машинной резке о правильности выбранной скорости резки судят по характеру вытекания шлаков из разреза и наличию грата на нижних кромках. При нормальной скорости поток искр спокоен и шлак вытекает равномерно под некоторым углом вперед к оси пламени. На нижней кромке грата не наблюдается. Если поток искр сильно ослабевает, значит, скорость чрезмерна, что может вызвать непрорез металла и образование выхватов.

Режимы ручной и машинной кислородной резки с использованием в качестве горючих газов ацетилена и его заменителей — пропан-бутана, природного газа — приведены в табл. 2.35—2.37.

Таблица 2.38. Режимы пакетной резки

Толщина листа, мм	Число листов в пакете, шт.	Давление режущего кислорода, МПа	Скорость резки, мм/мин
4	15	0,10—0,11	200
6	12	0,11—0,12	180
10	8	0,12—0,14	165
12	6	0,12—0,14	180
16	6	0,12—0,14	165
20	4	0,12—0,14	165
24	3	0,12—0,14	180
30	3	0,13—0,15	160
60	2	0,14—0,17	150

При выполнении кислородной резки процесс следует начинать с нагревания участка до температуры, близкой к температуре плавления металла, затем включить струю режущего кислорода и перемещать резак или включить переносную машину. При толщине металла до 20 мм резку необходимо начинать с верхней кромки (рис. 2.51, *а*), а при большей толщине — с нижней кромки с постепенным выходом по торцу к верхней кромке (рис. 2.51, *б*).

Начало резки облегчают зарубками на местах реза или проволокой, введенной в пламя резака.

При резке тавра или двутавра резак при приближении к середине полки наклоняется так, чтобы режущая струя кислорода была направлена от полки, и в таком положении продолжают резку. После этого, не прерывая процесс резки, разрезают стенку. Схемы резки различных профилей приведены на рис. 2.52. При резке нескольких профилей круглого (квадратного) сечения их следует укладывать в плотный ряд для безостановочной резки.

Производительность и качество кислородной резки можно повысить, применяя различные методы и приемы. Так, для вырезки однотипных деталей из тонких листов рекомендуется пакетная резка: несколько листов складывают в пачку, которая плотно сжимается струбцинами. Для облегчения начала резки листы укладывают со сдвигом друг относительно друга на 0,5—1 мм. Резка начинается с нижней кромки, затем резак постепенно поднимается выше по торцу пакета до верхней кромки, после этого за один проход выполняется вырезка деталей, как при резке толстого листа. Для качественных резов листы в пакете необходимо выправить, очистить от окалины, ржавчины, других загрязнений и плотно стянуть. Зазор между отдельными листами не должен превышать 0,1 мм при обычной резке, при пакетной резке кислородом низкого давления зазоры могут быть и больше — до 3—4 мм. Листы предварительно режут

Таблица 2.37. **Режимы машинной резки низкоуглеродистых сталей с применением ацетилена и природного газа**

Наименование показателей	Толщина металла, мм														
	3	5	8	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	125	150
Номер мундштука:															
наружного	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
внутреннего	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4
Скорость резки ацетиленовым пламенем, мм/мин:															
прямолинейная	880	730	615	560	485	440	405	390	345	310	290	265	240	220	200
фигурная	820	680	570	530	450	405	380	350	320	290	275	250	225	205	190
Скорость резки при использовании смеси природного газа с кислородом, мм/мин:															
прямолинейная	790	655	555	505	435	395	365	340	300	275	260	240	215	195	185
фигурная	740	610	475	475	405	360	340	315	285	260	245	225	203	190	75

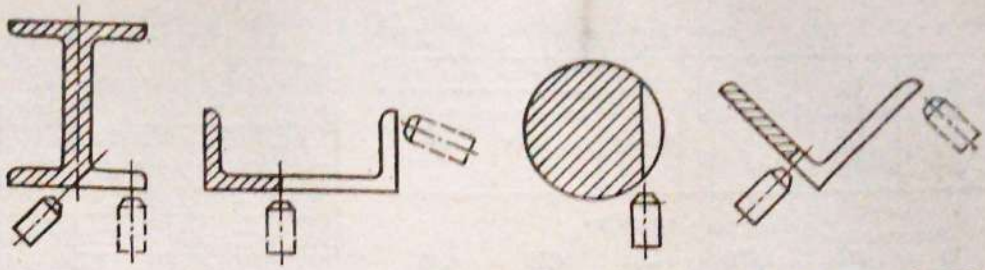


Рис. 2.52. Схемы резки профильной стали.

на заготовки размером 750 × 1500 мм, правят и складывают в пакет. Зависимость числа листов в пакете от их толщины приведена ниже:

Толщина листа, мм	4	6	10	12
Число листов в пакете, шт.	12—20	10—15	8—12	6—10

Толщина листа, мм	16	20	24	30	60
Число листов в пакете, шт.	5—8	3—6	3—5	2—4	2

Ориентировочные режимы пакетной резки приведены в табл. 2.38.

Резка с кислородной завесой отличается от обычной кислородной резки тем, что струя режущего кислорода изолируется дополнительным кольцевым потоком кислорода меньшего давления от вредного влияния воздуха и продуктов сгорания, и осуществляется специальным резаком. Чистота кислорода — не менее 99,2 %. При этом качество реза существенно улучшается, но ширина реза больше обычной и составляет 4,5—5 мм.

Резка смыв-процессом выполняется с применением трех струй режущего кислорода — основной и двух вспомогательных. Основная струя выполняет ту же роль, что и режущие струи при обычной резке, вспомогательные дожигают жидкие шлаки и неровности с более полным окислением. В результате получаются ровные кромки с шероховатостью в 6—8 раз меньше, чем при обычной резке, скорость процесса возрастает в 1,8—2,3 раза. Удельный расход кислорода увеличивается в 1,8—2,45 раза, пропан-бутана — в 1,5—1,85 раза.

Плазменная резка. Для термической резки используются так называемые сжатые дуги, отличающиеся интенсифицированным плазмообразованием в результате обдува дуги соосным или вихревым потоком газа [11, 12]. Сжатая плазменная дуга обладает свойством самопроизвольно углубляться в металл, поэтому ее называют проникающей плазменной дугой.

Основными параметрами режима плазменной резки являются напряжение дуги, ток, диаметр сопла, скорость резки и расход плазмообразующих газов. При плазменной резке напряжение дуги составляет 65—200 В.

Сжатие дуги и охлаждение наружных ее слоев увеличивают напряжение дуги, поэтому при уменьшении сечения сопла и увеличении расхода плазмообразующего газа напряжение дуги возрастает.

Наименьшее напряжение дуга имеет при применении аргона. При резке в среде азота напряжение существенно увеличивается. Еще большее увеличение напряжения вызывает добавка в плазмообразующий газ водорода. При резке в среде кислорода напряжение дуги несколько ниже, чем при резке в среде азота, а при резке в воздухе оно имеет промежуточное значение, т. е. ниже, чем в азоте, и выше, чем в кислороде.

Напряжение дуги определяется условиями резки. Оно зависит от конструкции резака, диаметра сопла, вида и расхода плазмообразующего газа, толщины разрезаемого металла, скорости резки. Значение тока режущей дуги можно изменять в широких пределах, регулируя напряжение источника питания. Практически для обеспечения наивысшей производительности резки ток режущей дуги устанавливают максимальным для выбранного диаметра сопла.

Плотность тока, которую выдерживает сопло без разрушения, является показателем степени совершенства конструкции плазмотрона. Достигнутые в наиболее совершенных плазмотронах значения плотности тока приведены на рис. 2.53 [12].

Приведенные на рис. 2.53 значения тока в производственных условиях обычно снижаются на 20—40 %, что объясняется стремлением обеспечить надежное протекание процесса резки (исключить образование двойной дуги и выход из строя узлов плазмотрона).

На процесс существенно влияет скорость резки. С увеличением скорости анодное пятно дуги поднимается к верхней кромке разрезаемого листа и, следовательно, возрастает неравномерность выделения тепла по толщине листа. Предельное значение скорости резки характеризуется началом непрорезания листа. Максимальное значение скорости резки для низкоуглеродистых и низколегированных сталей толщиной 6—30 мм соответствует ширине реза по нижней плоскости листа, равной 1,5—2 мм. В первом приближении ширину реза по верхней кромке можно принимать равной двум диаметрам сопла.

Расход режущего газа устанавливается таким, чтобы обеспечить надежную изоляцию стенок сопла от столба дуги. Чем больше расход, тем эта изоляция осуществляется надежнее. Однако чрезмерный расход газа нецелесообразен, так как на нагрев газа затрачивается энергия и при большом его расходе скорость резки снижается. При разработке режима резки обычно экспериментально определяют минимальное количество газа, при котором процесс резки протекает без двойного дугообразования.

Для плазменной резки применяются как однокомпонентные (аргон, азот, гелий, кислород), так и многокомпонентные (аргон + водород, воздух, азот + кислород и др.) плазмообразующие среды.

В последние годы для резки низкоуглеродистых и низколегированных сталей в качестве плазмообразующей среды широко применяется воздух. Воздух, применяемый в качестве плазмообразующего газа, должен быть очищен от масла и влаги, количество которой не должно превышать 0,2 г/л воздуха.

В последние годы для улучшения санитарно-гигиенических характеристик процесса воздушно-плазменной резки применяется водяная защита (рис. 2.54). Резка может осуществляться с воздушным зазором между разрезаемым листом и поверхностью воды (рис. 2.54, *а*), с касанием листа

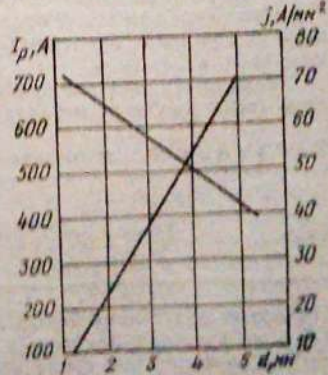


Рис. 2.53. Зависимость допустимых значений тока режущей дуги $I_р$ и плотности тока j от диаметра сопла.

Таблица 2.39. Режимы воздушно-плазменной резки

Толщина металла, мм	Напряжение на дуге, В	Ток резки, А	Скорость резки, см/с		
			обычной	над водой	над водой с водяной завесой
		Аппарат АВПР-2 *			
10	170	300	5,00	4,50	4,12
20	170	300	2,90	2,70	2,50
30	170	300	1,80	1,62	1,50
40	170	300	1,08	0,90	0,80
50	170	300	0,60	0,48	0,40
		Аппарат АПР-403 **			
10	180	200	4,00	3,80	3,60
		300	6,80	6,46	6,12
		400	8,20	7,79	7,38
20	180	200	1,90	1,71	1,60
		300	3,40	3,06	2,89
		400	4,10	3,69	3,48
30	180	200	1,00	0,85	0,80
		300	2,00	1,70	1,60
		400	2,60	2,21	2,08
40	180	200	0,70	0,59	0,56
		300	1,20	1,02	0,96
		400	1,40	1,19	1,12
50	190	200	0,50	0,42	0,40
		300	0,70	0,59	0,56
		400	1,00	0,85	0,80

* Рабочее давление воздуха 0,24 МПа при диаметре сопла 3,5 мм.

** Рабочее давление воздуха 0,4 МПа при том же диаметре сопла.

водной поверхности (рис. 2.54, *б*), с погружением листа в воду (рис. 2.54, *в*), с дополнительной водяной завесой вокруг плазмотрона (рис. 2.54, *г*). При всех вариантах вредные выделения поглощаются водой. Режимы обычной воздушно-плазменной резки и резки с водяной защитой низкоуглеродистых и низколегированных сталей приведены в табл. 2.39.

Резка над поверхностью воды отличается большей склонностью к образованию грата на кромках заготовок по сравнению с обычной воздушно-плазменной резкой. Для подавления процесса образования грата скорость резки над поверхностью воды снижается на 5—15 %. При резке над водой деформации заготовок заметно уменьшаются, на 10—20 % сокращается ширина реза.

Содержание вредных веществ в воздухе в зоне дыхания резчика при плазменной резке над водой находится в пределах допустимых норм (табл. 2.40).

При резке над водой практически полностью исключаются деформации раскройных рам и существенно повышается срок их службы.

Важным параметром процесса плазменной резки является время пробивки металла. При резке стали толщиной

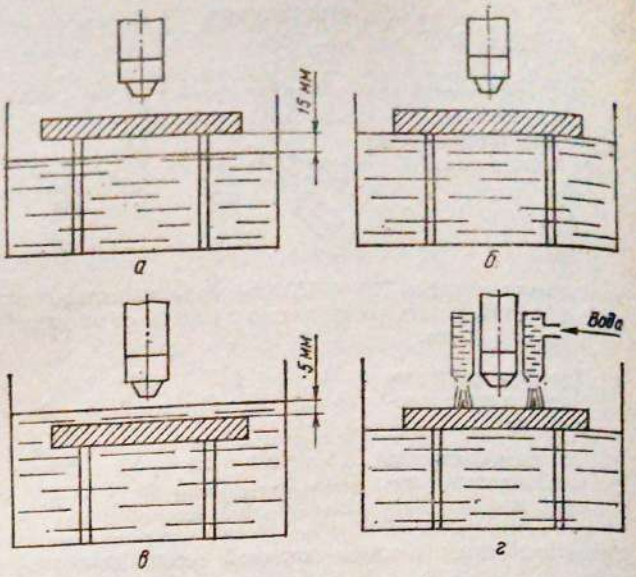


Рис. 2.54. Схемы воздушно-плазменной резки с водяной защитой.

6—20 мм выдержка времени на пробивку составляет около 2 с. Максимальная толщина металла, которую можно пробить без больших затруднений при ручной резке, составляет 40 мм для стали, меди и сплавов на медной основе и 50 мм для алюминия и его сплавов. При резке на переносных и стационарных машинах максимальная толщина пробиваемого листа установлена равной 30 мм для всех металлов. При необходимости пробивки металла большей толщины в начале реза следует просверлить отверстие диаметром не менее 6 мм.

Преимуществами плазменной резки перед кислородной являются: возможность резки любых металлов и сплавов, более высокая производительность при обработке металла малой и средней толщины, уменьшение тепловложения и вследствие этого сокращение зоны термического влияния и термических деформаций, бо́льшая чистота кромок реза. К недостаткам плазменной резки относятся невысокая эффективность (снижение скорости) резки сталей больших толщин, более высокая стоимость оборудования.

Недостаток воздушно-плазменной резки — ухудшение механических свойств кромок резов, что может ухудшать качество металлоконструкций (в особенности ответственного назначения). При сварке некоторых сталей по кромкам, полученным этим способом, в сварных швах образуются поры из-за азота, поглощенного из воздуха расплавленным металлом в процессе резки. Для устранения этого недостатка необходимо ограничивать скорость резки и увеличивать напряжение дуги, очищать кромки заготовок, использовать в качестве плазмообразующей среды кислород и другие газы взамен воздуха, а также применять специальные приемы и технику сварки [11, 12].

Лазерная резка. Лазерная резка основана на тепловом действии лазерного излучения и происходит при непрерывном или периодическом перемещении источника тепла

Таблица 2.40. Содержание вредных веществ в воздухе при воздушно-плазменной резке

Условия резки	Режим резки		Концентрация, мг/м³		
	Режущий ток, А	Напряжение дуги, В	аэрозоля	оксидов азота	озона
Предельно допустимая концентрация	—	—	4	2	0,1
Обычная воздушно-плазменная резка	300	180	3,0—5,5	1,8—3,4	0,15—0,25
Воздушно-плазменная резка над водой	300	180	1,2—2,5	0,5—1,5	0,05—0,07

сформированного в пятно с высокой плотностью мощности с помощью специальной оптической системы [15]. В зависимости от конструктивных особенностей излучателей возможны непрерывный или импульсно-периодический режим лазерной резки. В настоящее время для раскроя материалов большее распространение получили лазеры непрерывного действия.

Для повышения эффективности резки в зону обработки совместно с лазерным лучом подается струя газа, способствующая удалению продуктов из зоны разрушения, а в некоторых случаях и инициирующая химическую реакцию в месте воздействия излучения на металлы (газолазерная резка). В первом случае используют инертные или нейтральные газы (аргон, азот, углекислый газ), во втором — кислород, воздух. Наибольшее распространение получил способ резки материалов лазерным излучением с соосной с лучом лазера подачей струи кислорода в зону резки (рис. 2.55).

Кислород выполняет следующие функции: способствует росту оксидной пленки на поверхности металла и вследствие этого снижению его отражательной способности; тепло, выделяющееся в результате экзотермической реакции горения, совместно с лазерным излучением идет на дальнейшее разрушение металла в зоне обработки; струя уносит продукты разрушения и обеспечивает приток кислорода непосредственно к фронту горения, а также препятствует чрезмерному нагреванию разрезаемых деталей.

При резке сталей толщиной 0,5—5 мм оптимальным является давление кислорода 0,3—0,5 МПа при расходе 1,0—2,5 м³/ч.

Плотность потока излучения лазерного луча, которая определяется как отношение выходной мощности к площади пятна нагрева, является одной из основных характеристик лазерной установки: при плотности потока 10^5 — 10^6 Вт/см² и распределении его по пятну нагрева диаметром 0,25—0,5 мм возможно осуществление процесса резки металла.

Пригодность лазеров для резки металла оценивают по коэффициенту качества излучения

$$K_и = P/Q^2d^2, \qquad (2.4)$$

где P — средняя мощность лазерного излучения, Вт; Q — расходимость лазерного излучения, мрад; d — диаметр пучка, мм. Физический смысл этого коэффициента заключается в способности лазера создавать плотность мощности в сфокусированном пятне не менее $5 \cdot 10^6$ Вт/см². При $K_и = 0{,}1...0{,}4$ качественную резку обеспечить нельзя. Доведение значения этого коэффициента до единицы и более обеспечивает высокие характеристики процесса резки.

Для газолазерной резки используются в основном твердотельные лазеры мощностью до 0,5 кВт, позволяющие резать металлы толщиной до 3 мм, и CO_2-лазеры мощностью до 1—1,5 кВт, позволяющие разрезать металлы толщиной до 6 мм.

Помимо характеристик излучения лазера, от которых зависят стабильность и качество резки, важными характеристиками являются надежность и удобство его обслуживания, а также коэффициент полезного действия, который для CO_2-лазеров составляет 12—15 %.

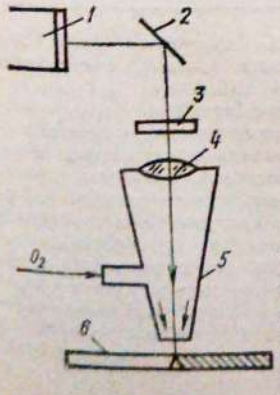
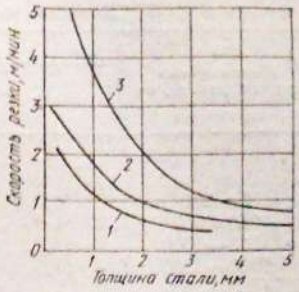


Рис. 2.55. Схема газолазерной резки материалов:
1 — лазер; *2* — поворотное зеркало; *3* — заслонка; *4* — фокусирующая линза; *5* — сопло; *6* — разрезаемая заготовка.

Рис. 2.56. Зависимость скорости резки от толщины разрезаемых листов и мощности излучения:
1 — 300 Вт; *2* — 450 Вт; *3* — 800 Вт.



Скорость лазерной резки прямо пропорциональна мощности излучения и обратно пропорциональна толщине обрабатываемого металла.

На рис. 2.56 приведены экспериментальные данные о зависимости скорости резки от толщины углеродистой стали при различных мощностях лазерного излучения.

К достоинствам лазерной резки относятся чрезвычайно малая ширина реза, исчисляемая долями миллиметра при резке металла толщиной до 10 мм, узкая зона термического влияния (0,1—0,2 мм), возможность последующей сварки заготовок без зачистки кромок.

При лазерной резке нашли применение два способа взаимного перемещения лазерного луча и обрабатываемой детали. Первый способ: лазерный луч неподвижен, разрезаемый лист перемещается по заданному закону в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Второй способ: лазер перемещается над разрезаемым листом по выбранному контуру. Если исходить из эффективности использования энергии лазерного луча, то первый способ предпочтительнее, но требует большей площади для размещения оборудования. Второй способ более универсален, и в этом случае лазерная установка может располагаться как на самой резательной машине, так и отдельно от нее.

Основные преимущества лазерной резки: возможность вырезки сложных контуров, резки твердых и хрупких материалов, минимум деформаций, автоматизации процесса, а также высокая точность резки, незначительная ширина реза.

2.4.3. Точность и эффективность способов резки

Точность резки заготовок определяется рядом факторов: правильным выбором способа и режимов резки, точностью технологического оборудования, оснастки и средств комплексной механизации и автоматизации, организацией рабочего места.

Точность механической резки. Используемые для изготовления сварных конструкций листовые (профильные) детали, вырезанные механической резкой, не должны иметь отклонений, превышающих допустимые значения:

Номинальный размер детали, мм	Допускаемое отклонение, мм
До 1500	±1,0
1500—2500	±1,5
2500—4000	±2,0
4000—9000	±2,5
9000—15 000	±3,0
15 000—21 000	±3,5

Для деталей, вырезанных из листа с помощью ножниц с наклонным ножом и пресс-ножниц, рекомендуются допуски, приведенные в табл. 2.41. При выборе допуска на размер практикуется одностороннее расположение поля допуска: «+» или «—». Не исключается и симметричное расположение допуска: «±», в этом случае берется половина допуска, указанного в табл. 2.41.

Неперпендикулярность реза измеряется по схеме, аналогичной приведенной на рис. 2.57. Детали, к точности

Таблица 2.41. Допуски на размеры листовых деталей, вырезанных ножницами

Номинальный размер детали, мм	Толщина металла, мм							
	До 2	2—5	6—8	9—12	13—16	17—20	21—26	28—32
Резка на ножницах с наклонным ножом								
До 250	0,8	1	1,2	1,5	1,8	2,2	2,5	3
250—650	1	1,3	1,5	1,8	2	2,5	3	3,5
650—1000	1,3	1,5	1,8	2	2,5	3	3,2	3,7
1000—1500	1,5	1,8	2,0	2,2	3	3,2	3,5	4
1500—2500	2	2,2	2,5	2,2	3,2	3,5	4	4,5
2500—4000	2,5	2,8	3	3,5	3,7	4	4,5	5
Резка на пресс-ножницах								
До 250	1	1,2	1,5	1,8	2	—	—	—
250—650	1	1,5	1,8	2	2,2	—	—	—
650—1000	1,5	1,8	2	2,5	2,8	—	—	—
1500—2500	2,2	2,5	2,8	3,2	3,2	—	—	—
2500—4000	2,8	3	3,5	—	—	—	—	—

Таблица 2.42. Припуски на сторону при механической обработке листовых деталей, вырезанных ножницами

Номинальный размер детали, мм	Толщина металла, мм							
	До 2	2—5	6—8	9—12	13—16	17—20	21—26	28—32
До 250	1,8	2	2,2	2,5	3	3,2	4	4,5
250—650	2	2	2,5	3	3,5	3,5	4,5	5
650—1000	2	2,5	3	3,5	4	4	5	5,5
1000—1500	2,5	3	3,5	4	4	4,5	5,5	6
1500—2500	3	3,5	4	4	4,5	5	6	6,5
2500—4000	3,5	4	4	4,5	5	5,5	6,5	7

Таблица 2.43. Допускаемые отклонения размеров вырезанных деталей от номинальных по ГОСТ 14792—80

Класс точности	Способ резки	Толщина листа, мм	Номинальный размер детали или заготовки, мм			
			До 500	500—1500	1500—2500	2500—5000
1	Кислородная и плазменно-дуговая	5—30	±1,0	±1,5	±2,0	±2,5
		31—60	±1,0	±1,5	±2,0	±2,5
	Кислородная	61—100	±1,5	±2,0	±2,5	±3,0
2	Кислородная и плазменно-дуговая	5—30	±2,0	±2,5	±3,0	±3,5
		31—60	±2,5	±3,0	±3,5	±4,0
	Кислородная	61—100	±3,0	±3,5	±4,0	±4,5
3	Кислородная и плазменно-дуговая	5—30	±3,5	±3,5	±4,0	±4,5
		31—60	±4,0	±4,0	±4,5	±5,0
	Кислородная	61—100	±4,5	±4,5	±5,0	±5,5

которых предъявляются более высокие требования, чем может обеспечить резка на ножницах, необходимо подвергать механической обработке — строганию и фрезерованию (кромок). Припуски на механическую обработку приведены в табл. 2.42.

Допускаемые отклонения размеров деталей из фасонного проката при резке на пресс-ножницах:

Номинальный размер детали, мм	Допускаемое отклонение, мм
До 50	±1,0
50—250	±1,5
250—1500	±2,0
1500—3000	±2,5
Свыше 3000	±3,0

Точность термической резки. Термическая резка является основным процессом вырезки деталей, применяемых без последующей механической обработки.

Основными факторами, определяющими форму и размеры при термической резке, являются следующие: состояние исходного (разрезаемого) металла (чистота поверхности, химический состав, наличие расслоений, качество правки, размеры исходного листа); качество изготовления копир-чертежей и подготовки числовых программ, конструктивные особенности и состояние машины для термической резки (прямолинейность направляющих путей, погрешность изготовления зубчатых колес, опорных катков, люфты в передачах, статические и динамические ошибки в системе управления); конструкция раскроечного стола для термической резки, форма и размеры детали (толщина, габаритные раз-

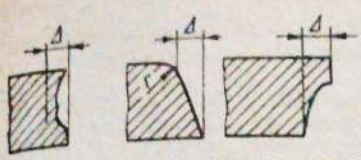


Рис. 2.57. Отклонение поверхности реза от перпендикулярности (Δ).

меры, отношение длины к ширине, наличие или отсутствие вырезов, разделки кромок); технология вырезки деталей, определяющая тепловые деформации (способ и режим резки, последовательность резки, род горючего газа) и качество поверхности реза, которое характеризуется неперпендикулярностью кромки, шероховатостью, размерами и свойствами зоны термического влияния.

Точность и качество механизированной кислородной и плазменно-дуговой резки определяются ГОСТ 14792—80. Классы точности и предельные отклонения размеров вырезанных деталей и заготовок от номинальных значений должны соответствовать данным табл. 2.43. Предельные отклонения размеров вырезанных деталей и заготовок от прямолинейности устанавливаются в половинном размере от норм, указанных в табл. 2.43.

Перпендикулярность кромки реза к поверхности листа при кислородной резке зависит от расстояния между наконечником резака и поверхностью разрезаемого металла, мощности подогревающего пламени, рода горючего газа, давления кислорода и скорости резки. В общем случае ширина реза в нижней части несколько больше, чем в верхней.

При плазменной резке ширина реза у верхних кромок больше, чем у нижних. С увеличением степени сжатия плазмы и уменьшением диаметра сопла плазмотрона уменьшается разница ширины реза по толщине металла и неперпендикулярность кромок. Максимальный допуск на неперпендикулярность кромки (рис. 2.57) устанавливается ГОСТ 14792—80 с зависимости от толщины разрезаемого металла (табл. 2.44).

На поверхности реза обычно образуются штрихи (бороздки), соответствующие форме режущей струи, которая

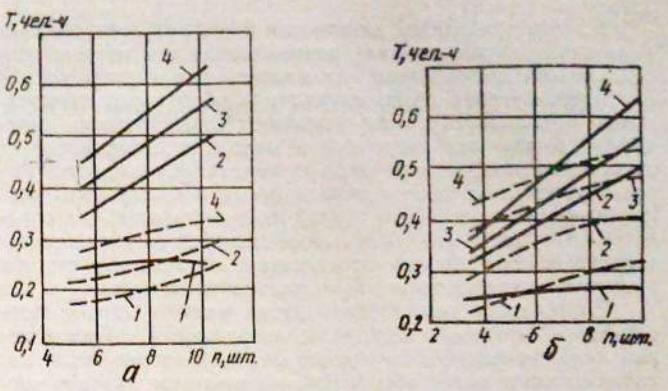
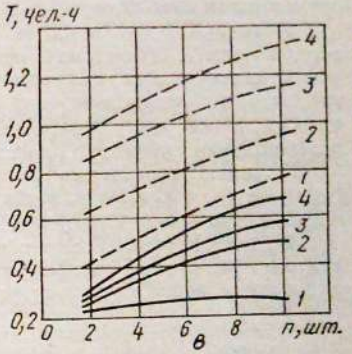


Рис. 2.58. Зависимость трудоемкости резки от числа одновременно вырезаемых деталей из заготовки шириной 1 м и длиной 2,5 м (*1*), 5 м (*2*), 7,5 м (*3*), 9 м (*4*). Сплошная линия — резка ножницами с наклонным ножом, штриховая линия — кислородная резка одним резаком (*а*), тремя резаками (*б*) и пятью (*в*).



отклоняется в сторону, противоположную движению резака.

Шероховатость поверхности реза (высота неровностей) после машинной термической резки металла регламентируется ГОСТ 14792—80 (табл. 2.45).

Для кромок, подлежащих сварке и механической обработке, а также для поверхности фасок допускается шероховатость не ниже третьего класса. Для свободных кромок (не подлежащих сварке) деталей большинства металлоконструкций устанавливается второй класс шероховатости. При ручной кислородной резке допустимая глубина штрихов в 2 раза больше, чем при машинной.

Кромки вырезанных деталей не должны иметь грата. Это достигается применением режимов безгратовой плазменной и кислородной резки или механическим удалением с кромок оставшегося после резки грата.

Качество металла кромок реза имеет большое значение как для кромок, подлежащих последующей сварке, так и для свободных кромок. Однако регламентированных требований к химическому составу и механическим свойствам металла кромок не существует.

В соответствии с ГОСТ 14792—80 устанавливаются требования по размеру зоны термического влияния при плазменно-дуговой резке. Наибольшие значения протяженности зоны термического влияния для углеродистых сталей не должны превышать приведенных в табл. 2.46. Трещины в зоне термического влияния и в зоне оплавленного металла не допускаются.

Таблица 2.44. **Допускаемые отклонения перпендикулярности реза при машинной вырезке деталей по ГОСТ 14792—80**

Класс точности	Способ резки	Толщина металла, мм			
		5—12	13—30	31—60	61—100
1	Кислородная	0,2	0,3	0,4	0,5
	Плазменно-дуговая	0,4	0,5	0,7	—
2	Кислородная	0,5	0,7	1,0	1,5
	Плазменно-дуговая	1,0	1,2	1,6	—
3	Кислородная	1,0	1,5	2,0	2,5
	Плазменно-дуговая	2,3	3,0	4,0	—

Таблица 2.45. **Допускаемые значения шероховатости поверхности реза по ГОСТ 14792—80**

Класс точности	Способ резки	Толщина металла, мм			
		5—12	13—30	31—60	61—100
1	Кислородная	0,050	0,060	0,070	0,085
	Плазменно-дуговая	0,050	0,060	0,070	—
2	Кислородная	0,080	0,160	0,250	0,500
	Плазменно-дуговая	0,100	0,200	0,320	—
3	Кислородная	0,160	0,250	0,500	1,000
	Плазменно-дуговая	0,200	0,320	0,630	—

Таблица 2.46. **Допускаемые значения протяжности зоны термического влияния для углеродистых сталей по ГОСТ 14792—80**

Класс точности	Толщина металла, мм		
	5—12	13—30	31—60
1	0,2	0,4	0,8
2	0,8	1,6	3,2
3	1,6	3,2	6,4

Классы вырезаемой детали или заготовки должны быть указаны в технологической документации и в нормативно-технической документации на машины для кислородной и плазменно-дуговой резки металлов и обозначены четырехзначным числом. Это число указывает класс точности вырезаемой детали или заготовки и классы в зависимости от отклонения поверхности реза от перпендикулярности, шероховатости поверхности реза и протяженности зоны термического влияния. Если какой-либо показатель не определяют, то вместо его обозначения ставят 0. Перед четырехзначным числом должно быть указано обозначение способа резки: К — кислородная, П — плазменно-дуговая.

На точность газолазерной резки влияют погрешности установки заготовок, настройки; погрешности, обусловленные геометрической неточностью механизмов перемещения, деформациями после обработки, вызванными внутренними остаточными напряжениями; погрешности от вибрации и др.

Хотя ГОСТ 14792—80 не распространяется на газолазерную резку, суммарная оценка процесса газолазерной резки непрерывным излучением по установленным в нем требованиям показывает, что точность и качество выполняемых резов при обработке на оптимальных режимах соответствуют первому классу.

С целью повышения точности необходимо назначать такие метод и режим вырезки деталей, чтобы обеспечивалось минимальное тепловложение в вырезаемую деталь.

Во всех случаях, где это возможно, следует применять плазменную резку, которая при более высоких скоростях (в 2—5 раз выше) выполняется с меньшей погонной энергией по сравнению с кислородной. Еще более высокую точность вырезки деталей толщиной до 10 мм обеспечивает газолазерная резка.

Эффективность способов резки. При разработке технологии резки необходимо выбирать наиболее экономичный процесс обработки (например, по трудоемкости). Приведенные на рис. 2.58, *а* данные показывают, что трудоемкость вырезки деталей ножницами с наклонным ножом меньше трудоемкости резки газорезательной машиной «Черномор» при одном резаке [14], при трех резаках (рис. 2.58, *б*) она практически одинаковая, а при пяти (рис. 2.58, *в*), наоборот, наиболее эффективна кислородная резка.

Опыт промышленного применения различных способов термической резки углеродистых сталей толщиной 10 мм показывает, что стоимость 1 м реза при воздушно-плазменной резке в 2,2—3 раза ниже, чем при кислородной резке.

Воздушно-плазменная резка на одноместных машинах по экономическим показателям практически не уступает механической резке.

Замена ацетилено-кислородной резки воздушно-плазменной позволяет снизить капитальные вложения примерно на 33 %, себестоимость резки — на 15—20 %, увеличить съем продукции с 1 м² производственной площади на 70 % и выработку на одного производственного рабочего примерно в 1,5 раза.

Экономически целесообразные области применения лазерной резки определяются стоимостью оборудования, мощностью, технологическими возможностями и загрузкой лазерных установок.

ГЛАВА 3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СВАРКИ

3.1. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ

3.1.1. Основные понятия

Температурное поле — это распределение температур в изделии в конкретный момент времени. Температура является функцией теплофизических констант материала, координат точки тела и времени.

Температурное поле может быть объемным — $T = T(x, y, z, t)$, плоским — $T = T(x, y, t)$ и линейным — $T = T(x, t)$.

Процесс распространения теплоты при сварке разделяют на три стадии: 1) теплонасыщение, когда в температурном поле, перемещающемся вместе с источником нагрева, температура нарастает; 2) предельное квазистационарное состояние, когда подвижное температурное поле практически устанавливается; 3) выравнивание температуры после окончания сварки.

Термический цикл сварки $T = T(t)$ — зависимость температуры от времени в некоторой точке изделия.

Изотермическая поверхность — выделенная на контуре или в объеме тела поверхность, образованная точками, имеющими одинаковую температуру в данный момент времени.

Изотерма — линия на поверхности или в сечении тела, соединяющая точки с одинаковой температурой.

Градиент температуры $\text{grad}\, T = \partial T/\partial n$ — векторная производная от температуры по направлению n, перпендикулярному к изотерме в данной точке.

3.1.2. Схемы нагреваемого тела

Распространение теплоты существенно зависит от формы и размеров свариваемой детали, а также от количества теплоты, вводимой сварочным источником, т. е. от расчетной схемы тела. Обычно при тепловых расчетах в зависимости от степени прогрева детали по толщине (в направлении оси Oz) выбирают одну из следующих основных схем.

Бесконечное тело. Если границы детали не влияют на распространение теплоты, ее при расчете можно заменить бесконечным телом неограниченной протяженности по всем трем осевым направлениям x, y, z.

Полубесконечное тело. Этой схеме соответствует массивная деталь с одной ограничивающей плоскостью $z = 0$. Остальные поверхности детали значительно удалены и не влияют на распространение теплоты. Схема используется при расчете температур в случае наплавки валиков и укладки угловых швов с малым проплавлением на листах толщиной более 30 мм.

Бесконечная пластина — тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями $z = 0$ и $z = \delta$. Температура по толщине листа δ распределена равномерно, и теплота распространяется только в плоскости $x0y$.

Схема соответствует случаю сварки пластин встык или укладки углового шва с полным проплавлением.

Полубесконечная пластина — тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями $z = 0$, $z = \delta$ и плоскостью $y = 0$. Остальные условия такие же, как и у бесконечной пластины.

Схема применяется при расчете температур в конструктивном элементе (стенке, ребре, накладке), привариваемом к пластине угловым швом, а также в случае наплавки валика на торец пластины.

Плоский слой — пластина, у которой температура точек по толщине не одинакова, а толщина тела не настолько велика, чтобы можно было пренебречь влиянием ограничивающей плоскости $z = \delta$ и считать тело полубесконечным.

Бесконечный и полубесконечный стержни — тела, протяженные в одном направлении, с равномерным распределением температуры в пределах поперечного сечения.

Схема используется в случае расчета температур при контактной стыковой сварке арматуры, стержней и т. п.

Кроме приведенных при расчетах иногда используются и другие простейшие схемы.

3.1.3. Типы и тепловая эффективность источников нагрева

Сварочные источники теплоты различаются по времени их действия, скорости движения относительно свариваемой детали и распределенности в пятне нагрева (в зависимости от размера и формы зоны ввода, а также от интенсивности ввода теплоты в деталь).

По времени действия различают источники мгновенные, выделяющие теплоту за очень малый промежуток времени, и непрерывно действующие. Последние по расчетной схеме могут быть неподвижными, подвижными и быстро движущимися. Как правило, при ручной сварке и наплавке целесообразно использовать схему подвижного источника, а при автоматической — быстродвижущегося.

В зависимости от размера зоны, в которой выделяется теплота, различают источники сосредоточенные и распределенные.

Сосредоточенные источники могут быть точечными (теплота выделяется в очень малом объеме), линейными (теплота выделяется по линии) и плоскими (тепло выделяется в плоскости).

При сварке углового шва на массивной детали или при наплавке на нее для тепловых расчетов применяется схема точечного источника на поверхности полубесконечного тела или плоского слоя. Если пластина сваривается стыковым или угловым швом с полным или почти полным проплавлением, применяют схему линейного источника в пластине (теплота вводится равномерно по всей толщине вдоль

Таблица 3.1. Значения эффективного КПД

Способ сварки	η
Ручная, электродами:	
плавящимися	0,7—0,85
угольными	0,5—0,7
Под флюсом	0,8—0,95
В защитном газе:	
углекислом	0,7—0,8
аргоне, электродом:	
вольфрамовым	0,65—0,75
плавящимся	0,7—0,8
Порошковой проволокой	0,8—0,9
Газовым пламенем	0,3—0,8
Электрошлаковая:	
обычная при толщине листов, мм:	
50	0,55
100	0,8
200	0,9
с порошкообразным присадочным металлом при толщине листов, мм:	
50	0,75—0,8
100	0,9

Таблица 3.2. Значения Q_v для различных способов сварки

Способ сварки	Сварочный материал	Q_v, Дж/мм³
Ручная электродуговая	Электроды с покрытием	65
Полуавтоматическая в CO_2	Проволока Св-08ГС	38
Автоматическая и полуавтоматическая под флюсом	Проволока Св-08А, флюс ОСЦ-45	65
	Проволока Св-10ГСМТ, флюс АН-42	71

условной линии). Для стыковой сварки стержней используют схему плоского источника (теплота выделяется в плоскости стыка).

Распределенные источники выделяют теплоту по некоторой поверхности (в пятне нагрева) или в некотором объеме детали, причем интенсивность ввода теплоты (удельный тепловой поток) в разных точках пятна нагрева не одинакова. В зависимости от закона распределения удельного теплового потока по пятну нагрева распределенные источники могут быть различными. Для лазерной, дуговой, плазменной или газовой сварки этот закон близок к закону нормального распределения, и источники теплоты называются нормальными. Если пятно нагрева имеет форму круга, то источник нормально-круговой (лазерная, дуговая, плазменная и газовая сварка); если же пятно нагрева имеет форму полосы,— источник нормально-полосовой (нагрев листа газовыми гребенками).

Эффективная тепловая мощность сварочного источника теплоты, т. е. количество теплоты, вводимой при сварке источником в деталь в единицу времени, если известны параметры режима сварки, определяется по формуле

$$q = \eta I U, \tag{3.1}$$

где η — эффективный КПД процесса нагрева (табл. 3.1).

Погонная энергия сварки, т. е. количество теплоты, вводимой на единицу длины шва, находится из выражения

$$q_п = q/v, \tag{3.2}$$

где v — скорость сварки. Если режим сварки неизвестен, но задано поперечное сечение наплавляемого за один проход металла шва (стыкового или углового), погонную энергию можно получить из уравнения

$$q_п = Q_v F_ш, \tag{3.3}$$

где $F_ш$ — площадь поперечного сечения наплавленного металла шва, мм²; Q_v — коэффициент, определяемый по табл. 3.2.

При сварке угловых соединений (тавровых, нахлесточных) часть погонной энергии, вводимой в свариваемый элемент, определяется в зависимости от соотношения толщин. Так, в случае приварки угловым швом к пластине толщиной δ конструктивного элемента толщиной $\delta_к$ погонная энергия, вводимая в пластину $q_{п.пл}$ и в конструктивный элемент (ребро, стенку, накладку) $q_{п.к}$, может быть вычислена по формулам

$$q_{п.пл} = q_п \frac{2\delta}{2\delta + \delta_к}; \tag{3.4}$$

$$q_{п.к} = q_п \frac{\delta_к}{2\delta + \delta_к}. \tag{3.5}$$

Эффективная тепловая мощность в этих случаях определяется по аналогичным формулам

$$q_{пл} = q \frac{2\delta}{2\delta + \delta_к}; \tag{3.6}$$

$$q_к = q \frac{\delta_к}{2\delta + \delta_к}. \tag{3.7}$$

Формулы (3.4) — (3.7) дают наиболее точные результаты при $\delta/\delta_к \leqslant 1{,}7$. Они справедливы для низкоуглеродистых, низколегированных и аустенитных сталей, а также для титановых и алюминиевых сплавов толщиной примерно до 16 мм.

3.1.4. Тепловые процессы при дуговой сварке

Расчет температурного поля при однопроходной сварке и наплавке

При ручной сварке пластины с полным (или близким к полному) проплавлением применяется расчетная схема подвижного линейного источника теплоты в пластине. Температура в точке на расстоянии r от источника

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} K_0\left(\frac{vr}{2a}\sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}}\right), \tag{3.8}$$

где эффективная тепловая мощность определяется по формуле (3.1) для стыкового шва и по формуле (3.6) для углового шва; λ — коэффициент теплопроводности; a — коэффициент температуропроводности; b — коэффициент поверхностной температуроотдачи; $K_0(u)$ — функция Бесселя нулевого порядка, берется по таблице в зависимости от значения аргумента $u = \frac{vr}{2a}\sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}}$; x — расстояние вдоль оси Ox от источника до точки, берется со знаком плюс, если точка находится впереди источника, и со знаком минус, если точка — позади источника, $x = \pm vt$ (t — время, в течение которого источник проходит расстояние x).

Коэффициент поверхностной температуроотдачи для пластины

$$b = 2\alpha/c\rho\delta, \tag{3.9}$$

где $c\rho$ — удельная объемная теплоемкость; α — коэффициент теплоотдачи.

При ручной наплавке или сварке углового шва на массивной детали применяется расчетная схема подвижного

точечного источника теплоты на поверхности полубесконечного тела или плоского слоя. Для полубесконечного тела

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v}{2a}(R+x)}, \qquad (3.10)$$

где q — часть эффективной мощности, вводимая в деталь; R — расстояние от источника до точки, в которой определяется температура ($R^2 = x^2 + y^2 + z^2$).

Для плоского слоя температуру определяют по формуле

$$T = m \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} K_0\left(\frac{vr}{2a}\right), \qquad (3.11)$$

где m — коэффициент, учитывающий отражение теплового потока от поверхностей слоя, определяется по номограмме (рис. 3.1). Номограмма приведена для расчета температуры в точках поверхностей $z = 0$ и $z = \delta$.

Температуру точек бесконечного стержня сечением F от подвижного плоского источника теплоты мощностью q, перемещающегося вдоль стержня со скоростью v, находят по формуле

$$T = \frac{q}{c\rho v F \sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}}} \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{vx}{2a} - \frac{v|x|}{2a}\sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}}\right), \qquad (3.12)$$

где x — расстояние от движущегося источника до точки, в которой определяется температура. Начало координат перемещается вместе с источником теплоты.

Коэффициент поверхностной температуроотдачи с боковой поверхности стержня

$$b = \alpha p / c\rho F, \qquad (3.13)$$

где p — периметр сечения стержня.

По формулам (3.8), (3.10) — (3.12) определяется температура $T_{пр}$ точек установившегося поля предельного состояния.

Температуру T (t) точки подвижного поля в стадии теплонасыщения рассчитывают по формуле

$$T(t) = \psi(t)\, T_{пр}, \qquad (3.14)$$

где ψ (t) — коэффициент теплонасыщения, определяемый по номограммам на рис. 3.2 в зависимости от расчетной схемы и безразмерных критериев ρ и τ.

Для точечного источника на поверхности полубесконечного тела

$$\rho_3 = \frac{vR}{2a}, \quad \tau_3 = \frac{v^2 t}{4a};$$

для линейного источника в бесконечной пластине

$$\rho_2 = \frac{vr}{2a}\sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}}, \quad \tau_2 = \frac{v^2 t}{4a}\left(1 + \frac{4ba}{v^2}\right);$$

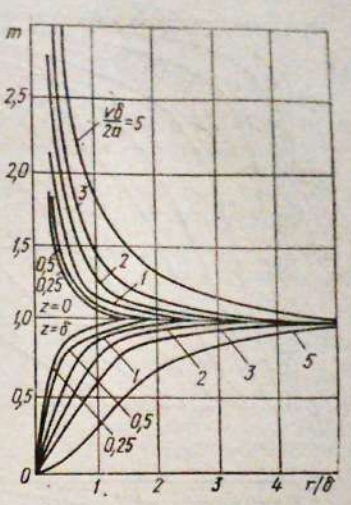
для плоского источника в бесконечном стержне

$$\rho_1 = \frac{v|x|}{2a}\sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}}; \quad \tau_1 = \frac{v^2 t}{4a}\left(1 + \frac{4ba}{v^2}\right).$$

Выравнивание температуры после прекращения в момент времени t_0 действия источника нагрева описывают наложением двух процессов: теплонасыщения $T_{ист}$ (t) от условно продолжающего действовать источника и теплонасыщения $T_{ст}$ ($t - t_0$) от равного ему по мощности фиктивного стока теплоты q, начавшего действовать в момент t_0. Для времени $t > t_0$ в стадии выравнивания

$$T(t) = T_{ист}(t) - T_{ст}(t - t_0). \qquad (3.15)$$

Рис. 3.1. Номограмма для определения коэффициента m [2].



Для автоматической сварки пластины с полным (или близким к полному) проплавлением используется расчетная схема мощного быстродвижущегося линейного источника теплоты в пластине. Температура в точке на расстоянии y от оси шва определяется по формуле

$$T = \frac{q}{v\delta\,(4\pi\lambda c\rho t)^{1/2}} e^{-\frac{y^2}{4at} - bt}, \qquad (3.16)$$

где t — время, отсчитываемое от момента, когда источник теплоты пересек перпендикулярную к оси $0x$ плоскость; в которой расположена рассматриваемая точка.

Для автоматической наплавки или сварки углового шва на массивной детали применяется расчетная схема мощного быстродвижущегося точечного источника на поверхности полубесконечного тела или плоского слоя. В случае полубесконечного тела

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda v t} e^{-\frac{y^2+z^2}{4at}}. \qquad (3.17)$$

В случае плоского слоя

$$T = \frac{q}{v\delta c\rho} F(z, t) \frac{1}{\sqrt{4at}} e^{-\frac{y^2}{4at} - bt}, \qquad (3.18)$$

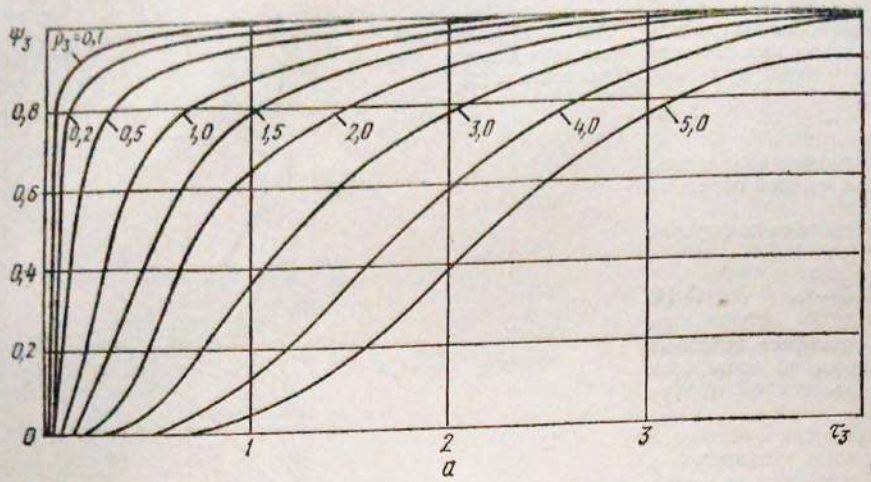
где F (z, t) — функция, учитывающая отражение теплоты от поверхностей слоя, численное значение которой определяется по номограмме на рис. 3.3 в зависимости от отношения z/δ и безразмерного времени $\tau = at/\delta^2$. При $\tau > 0{,}5$ значение F (z, t) принимают равным 1.

В формулах (3.16) — (3.18) t — время, отсчитываемое от момента, когда источник теплоты пересек плоскость, в которой расположена рассматриваемая точка.

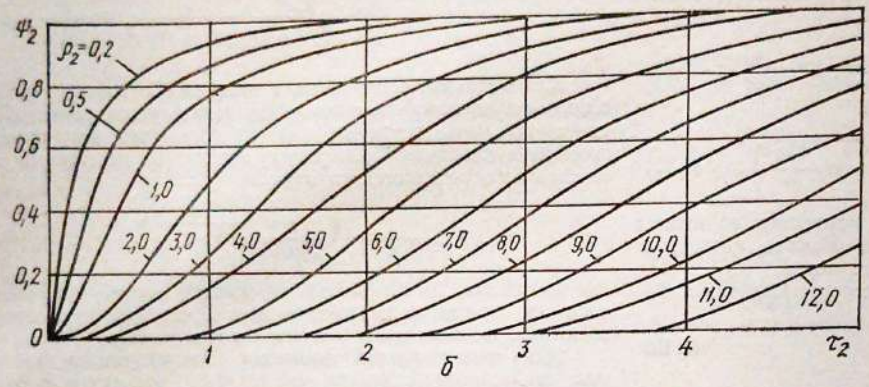
Расчет параметров термического цикла сварки

Однопроходная сварка. Термический цикл сварки характеризуется следующими параметрами: максимальной температурой $T_м$, скоростью нагрева и охлаждения, длительностью пребывания металла $t_н$ при температуре выше заданной (рис. 3.4).

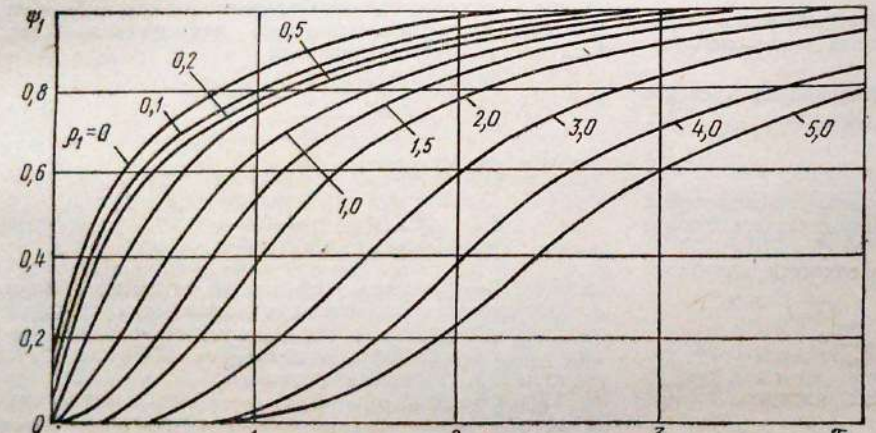
Структурное состояние металла в различных зонах сварного соединения определяется такими параметрами термического цикла, как $T_м$, $t_н$ (влияют на размер зерна), а также скоростью охлаждения w_0 в диапазоне температур минимальной устойчивости аустенита мартенситных сталей (влияет на степень закалки).



а



б



в

Рис. 3.2. Номограммы для определения коэффициента теплонасыщения ψ_3 (*а*), ψ_2 (*б*) и ψ_1 (*в*) [2].

Если известна зависимость температуры от времени $T = T(t)$ или от расстояния $T = T(x)$, закономерность изменения максимальной температуры может быть определена из условия $\partial T/\partial t = 0$ или $\partial T/\partial x = 0$.

Для точечного источника теплоты на поверхности массивного тела (см. (3.17)) получаем

$$T_м - T_н = \frac{2q}{\varkappa e v c \rho r_0^2}; \quad r_0^2 = y_0^2 + z_0^2. \qquad (3.19)$$

Для линейного источника в пластине (см. (3.16))

$$T_м - T_н = \frac{q}{\sqrt{2\pi e}\, v c \rho \delta y_0^2}\left(1 - \frac{b y_0^2}{2a}\right). \qquad (3.20)$$

В формулах (3.19) и (3.20) $T_н$ — начальная температура изделия или температура предварительного подогрева (см. рис. 3.4).

Мгновенная скорость охлаждения w_0 при данной температуре является производной температуры по времени: $w_0 = \partial T/\partial t$. Скорость охлаждения зависит от формы изделия и уменьшается при увеличении эффективной погонной энергии q/v и температуры $T_н$, а также при уменьшении толщины листа δ.

При дуговой наплавке валика на массивное тело (см. (3.17))

$$w_0 = -\frac{2\pi\lambda (T - T_н)^2}{q/v}. \qquad (3.21)$$

При сварке листов встык или при наплавке валика на лист

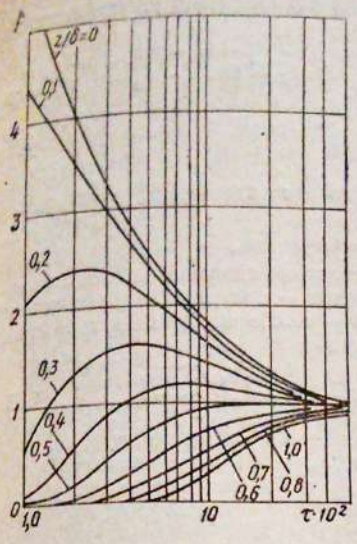


Рис. 3.3. Номограмма для определения $F(z, l)$ [3].

малой толщины (см. (3.16))

$$w_0 = -\frac{2\pi\lambda c\rho\,(T - T_н)^3}{(q/v\delta)^2}. \qquad (3.22)$$

В случае точечного источника на поверхности плоского слоя

$$w_0 = -\omega\frac{2\pi\lambda\,(T - T_н)}{q/v\delta}, \qquad (3.23)$$

где коэффициент ω определяется по номограмме на рис. 3.5 в зависимости от критерия

$$\frac{1}{\theta} = \frac{2q/v}{\pi\delta^2 c\rho\,(T - T_н)}. \qquad (3.24)$$

Длительность пребывания металла $t_в$ при температуре выше некоторой температуры T рассчитывается по следующим формулам: в случае трехмерного температурного поля при наплавке на массивное тело

$$t_{3н} = \frac{\tau_{3н}}{4\pi e}\,\frac{2q}{v\lambda\,(T_м - T_н)}; \qquad (3.25)$$

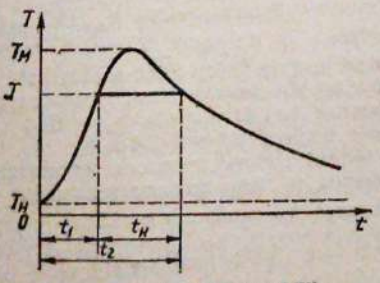


Рис. 3.4. Термический цикл сварки.

Рис. 3.5. Номограмма для определения критерия ω [2].

в случае двухмерного температурного поля при однопроходной сварке листов

$$t_{2н} = \frac{\tau_{2н}}{64\pi e}\,\frac{8}{\lambda c\rho}\left[\frac{q}{v\delta\,(T_м - T_н)}\right]^2. \qquad (3.26)$$

Коэффициенты $\tau_{3н}/4\pi e$ и $\tau_{2н}/64\pi e$ определяются по номограмме на рис. 3.6 в зависимости от безразмерного критерия $(T - T_н)/(T_м - T_н)$.

Многослойная сварка. Термический цикл при многослойной сварке зависит от длины очередного слоя (участка).

При сварке длинными участками (0,5—1 м) наибольшую скорость охлаждения имеет металл первого слоя. Последующие слои укладываются, как правило, на металл, подогретый предыдущими слоями.

Для расчета скорости охлаждения первого слоя при сварке соединений различного типа (рис. 3.7) применяется схема наплавки валика на плоский слой (см. рис. 3.7, *а*). Скорость охлаждения определяется по формуле (3.23). При этом в качестве q/v и δ в формулы (3.23) и (3.24) подставляются расчетные величины, вычисляемые по формулам $(q/v)_{расч} = k_q\,(q/v)$, $\delta_{расч} = k_\delta\delta$. Значения коэффициентов k_q и k_δ см. на рис. 3.7.

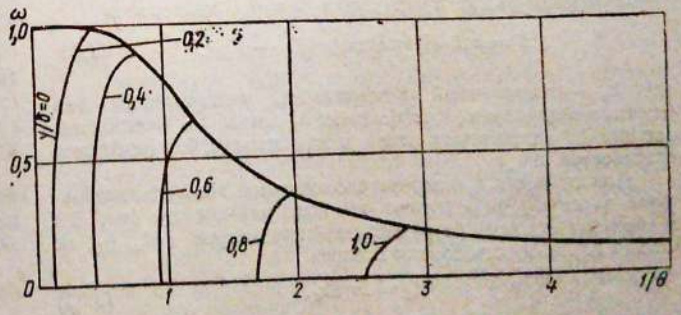
Скорость охлаждения первого слоя уменьшается с ростом погонной энергии и особенно эффективно — с увеличением температуры подогрева.

При многослойной сварке короткими участками (40—400 мм) термический цикл должен обеспечить оптимальную длительность пребывания металла при температуре выше заданной, а также умеренную скорость охлаждения ниже этой температуры.

Параметры режима сварки короткими участками: погонная энергия сварки слоя q/v, зависящая (см. (3.3)) от сечения наплавляемого за один проход металла; длина участка l; температура $T_н$.

Режим сварки короткими участками выбирается из условия, чтобы температура шва и околошовной зоны к моменту укладки второго слоя $T_в$ находилась в нижнем субкритическом диапазоне (от температуры наименьшей устойчивости аустенита до температуры $T_{м.н}$ начала мартенситного превращения). При этом длительность пребывания околошовной зоны $t_в$ при температуре выше $T_в$ должна обеспечить оптимальные условия распада аустенита в пластичный игольчатый троостит.

Температуру $T_в$ часто принимают на 50 К выше $T_{м.н}$ (470—620 К для перлитных сталей).



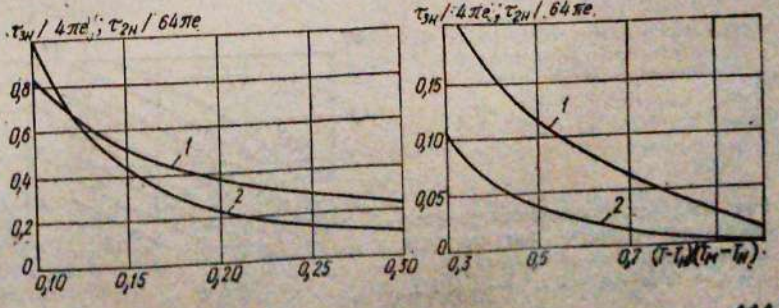


Рис. 3.6. Номограммы для определения длительности нагрева [3]:
1 — $\tau_{3н}/4\pi e$; *2* — $\tau_{2н}/64\pi e$.

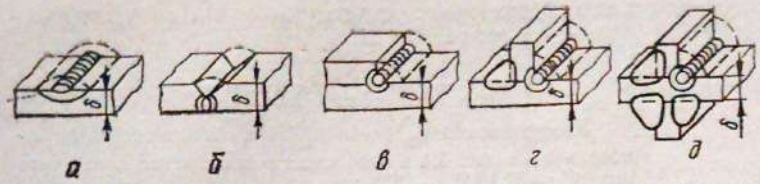


Рис. 3.7. Схемы наплавки для расчета скорости охлаждения:
$а - k_q = k_\delta = 1$; $б - k_q = k_\delta = 3/2$; $в - k_q = 1$, $k_\delta = 2/3$; $г - k_q = 1$, $k_\delta = 2/3$; $д - k_q = 1$, $k_\delta = 1/2$

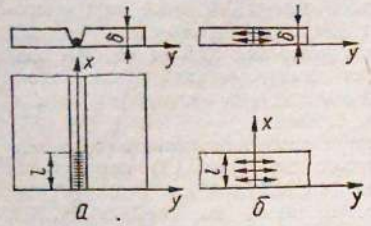


Рис. 3.8. Схема сварного соединения (*а*) и расчетная схема (*б*) при сварке короткими участками.

Для расчета температуры $T_в$, до которой охлаждается первый слой (рис. 3.8, *а*), принимается расчетная схема мгновенного выделения теплоты на завариваемом участке l (рис. 3.8, *б*). Стрелками показаны направления тепловых потоков.

По схеме линейного быстродвижущегося источника теплоты в пластине (3.16) температура точек, расположенных на оси шва,

$$T - T_н = \frac{q}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\rho t}}. \qquad (3.27)$$

Длительность охлаждения первого слоя до температуры $T_в$

$$t_в = \frac{q^2}{4\pi\lambda c\rho\delta^2 v^2 (T_в - T_н)^2}. \qquad (3.28)$$

К моменту времени $t_в$ должен быть уложен следующий слой. С учетом времени чистого горения дуги $t_г = l/v$ и времени перерывов $t_п$ между укладками отдельных слоев время сварки одного слоя $t_с = t_г + t_п$. Длина завариваемого участка, обеспечивающая к началу сварки второго слоя температуру первого слоя выше $T_в$,

$$l = t_г v = k_г t_с v, \qquad (3.29)$$

где $k_г$ — коэффициент чистого горения дуги, $k_г = t_г/t_с$; для автоматической многодуговой сварки $k_г = 1$, для ручной многослойной сварки $k_г = 0{,}6...0{,}8$.

Учитывая (3.28) и принимая $t_с = t_в$, записываем

$$l = k_э^2 k_г q^2/4\pi\lambda c\rho\delta^2 v\,(T_в - T_н)^2, \qquad (3.30)$$

где $k_э$ — поправочный коэффициент, учитывающий тип сварного соединения. Коэффициент $k_э$ равен: 1,5 (соединение встык); 0,9 (соединения втавр и внахлестку); 0,8 (крестовое соединение).

Длительность $t_в$ нагрева околошовной зоны до температуры выше $T_в$ определяют по номограммам на рис. 3.9 в зависимости от безразмерных параметров $bt_с$, ρ_1, θ. Общая длительность сварки n слоев

$$t_с = ln/vk_г. \qquad (3.31)$$

Безразмерное расстояние до рассматриваемой точки околошовной зоны

$$\rho_1 = |y|\sqrt{b/a}, \qquad (3.32)$$

где $|y|$ — расчетное расстояние околошовной зоны от источника (для стыковых швов — полуширина разделки по верху, для угловых швов — половина длины катета шва).

Безразмерный параметр

$$\theta = \frac{2\lambda\delta l}{k_г k_q p}(T_в - T_н)\sqrt{\frac{b}{a}}, \qquad (3.33)$$

где k_q — коэффициент приведения мощности дуги, $k_q = 1$ для стыкового соединения, $k_q = 0{,}67$ для таврового и нахлесточного соединений и $k_q = 0{,}6$ для крестового.

Коэффициент поверхностной температуроотдачи расчетного стержня сечением $F = \delta l$

$$b = 2\alpha/c\rho\delta_{пр},$$

где $\delta_{пр} = \frac{F}{p/2}$ ($p/2$ — половина периметра).

Продолжительность пребывания околошовной зоны последнего слоя при температуре выше $T_в$ определяют по формуле

$$t_{в.п} \approx t_в - (t_с - l/vk_г). \qquad (3.34)$$

Длительность нагрева до температуры выше заданной тем больше, чем больше поперечное сечение шва.

Расчет проплавления основного металла

Производительность процессов проплавления и наплавки. Геометрические размеры сварочной ванны и валика шва характеризуются следующими параметрами (рис. 3.10): L — длина ванны, B — ширина ванны, H — глубина проплавления, A — усиление шва, $F_{пр}$ — площадь проплавления, $F_н$ — площадь наплавки. Форму зоны проплавления оценивают относительной глубиной проплавления H/B или коэффициентом формы провара $\psi_{пр} = B/H$, а также коэффициентом полноты проплавления $\mu_{пр} = F_{пр}/BH$. Значение $\mu_{пр}$ изменяется в пределах 0,6—0,8. Максимальные H/B при дуговой сварке достигают значений порядка 3 (сварка под флюсом). Очертания зоны наплавки характеризуют коэффициентом формы валика $\psi_в = B/A$ и коэффициентом полноты валика $\mu_в = F_н/AB$.

Тепловую эффективность процесса проплавления оценивают термическим η_t или полным тепловым $\eta_{пр}$ КПД процесса проплавления основного металла

$$\eta_t = vF_{пр}\rho s_{пл}/q; \qquad (3.35)$$

$$\eta_{пр} = vF_{пр}\rho s_{пл}/UI, \qquad (3.36)$$

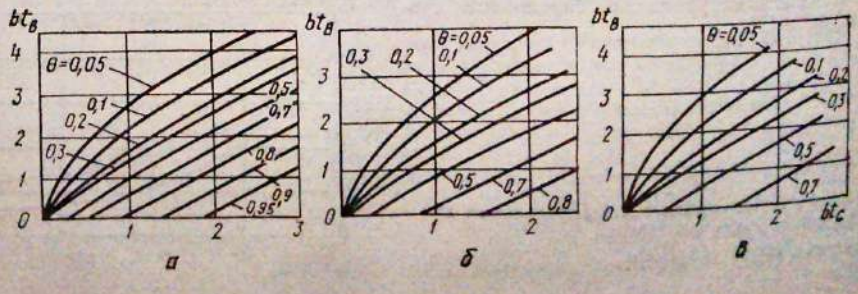


Рис. 3.9. Номограммы для определения длительности нагрева при сварке короткими участками:
$а - \rho_1 = 0$; $б - \rho_1 = 0{,}1$; $в - \rho_1 = 0{,}2$.

где $s_{пл}$ — теплосодержание единицы массы расплавленного металла, включающее скрытую теплоту плавления.

При расплавлении металла массивного тела точечным источником теплоты термический КПД η_t выше у мощных дуг, перемещающихся с большой скоростью, и может достигать максимального значения 0,368. В случае мощного быстродвижущегося линейного источника теплоты в пластине максимальное значение η_t достигает 0,484.

При сварке швов, образуемых преимущественно наплавленным металлом, тепловую эффективность процесса характеризуют полным тепловым КПД процесса наплавки

$$\eta_{нап} = vF_н\rho s_{пл}/UI. \qquad (3.37)$$

Используя формулы (3.35) — (3.37) и задаваясь значениями η_t, $\eta_{пр}$, $\eta_{нап}$, можно рассчитывать величины $F_{пр}$ и $F_н$.

Производительность процесса сварки g_c оценивают суммой массы проплавленного в единицу времени основного металла $g_{пр}$ и наплавленного присадочного металла $g_{нап}$:

$$g_{пр} = \rho v F_{пр}, \quad g_{нап} = \rho v F_н. \qquad (3.38)$$

Производительность наплавки зависит от производительности расплавления электродной проволоки $g_р$:

$$g_{нап} = g_р (1 - k_п), \qquad (3.39)$$

где $k_п$ — коэффициент потери металла электрода и ванны, при сварке открытой дугой $k_п = 0{,}05...0{,}2$, при сварке под флюсом $k_п = 0{,}01...0{,}02$).

Удельная производительность наплавки (г/(А · с)) характеризуется коэффициентом наплавки

$$\alpha_н = g_{нап}/I. \qquad (3.40)$$

Размеры сварочной ванны. Теоретически очертания ванны расплавленного металла соответствуют очертаниям изотермической поверхности $T = T_{пл}$. Однако известные расчетные схемы не учитывают распределенности источника нагрева, скрытой теплоты плавления, зависимости значений теплофизических констант от температуры и др. Вследствие этого расчет позволяет оценить размеры ванны приближенно.

Длина ванны при наплавке валика на массивное тело

$$L = q/2\pi\lambda T_{пл}. \qquad (3.41)$$

Экспериментально получены поправочные коэффициенты для более точного определения размеров ванны.

Для однопроходной сварки длина и ширина сварочной ванны определяются соотношениями

$$L = 0{,}0503\frac{1}{m}\frac{q^2}{\lambda c\rho v\delta T_{пл}^2}; \qquad (3.42)$$

$$B = 0{,}242\frac{2}{n}\frac{q}{vc\rho\delta T_{пл}}. \qquad (3.43)$$

В случае электродуговой сварки стали Ст3 коэффициенты $m = 0{,}0007q/v$, $n = 0{,}00049q/v$ —0,2. Зависимости (3.42), (3.43) можно использовать для расчетов при электрошлаковой сварке. В этом случае $m = 1{,}2$, $n = 0{,}95$.

Глубина проплавления при электрошлаковой сварке

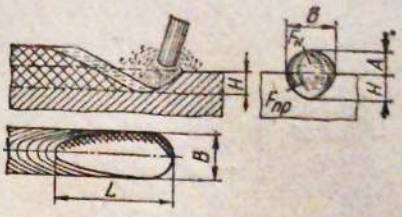
$$H_{пр} = 0{,}242\frac{1}{n}\frac{q}{vc\rho\delta T_{пл}} - \frac{f}{2}, \qquad (3.44)$$

где f — сварочный зазор.

Расчет нагрева и плавления присадочной проволоки

Нагрев электродов. Известны две основные расчетные схемы нагрева присадочной проволоки: 1) нагрев электрода конечной длины с постоянным местом токоподвода относительно электрода (рис. 3.11, *а*); 2) нагрев электрода бесконечной длины с перемещением электрода относительно места токоподвода (рис. 3.11, *б*).

Рис. 3.10. Форма сварочной ванны.



По схеме 1 проводятся ручная дуговая сварка плавящимся электродом, электрошлаковая сварка пластинами и плавящимся мундштуком (нагрев мундштука), сварка неплавящимся электродом. По схеме 2 осуществляется автоматическая и полуавтоматическая сварка плавящимся электродом, электрошлаковая сварка проволоками и плавящимся мундштуком (нагрев проволок).

В общем случае электрод, имеющий начальную температуру $T_н$, нагревается по всей длине током до температуры $T_т$ и на конце — источником теплоты. Температура конца плавящегося электрода равна температуре капель $T_к$.

При исключении нагрева током по схеме 1 рассчитывается нагрев присадки при газовой сварке, по схеме 2 — при сварке плавящимся электродом с подачей присадочной проволоки в зону дуги.

Температура нагрева током электрода из низкоуглеродистой стальной проволоки определяется по номограмме на рис. 3.12.

При ручной сварке (схема 1) время нагрева электрода t для расчета $\Delta T_т$ целесообразно принимать равным времени его расплавления. При автоматической или полуавтоматической сварке (схема 2) максимальную температуру нагрева током $\Delta T_{т_м}$ в конце вылета l рассчитывают для момента времени $t = l/v_п$ ($v_п$ — скорость подачи электродной проволоки).

Параметр n (см. рис. 3.12) определяется по формуле

$$n = \beta w_0 + b_0[1 + \beta(T_н - 273)]. \qquad (3.45)$$

Числовые значения параметров β, w_o, b_0, зависящих от теплофизических свойств электродов, выбирают по табл. 3.3.

Электрод нагревается током равномерно по всей длине при ручной сварке (см. рис. 3.11, *а*), при автоматической сварке температура нагрева током линейно изменяется по длине вылета (см. рис. 3.11, *б*):

$$\Delta T_т = \Delta T_{т_м}\left(\frac{l - x}{l}\right). \qquad (3.46)$$

Здесь x — расстояние от торца электрода.

Температура электрода от подогрева дугой определяется по формулам: для схемы 1

$$T_д = (T_к - T_н - \Delta T_т)\, e^{-\frac{wx}{a}}; \qquad (3.47)$$

для схемы 2

$$T_д = (T_к - T_н - \Delta T_{т_м})\, e^{-\frac{wx}{a}}. \qquad (3.48)$$

В формулах (3.47), (3.48) w — скорость плавления электрода (в случае схемы 2 $w = v_п$).

Таблица 3.3. **Значения параметров для расчета нагрева электродной низкоуглеродистой проволоки током [3]**

Род тока	$\beta \cdot 10^3$, К$^{-1}$	$w_0 \cdot 10^3$, К · с$^{-1}$	$(b_0 \cdot d_1) \cdot 10^3$, мм · К$^{-1}$
Постоянный	5,0	$2{,}4j^2$	0,96
Переменный	4,17	$2{,}7j^2$	1,08

Примечание. d_1 — диаметр электродной проволоки, мм; j — плотность тока, А/мм^2.

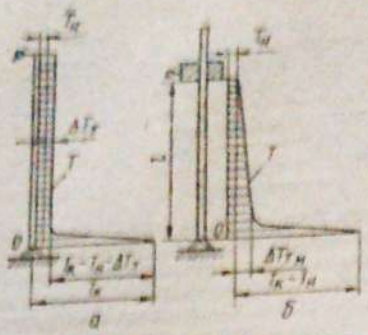


Рис. 3.11. Схемы нагрева электродной проволоки при ручной (*а*) и автоматической (*б*) сварке.

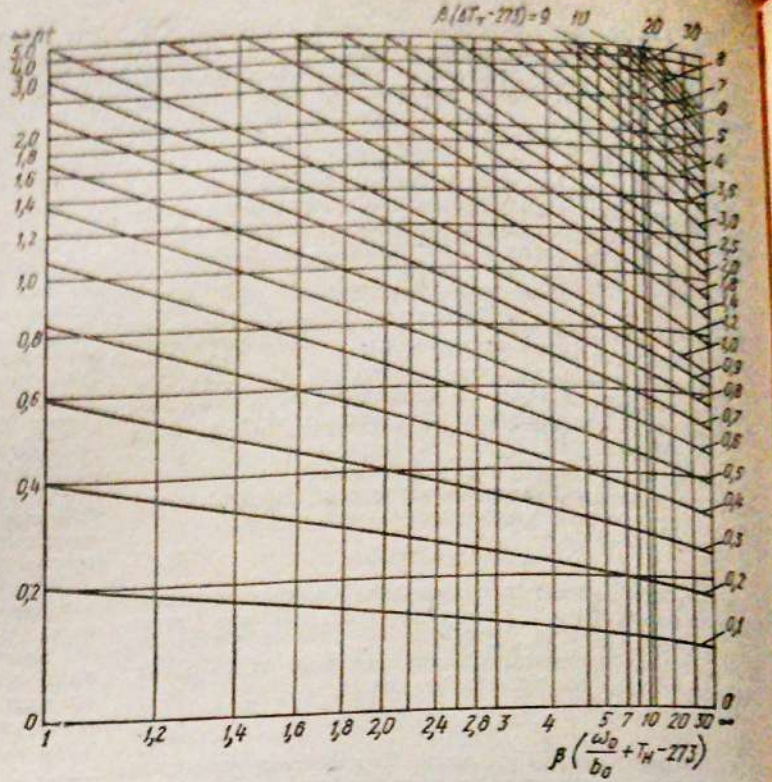


Рис. 3.12. Номограмма для расчета параметров при нагреве электродной проволоки током [3].

Расплавление электродов. Металл в зоне торца электрода (см. рис. 3.11), имеющий температуру $T_н + \Delta T_т$, нагревается дугой до температуры капель $T_к$. Его теплосодержание возрастает при этом от $s_т$ до $s_к$.

Мгновенная производительность расплавления электрода $g_р$ (г/с) зависит от температуры подогрева $T_н + \Delta T_т$ и полной электрической мощности дуги:

$$g_р = \frac{\eta_э UI}{s_к - s_т}, \qquad (3.49)$$

$\eta_э$ — эффективный КПД процесса нагрева электрода дугой.

Если нагрев электрода током не очень значителен, производительность расплавления примерно пропорциональна току.

Процесс расплавления электродной проволоки характеризуется коэффициентом расплавления (г/(А · с))

$$\alpha_р = g_р/I, \qquad (3.50)$$

который зависит от способа сварки и изменяется в пределах 5—14 г/(А · ч) (ручная сварка); 13—23 г/(А · ч) (автоматическая под флюсом); 15—25 г/(А · ч) (в углекислом газе).

При автоматической и полуавтоматической сварке с увеличением вылета электрода производительность его расплавления возрастает.

3.1.5. Учет распределенности источников теплоты

Большинство сварочных источников теплоты являются нормально распределенными. Тепловой поток в пятне нагрева (рис. 3.13) распределен по нормальному закону

$$q_2 = q_{2m} e^{-kr^2}, \qquad (3.51)$$

где k — коэффициент сосредоточенности теплового потока источника, зависящий от способа и режима сварки.

При расчетах радиус пятна нагрева принимают равным расстоянию, на котором удельный тепловой поток q_2 ($r_н$) равен $0{,}05q_{2m}$, т. е. $r_н = d_н/2$ (см. рис. 3.13).

Условный расчетный диаметр пятна нагрева

$$d_н = 3{,}46/\sqrt{k}. \qquad (3.52)$$

Процесс распространения теплоты в пластине от мгновенного нормально-кругового источника выражается зависимостью

$$dT = \frac{q\,dt}{c\rho\delta 4\pi a\,(t + t_0)} e^{-\frac{r^2}{4a(t+t_0)}}, \qquad (3.53)$$

где dt — время действия мгновенного нормально-кругового источника эффективной мощностью q; $t_0 = 1/4ak$ — условное время действия фиктивного сосредоточенного источника, формирующего в соответствии с расчетной схемой температурное поле распределенного источника к моменту его введения.

В случае введения мгновенного нормально-кругового источника на поверхности полубесконечного тела

$$dT = \frac{2q\,dt}{c\rho} \frac{1}{4\pi a\,(t + t_0)} e^{-\frac{r^2}{4a(t+t_0)}} \times$$

$$\times \frac{1}{(4\pi at)^{1/2}} e^{-\frac{z^2}{4at}}. \qquad (3.54)$$

Температурное поле подвижного нормально-кругового источника в пластине на стадии теплонасыщения может быть рассчитано по формуле

$$T = T_{пр} e^{bt_0} [\psi_2(\rho_2, \tau_2 + \tau_0) - \psi_2(\rho_2, \tau_0)], \qquad (3.55)$$

где ψ_2 — коэффициент теплонасыщения (см. рис. 3.2, *б*); $T_{пр}$ — температура, определяемая по формуле (3.8).

Безразмерное время

$$\tau_0 = \left(\frac{v^2}{4a} + b\right) t_0.$$

В предельном состоянии при $t \to \infty$

$$T = T_{пр} e^{bt_0} [1 - \psi_2(\rho_2, \tau_0)]. \qquad (3.56)$$

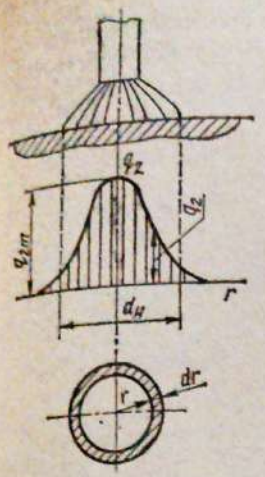


Рис. 3.13. Схема нагрева массивного тела нормально-круговым источником теплоты.

В случае быстродвижущегося мощного нормально-кругового источника в пластине

$$T = \frac{q}{v\delta\,[4\pi a\,(t+t_0)]^{1/2}}\,e^{-\frac{y^2}{4a(t+t_0)}-bt}, \qquad (3.57)$$

При большой скорости перемещения быстродвижущегося мощного нормально-кругового источника по поверхности полубесконечного тела температурное поле может быть рассчитано по схеме нормально-линейного источника:

$$T = \frac{q}{2\pi v\lambda\,[t\,(t+t_0)]^{1/2}}\,e^{-\frac{z^2}{4at}-\frac{y^2}{4a(t+t_0)}}. \qquad (3.58)$$

Такой источник нормально распределен по линии, перпендикулярной направлению его движения (оси Ox).

В формулах (3.57), (3.58) t — время, отсчитываемое от момента пересечения распределенным источником плоскости, в которой находится рассматриваемая точка.

3.1.6. Особенности тепловых процессов при различных видах сварки

Контактная сварка стержней

Нагрев стержней при контактной стыковой сварке осуществляется проходящим током плотностью j. Температуру нагрева T можно представить (рис. 3.14) как сумму

$$T = \Delta T_1 + \Delta T_2, \qquad 3.59)$$

где ΔT_1 — составляющая от нагрева током при удельном сопротивлении металла ρ_r; ΔT_2 — составляющая, вызванная контактным сопротивлением R. Температура

$$\Delta T_1 = \frac{1}{\beta}\,(e^{\beta\omega_0 t}-1), \qquad (3.60)$$

где

$$\omega_0 = (\rho_r/c\rho)_0\,j^2. \qquad (3.61)$$

Значения $(\rho_r/c\rho)_0$ и коэффициента β приведены в табл. 3.4.

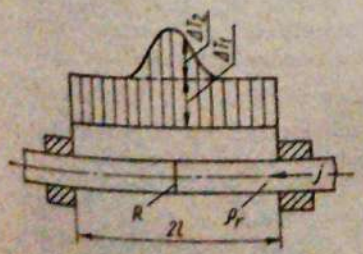


Рис. 3.14. Схема нагрева стержней при стыковой сварке.

Таблица 3.4. Значения коэффициентов для расчета нагрева стержней [3]

Материал	$\frac{c\rho}{\lambda}\cdot 10^{6}$, $\frac{\text{Дж}^2\cdot\text{К}}{\text{мм}^4\cdot\text{с}}$	$\beta\cdot 10^{2}$, $\frac{1}{\text{К}}$	$\frac{\rho_r}{c\rho}\cdot 10^{6}$, $\frac{\text{мм}^4\cdot\text{Ом}}{\text{Дж}^2}$	$\frac{\rho_r}{\lambda}\cdot 10^{-1}$, $\frac{\text{Ом}\cdot\text{К}}{\text{Дж}}$
Низкоуглеродистая сталь	3,6	3,8	8,9—9,3	8—10
Среднеуглеродистая сталь	5,25	3,0	7,2—7,5	7—9
Нержавеющая сталь (18-8)	16,7	0,28	6,2	3,8—5
Алюминиевые сплавы	1,35	2,33	25	7—7,5

Температура ΔT_2 рассчитывается по-разному в зависимости от способа контактной сварки.

Контактная сварка сопротивлением. На стадии нагрева

$$\Delta T_2 = \frac{Q_2}{c\rho\sqrt{4\pi at}}\,e^{-\frac{x^2}{4at}+\beta\omega_0 t}, \qquad (3.62)$$

где x — расстояние от стыка до сечения, в котором определяется температура.

Удельное количество теплоты, выделяющейся в стыке, $Q_2 = k/j$, где k — коэффициент, зависящий от свойств металла и удельного давления (см. табл. 3.4). При увеличении удельного давления коэффициент k уменьшается.

Температура сваривания металла (для стали 1520—1620 К) в стыке достигается при определенной продолжительности нагрева $t_н$. Значения произведений $j^2 t_н$ приведены в табл. 3.4.

На стадии выравнивания температур после окончания нагрева при $t > t_н$

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta T_{1н}}{2}\left\{\Phi\left[\frac{x+l}{\sqrt{4a\,(t-t_н)}}\right]-\Phi\left[\frac{x-l}{\sqrt{4a\,(t-t_н)}}\right]\right\}, \qquad (3.63)$$

где $\Delta T_{1н}$ — температура ΔT_1 в момент окончания нагрева; Φ — функция интеграла вероятности, берется по таблице в зависимости от величины аргумента.

$$\Delta T_2 = \frac{Q_2}{c\rho\sqrt{4\pi at}}\,e^{-\frac{x^2}{4at}+\beta\omega_0 t_н}. \qquad (3.64)$$

В формулах (3.63), (3.64) t — полное время с момента начала нагрева.

Контактная сварка с прерывистым подогревом и последующим оплавлением. Прерывистый подогрев рассматривают как непрерывный в течение времени $t_н$ подогрев током меньшей плотности

$$j_{эф} = j\sqrt{\Sigma t_в/t_н},$$

где $\Sigma t_в$ — суммарная длительность периодов включения тока плотностью j.

Температуру ΔT_1 определяют по формуле (3.60) с заменой j на $j_{эф}$ в формуле (3.61).

Температура

$$\Delta T_2 = \frac{q_2}{c\rho\sqrt{4\pi a}}\int_0^{t_н} e^{-\frac{x^2}{4at}+\beta\omega_0 t}\,\frac{dT}{\sqrt{t}}, \qquad (3.65)$$

где q_2 — мощность плоского источника теплоты, $q_2 = U_н j_{эф}$; параметр $U_н \approx 0{,}4\ldots0{,}6$ В (более высокие значения параметра соответствуют меньшим скоростям перемещения зажима машины и большим сечениям стержней).

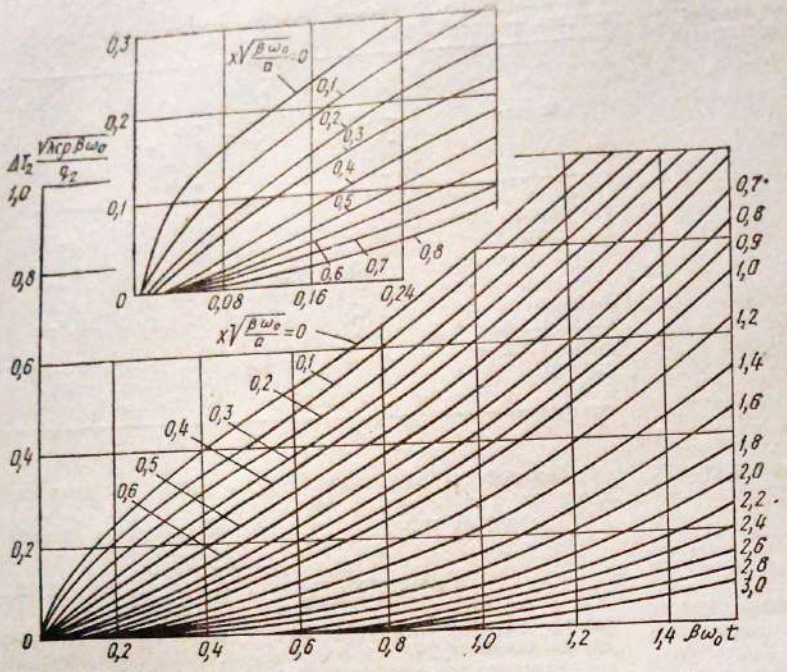


Рис. 3.15. Номограмма для определения температуры стержней при прерывистом подогреве [2].

Численно ΔT_2 определяют по номограмме на рис. 3.15 через безразмерные параметры: температуру $\Delta T_2\sqrt{\lambda c\rho\beta\omega_0}/q_2$; время $\beta\omega_0 t$ и расстояние $x\sqrt{\dfrac{\beta\omega_0}{a}}$.

Контактная сварка с непрерывным оплавлением. При оплавлении с равномерно возрастающей скоростью температура в околоконтактной области

$$T = T_{пл}\exp\left[-0{,}92\left(\frac{S}{a^2}\right)^{1/3}x\right], \qquad (3.66)$$

где $T_{пл}$ — температура плавления металла; S — ускорение движения захвата.

Максимально допустимое ускорение

$$S_{max} = 1{,}3\,\frac{a^2}{l_{о.с}^3}\left(\ln\frac{T_{пл}}{T_д}\right)^3, \qquad (3.67)$$

где $T_д$ — температура пластического деформирования, для стали $T_д = 770...970$ К; $l_{о.с}$ — околоконтактная зона стержня, прогретая до температуры выше $T_д$.

Температура стыка после выключения тока определяется по формуле

$$T = T_{пл}\exp(mt)\operatorname{erfc}\sqrt{mt}, \qquad (3.68)$$

где $m = 0{,}85\ (S^2/a)^{1/3}$; t — время после выключения тока.

Точечная контактная сварка листов

Температурное поле вокруг сварной точки в листах толщиной δ после выключения тока и размыкания электродов описывается схемой мгновенного нормально-кругового источника в тонкой пластине с теплоотдачей

$$T = \frac{Q}{4\pi\lambda\cdot 2\delta\,(t_0+t)}\exp\left|-\frac{r^2}{4a\,(t_0+t)}-\frac{\alpha t}{c\rho\delta}\right|, \qquad (3.69)$$

где Q — теплота, введенная в металл; r — расстояние от центра сварной точки; t — время, прошедшее с момента разведения электродов; t_0 — постоянная времени, характеризующая распределенность теплоты по радиусу в пластине в момент выключения тока при $t = 0$, можно принять $t_0 \approx t_{св}$.

Введенная в металл теплота равна $Q = Q_1 + Q_2$, где Q_1 — теплота, затраченная на расплавление объема металла свариваемых листов толщиной 2δ между электродами диаметром $d_э$; Q_2 — теплота, затраченная на нагрев кольца металла шириной $x = 4\sqrt{at}$, окружающего расплавленный металл. Условно принимают среднюю температуру металла в кольце равной $T_{пл}/4$.

С учетом теплосодержания металла

$$Q_1 = \frac{\pi d_э^2}{4}\,4\delta c\rho T_{пл}, \qquad (3.70)$$

$$Q_2 = k_1\pi x\,(d_э + x)\,2\delta c\rho\,\frac{T_{пл}}{4}. \qquad (3.71)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева кольца, $k_1 = 0{,}8$.

Мгновенная скорость охлаждения центральной точки при $T < 0{,}5T_{пл}$

$$w_0 = \frac{4\pi\lambda\,(T - T_н)^2}{Q/2\delta}, \qquad (3.72)$$

где $T_н$ — начальная температура свариваемых листов.

Скорость охлаждения возрастает при использовании жестких режимов сварки.

Электрошлаковая сварка

Расчетная схема нагрева металла при электрошлаковой сварке включает суммирование температур от действия трех движущихся источников теплоты ($q_{мет}$ и двух источников $q_{шл}$), равномерно распределенных по толщине металла (рис. 3.16). Мощность источника на линии A_1B_1

$$q_{мет} = vf\delta\rho s_{пл}, \qquad (3.73)$$

где $s_{пл}$ — теплосодержание единицы массы расплавленного металла при температуре шлака в активной зоне.

Мощность двух источников на линиях AC и BD

$$q_{шл} = q - q_{мет}, \qquad (3.74)$$

q — полная эффективная мощность.

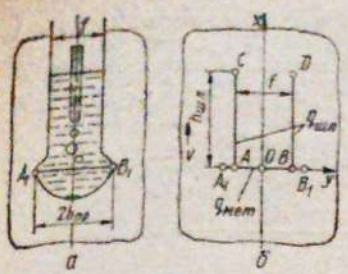


Рис. 3.16. Схемы процесса (*а*) и движения источников теплоты (*б*) при электрошлаковой сварке.

Линейная интенсивность мощности металлического источника теплоты равна $q_{мет}/2b_{пр}$, шлакового источника — $q_{шл}/2h_{шл}$.

В области температур ниже 970 К температурное поле можно рассчитывать по схеме линейного источника теплоты в пластине. При этом принимают, что интенсивность источника по толщине пластины равномерна.

При ЭШС с порошкообразным присадочным металлом, выполняемой с высокой скоростью, температурное поле рассчитывают по схеме линейного источника теплоты, движущегося в пластине по оси шва, в тепловом центре процесса (на глубине 15—20 мм от поверхности шлаковой ванны). Скорость охлаждения и длительность нагрева при этом определяют по формулам (3.22), (3.26).

Основным параметром термического цикла, служащим критерием оптимальности режима при электрошлаковой сварке, является время пребывания околошовной зоны при температуре выше 1170 К (длительность перегрева металла).

Плазменная сварка

Энергия плазменной дуги передается изделию электронами, тяжелыми частицами, конвективными потоками, излучением столба дуги.

Эффективный КПД плазменно-дугового нагрева (табл. 3.5) ниже, чем КПД дуги, из-за большей теплоотдачи к стенкам сопла и окружающему пространству. Он зависит от сварочного тока I и расхода газа V.

Таблица 3.5. **Эффективный КПД плазменно-дугового нагрева в аргоне [4]**

Нагреваемые объект или среда	Режим нагрева		η
	I, А	V, г/с	
Массивное тело	200	0,1—5	0,3—0,75
Проволока	190	1,5	0,1
Порошок	250—350	1,5	0,2
Газ:			
аргон	250	0,2	0,1—0,7
водород	220	0,3	0,3—0,8

Таблица 3.6. **Эффективный КПД нагрева плазменной струей [4]**

Нагреваемый объект	Режим нагрева			η
	Газ	I, А	V, г/с	
Массивное тело	Аргон	300	0,1—5	0,1—0,5
Проволока	»	330	0,1—5	0,2—0,3
Порошок:				
во встречных струях	»	300	1,4	0,07
в струе с магнитной крутилкой	Аммиак	225	1,5	0,04

При обработке материала плазменной струей энергия переносится высокотемпературным газовым потоком и передается изделию в результате конвекции и излучения струи.

Эффективный КПД нагрева плазменной струей (табл. 3.6) ниже, чем КПД нагрева плазменной дугой.

Эффективная мощность плазменной дуги и плазменной струи повышается с увеличением тока и зависит от состава и расхода газа, а также длины дуги. Увеличение расстояния от среза сопла до изделия приводит к уменьшению эффективной мощности.

Изменение удельного теплового потока вдоль радиуса по пятну нагрева для плазменной дуги и плазменной струи описывается законом нормального распределения (3.51).

При большой скорости движения источника температура тонких листов определяется по формуле (3.57), температура массивного тела — по формуле (3.58).

При малых скоростях перемещения плазменного источника нагрева применяются расчетные схемы, аналогичные схемам нагрева газовым пламенем.

Нагрев газовым пламенем

Тепловые характеристики газового пламени (табл. 3.7) зависят от теплотворной способности и расхода V горючего газа, чистоты кислорода.

Удельный тепловой поток по пятну нагрева распределен по закону нормального распределения (3.51). Значения коэффициента сосредоточенности k приведены в табл. 3.7.

Температурное поле в тонких листах от нагрева плазменной струей или пламенем газовой горелки, перемещающимся с умеренной скоростью, описывается схемой подвижного нормально-кругового источника теплоты в пластине с теплоотдачей:

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda\delta}\exp\left(-\frac{vx}{2a}+bt_0\right)K_0(\rho_2)\left[\psi_2(\rho_2,\ \tau+\tau_0)-\right.$$
$$\left.-\psi_2(\rho_2,\ \tau_0)\right], \qquad (3.75)$$

где ψ_2 — коэффициент теплонасыщения (см. рис. 3.2, *б*).

Безразмерное время

$$\tau_0 = \left(\frac{v^2}{4a}+b\right)t_0,$$

где t_0 — условное время действия фиктивного сосредоточенного источника (см. табл. 3.7).

Температура центра источника в процессе теплонасыщения при нагреве массивного тела плазменной струей или неподвижным пламенем простой горелки

$$T = \frac{q}{2\pi\lambda\sqrt{\pi a t_0}}\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{t}{t_0}}. \qquad (3.76)$$

При большой скорости перемещения газового пламени температура тонких листов рассчитывается по формуле (3.57), массивного тела — по (3.58).

Таблица 3.7. **Тепловые характеристики ацетилено-кислородного пламени [4]**

Номер наконечника	$V \cdot 10^3$, м³/с	q, Вт	η	$k \cdot 10^3$, мм$^{-2}$	t_0, с
1	0,42	1670	0,72	0,39	8
2	0,7	2500	0,68	0,35	9
3	1,1	3140	0,51	0,31	10
4	1,7	4000	0,44	0,28	11
5	2,8	5230	0,36	0,23	14
6	4,7	7300	0,3	0,20	15
7	7,2	9400	0,25	0,17	19

3.1.7. Справочные данные и примеры расчетов

Теплофизические коэффициенты металлов зависят от температуры. При инженерных расчетах принимаются усредненные значения коэффициентов для некоторой температуры $T_{ср}$.

В табл. 3.8 приведены теплофизические коэффициенты для некоторых металлов.

Ниже приведены значения коэффициента полной теплоотдачи вертикальных листов из углеродистой стали для разных температур.

T, К	400	600	800	1000	1200	1400	1600
α, Дж/(мм² · с · К)	0,2	0,3	0,6	0,9	1,3	1,9	2,8

Примеры расчета. 1. Пластины из низколегированной мартенситной стали толщиной 10 мм сваривают встык дуговой сваркой под флюсом. Режим сварки: ток $I = 220$ А; напряжение дуги $U = 36$ В; скорость сварки $v = 22$ м/ч $=$ $= 0{,}006$ м/с; начальная температура $T_н = 273$ К. Требуется определить в подвижной системе координат температуру точки зоны термического влияния с координатами относительно движущегося источника $x = 0{,}2$ м, $y = 0{,}02$ м и температуру точки на оси шва в том же сечении.

Эффективный КПД источника $\eta = 0{,}8$ (см. табл. 3.1). По табл. 3.8 находим $a = 0{,}8 \cdot 10^{-4}$ м²/с, $\lambda = 40$ Вт/(м $\times$ $\times$ К), $c\rho = 5 \cdot 10^6$ Дж/(м³ · К). Для $T_{ср} = 800$ К $\alpha =$ $= 60$ Вт/(м² · К). Эффективная мощность дуги по формуле (3.1) $q = 0{,}8 \cdot 220 \cdot 36 = 6340$ Вт. Коэффициент поверхностной температуроотдачи по формуле (3.9) $b =$ $= \dfrac{2 \cdot 60}{5 \cdot 10^6 \cdot 0{,}01} = 2{,}4 \cdot 10^{-3}$ с$^{-1}$. Время, за которое источник проходит расстояние $x = 0{,}2$ м, равно $t = \dfrac{x}{v} =$ $= \dfrac{0{,}2}{0.006} = 33{,}3$ с. Приращение температуры точек определяется по формуле (3.16).

В точке зоны термического влияния ($y = 0{,}02$ м)

$$\Delta T = \frac{6340}{0{,}006 \cdot 0{,}01\sqrt{4 \cdot 3{,}14 \cdot 40 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 33{,}3}} \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{0{,}02^2}{4 \cdot 0{,}08 \cdot 10^{-4} \cdot 33{,}3} - 2{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot 33{,}3\right) =$$

$$= 372 \exp(-0{,}37 - 0{,}08) = 372 \cdot 0{,}638 = 237 \text{ К}.$$

Температура точки зоны термического влияния $T = \Delta T +$ $+ T_н = 237$ К $+ 273$ К $= 510$ К.

2. Для условий примера 1 необходимо определить максимальную температуру и скорость охлаждения при $T =$ $= 773$ К в точке зоны термического влияния с координатой $y = 0{,}01$ м.

Таблица 3.8. Значения теплофизических коэффициентов [3]

Материал	$T_{ср}$, К	$c\rho$, $\frac{\text{МДж}}{(\text{м}^3 \cdot \text{К})}$	λ, Вт/(м · К)	$a \cdot 10^4$, м²/с
Низкоуглеродистые и низколегированные стали	500—600	5—5,24	37,7—41,9	0,075—0,09
Аустенитные стали	600	4,73—4,8	25—33,5	0,053—0,07
Медь	400	3,85—4	368—377	0,95—0,96
Латунь	350—400	3,47	117	0,34
Алюминий	300	2,72	272	1
Технический титан	700	2,85	16,8	0,06

Из условия, что максимально допустимая скорость охлаждения для этой стали равна 10 К/с, произвести корректировку режима сварки в случае, если скорость охлаждения окажется выше допустимой. По формуле (3.20) приращение максимальной температуры

$$T_м - T_н = \frac{6340}{\sqrt{2 \cdot 3{,}14 \cdot 2{,}72 \cdot 0{,}006 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 0{,}01 \cdot 0{,}01}} \times$$

$$\times \left(1 - \frac{2{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}01^2}{2 \cdot 0{,}08 \cdot 10^{-4}}\right) = 505 \text{ К}.$$

Максимальная температура $T_м = 505$ К $+ 273$ К $= 778$ К.

По формуле (3.22) скорость охлаждения

$$w_o = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 40 \cdot 5 \cdot 10^6 (773 - 273)^3}{\left(\dfrac{6340}{0{,}006 \cdot 0{,}01}\right)^2} = 14 \text{ К/с}.$$

Скорость охлаждения оказалась выше допустимой, которая равна 10 К/с. Уменьшить ее можно путем увеличения температуры $T_н$ (введение подогрева) или уменьшения погонной энергии сварки.

Температуру подогрева определяем по формуле (3.22);

$$(T - T_{н_1})^3 = \frac{w_o \left(\dfrac{q}{v\delta}\right)^2}{2\pi\lambda c\rho} =$$

$$= \frac{10 \cdot \left(\dfrac{6340}{0{,}006 \cdot 0{,}01}\right)^2}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 40 \cdot 5 \cdot 10^6} = 89 \cdot 10^6 \text{ К}^3.$$

Отсюда $T - T_{н_1} = 446$ К.

Для уменьшения скорости охлаждения с 14 до 10 К/с необходим подогрев: $T_п = 773 - 273 - 446 = 54$ К.

Погонную энергию сварки определяем по формуле (3.22). Требуемая погонная энергия, обеспечивающая скорость охлаждения 10 К/с, равна

$$q/v = \delta \sqrt{\frac{2\pi\lambda c\rho\,(T - T_o)^3}{w_o}} =$$

$$= 0{,}01 \sqrt{\frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 40 \cdot 5 \cdot 10^6 (773 - 273)^3}{10}} =$$

$$= 1{,}25 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}.$$

В примере $q/v = 6340/0{,}006 = 1{,}06 \cdot 10^6$ Дж/м.

Погонную энергию сварки можно увеличить с $1{,}06 \times$ $\times 10^6$ до $1{,}25 \cdot 10^6$ Дж/м путем увеличения тока с 220 до 260 А или снижения скорости сварки с 22 до 10 м/ч.

3.2. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ

3.2.1. Металлургические процессы и реакции при сварке металлов

При сварке плавлением происходит нагрев свариваемого и присадочного металлов до расплавления, их последующее охлаждение и затвердевание. Происходящие при этом металлургические процессы взаимодействия различных фаз — жидкого и твердого металла, газа и жидкого шлака — могут приводить к изменению состава и свойств переплавляемого металла, образованию пор, шлаковых включений и других дефектов в сварном шве.

При всех способах сварки плавлением выделяют две основные зоны взаимодействия расплавленного металла с газами и шлаками: высокотемпературную и низкотемпературную. Высокотемпературную зону составляет сварочная дуга с прилегающими областями передней части сварочной ванны и торца электрода с каплями электродного металла.

Низкотемпературную зону образует хвостовая часть сварочной ванны. При электрошлаковой сварке к высокотемпературной зоне относят область у торца электрода, к низкотемпературной — остальной объем сварочной ванны.

В высокотемпературной зоне происходит нагрев металла, в низкотемпературной — его охлаждение. Поэтому взаимодействие фаз вначале протекает в условиях повышения, а затем в условиях понижения температуры. В зависимости от условий (температуры, времени взаимодействия, исходных и равновесных концентраций и др.) полнота протекания реакций и даже их направленность могут быть различными. Взаимодействие фаз может быть эндотермическим, происходящим с поглощением теплоты, или экзотермическим, сопровождающимся ее выделением. С повышением температуры усиливаются эндотермические процессы, с понижением — экзотермические.

Длительность пребывания металла в жидком состоянии оказывает большое влияние на интенсивность и полноту взаимодействия фаз. Наиболее интенсивно металлургические реакции происходят при газовой и электродуговой сварке, когда время пребывания металла в жидком состоянии относительно велико. При сварке с использованием источников нагрева с высокой концентрацией энергии (электронный луч, импульсный лазер) длительность пребывания металла в жидком состоянии мала и взаимодействие фаз затруднено. При ЭШС особое значение имеет взаимодействие металла со шлаком, так как газовая атмосфера с металлом ванны непосредственно не контактирует.

3.2.2. Взаимодействие металлов с газами

Одним из основных условий обеспечения качества сварных соединений при сварке плавлением является защита жидкого металла от воздействия окружающего воздуха. Расплавленный металл, взаимодействуя с атмосферой, поглощает азот, кислород и водород. Источниками кислорода и водорода могут быть и электродные покрытия, флюсы, защитные газы и другие сварочные материалы, а также адсорбированная влага, оксиды и загрязнения на поверхности основного и присадочного металла. Кроме того водород, кислород и азот могут попадать в зону сварки из переплавляемого металла при содержании их в нем в избыточном (сверхравновесном) количестве.

При оценке степени защиты зоны сварки от воздуха показательно содержание в наплавленном металле азота. Так, сравнительное содержание азота в основном и наплавленном металле при различных способах сварки составляет [4]:

	N, %
Основной металл и проволока (низкоуглеродистая сталь)	0,002—0,003
Сварка голой проволокой без защиты	0,1—0,2
Сварка рутиловыми электродами ЦМ-9	0,035
Сварка фтористокальциевыми электродами (УОНИ 13/55) диаметром:	
5,0 мм	0,024
2,5 мм	0,062
Сварка порошковой проволокой ЭПС-15/2:	
короткая дуга ($U_д$ = 23...26 В)	0,004—0,010
длинная дуга ($U_д$ = 32 В)	0,038

Азот растворяется в большинстве конструкционных металлов и сплавов. Вследствие высокой энергии диссоциации, составляющей 940,5 кДж/моль, молекула N_2 обладает большой устойчивостью. В присутствии кислорода растворимость азота повышается.

В высокотемпературной зоне азот может взаимодействовать с кислородом:

$$N_2 + O_2 \rightleftarrows 2NO \ (\Delta H^0 = 90{,}37 \text{ кДж/моль}). \quad (3.77)$$

При понижении температуры соединение NO или окисляется до NO_2, или распадается вновь:

$$NO \rightarrow N + O.$$

Атмосферный азот может растворяться в каплях электродного металла или в жидкой ванне.

При наличии нитридообразующих элементов растворимость азота увеличивается. Устойчивые нитриды образуются при взаимодействии азота с Ti, Zr, Nb, Ta. В результате реакции при высокой температуре молекулярного азота с Al и Mg образуются устойчивые соединения AlN и Mg_3N_2; Fe и Ni образуют неустойчивые нитриды Fe_4N, Fe_2N, NiN. Образование нитридов способствует снижению степени возможного пресыщения расплава и уменьшает опасность азотного кипения и образования пор.

Растворимость азота в металлах, не образующих с ним устойчивых нитридов, описывается уравнением [3]

$$[N] = R_T p_{N_2}^{0,5}, \quad (3.78)$$

где [N] — концентрация растворенного азота, м³/кг; R_T — константа растворимости при данной температуре; p_{N_2} — парциальное давление молекулярного азота.

Концентрация азота в металле шва снижается при сварке короткой дугой, что объясняется улучшением защиты металла от воздуха, а также при увеличении скорости сварки связанным с этим уменьшением времени взаимодействия расплавленного металла с воздухом.

Кислород газовой или шлаковой фазы, контактируя с расплавленным металлом, растворяется в нем, а при достижении концентрации насыщения образует отдельную оксидную фазу. Интенсивность окисления примесей и легирующих элементов зависит от их сродства к кислороду. О сродстве к кислороду можно судить по изменению свободной энергии ΔG^0 образования оксида или по упругости его диссоциации P_{O_2} [4].

В случаях, когда значение P_{O_2} оксида меньше парциального давления кислорода p_{O_2} в атмосфере, окружающей расплавленный металл, атмосфера по отношению к нему будет окислительной и реакция происходит в направлении образования оксида. При $p_{O_2} < P_{O_2}$ атмосфера имеет восстановительный характер.

Упругость диссоциации при взаимодействии кислорода с чистым веществом зависит только от температуры, а при взаимодействии с веществом, находящимся в растворе, зависит также и от его концентрации в растворе.

Образующиеся при окислении продукты удаляются в шлак. На этапе охлаждения и в процессе кристаллизации возможно застревание оксидных фаз в металле в виде шлаковых включений.

Водород поглощается металлом в основном при контакте расплава с водяным паром, источником которого могут быть влага атмосферы, сварочного и основного материала, гидратированные оксидные пленки и т. п.

В высокотемпературной зоне сварки пары воды подвергаются процессам последовательной диссоциации [3]:

$$2H_2O \rightleftarrows 2H_2 + O_2; \quad 2H_2O \rightleftarrows 2OH + H_2;$$
$$H_2 \rightleftarrows 2H; \quad O_2 \rightleftarrows 2O. \quad (3.79)$$

Кроме того в столбе дуги атомы водорода и кислорода могут переходить в ионизированное состояние.

Растворимость водорода в металле описывается уравнением

$$[H] = R_T p_{H_2}^{0,5}, \quad (3.80)$$

где [H] — концентрация растворенного водорода, м³/кг; p_{H_2} — парциальное давление молекулярного водорода.

Поскольку значение парциального давления водорода входит в уравнение в половинной степени, с уменьшением p_{H_2}, например, в 100 раз содержание водорода в металле понизится только в 10 раз. В связи со спецификой растворимости водорода в условиях дуговой сварки создаются благо-

приятные условия для насыщения металла водородом. Водород поглощается металлами пропорционально их константам растворимости [3]. Важное значение имеет изменение растворимости водорода во время плавления или кристаллизации. Резкое различие растворимости водорода при температуре плавления металлов объясняется отношением объемов водорода, растворенных соответственно в жидком и твердом металле. Это соотношение составляет [3]: для железа — 23,5/15,0 = 1,56; меди — 13,0/3,2 = 4,07; алюминия — 0,690/0,036 = 19,2; никеля — 77,5/35 = 2,22.

Снижение растворимости водорода в процессе кристаллизации при затруднении выделения его в атмосферу может приводить к образованию в сварном шве газовых пор и других дефектов. Чем выше отношение растворимостей, тем чувствительнее металл к воздействию водорода.

Водород, растворенный в металле при сварке, подразделяют на диффузионно-подвижный и остаточный. Содержание диффузионно-подвижного водорода определяют, помещая образец наплавленного металла непосредственно после сварки в эвдиометр, заполненный жидкостью, не растворяющей водород. О количестве водорода судят по объему вытесненной из мерной трубки жидкости, относя его к массе наплавленного металла. Соотношение между количествами диффузионно-подвижного и остаточного водорода в зависимости от химического и структурного состояния металла может изменяться в широких пределах.

3.2.3. Взаимодействие металлов со шлаками

Шлаки образуются при расплавлении сварочных флюсов, электродных покрытий, порошковой проволоки, а в некоторых количествах и при сварке в защитной среде с окислительными свойствами (CO_2). Слой расплавленного шлака защищает расплавленный металл от воздуха. Кроме того компоненты шлаков вступают в металлургические реакции с расплавленным металлом, проводя его окисление, раскисление или легирование.

В зависимости от содержания кислых (SiO_2, TiO_2) или основных (CaO, MgO) оксидов шлаки разделяются на кислые и основные. Кислотность или основность шлака приближенно оценивают по отношению содержаний кислых оксидов к основным [3]: для кислых шлаков

$$\frac{(\%\ SiO_2) + (\%\ TiO_2)}{(\%\ CaO) + (\%\ MgO)} > 1, \qquad (3.81)$$

для основных шлаков

$$\frac{(\%\ SiO_2) + (\%\ TiO_2)}{(\%\ CaO) + (\%\ MgO)} < 1. \qquad (3.82)$$

Основность шлака влияет на ход окислительно-восстановительных реакций:

$$[Mn] + (FeO) \rightleftarrows (MnO) + [Fe]; \qquad (3.83)$$

$$[Si] + 2\,(FeO) \rightleftarrows (SiO_2) + 2\,[Fe]. \qquad (3.84)$$

С повышением основности количество марганца, переходящего в наплавленный металл, повышается, а количество кремния снижается. Протеканию реакций восстановления марганца и кремния способствует наличие в зоне сварки энергичных раскислителей: алюминия, титана и др. При сварке легированных сталей рекомендуется применять низкокремнистые флюсы. При сварке низкоуглеродистых сталей легирование шва марганцем и кремнием достигается применением флюсов с высоким содержанием силикатов и оксидов марганца.

Реакции восстановления являются эндотермическими, т. е. идут с поглощением тепла. Поэтому в высокотемпературной зоне сварки преобладает направление этих реакций влево. С понижением температуры в хвостовой части ванны реакции могут менять направление и развиваться с образованием оксидов, остающихся в кристаллизующемся металле. Оксидные включения ухудшают свойства металла шва.

Важное значение для обеспечения высокого качества шва имеет предупреждение его загрязнения серой и фосфором. Обычно сера и фосфор попадают во флюсы или покрытия с шихтовыми материалами. Они могут вноситься в зону сварки также из расплавленного основного и присадочного металлов.

С повышением основности шлака количество серы, переходящей в металл, снижается вследствие образования CaS, не растворимого в стали. Марганец также способствует снижению количества серы в металле в результате образования сульфида марганца:

$$[FeS] + [Mn] \rightleftarrows [Fe] + (MnS). \qquad (3.85)$$

Предупреждению перехода фосфора из шлака в наплавленный металл способствует окислительный характер процессов, в которых фосфор связывается в шлаке в фосфаты:

$$2Fe_3P + 5FeO \rightleftarrows 11Fe + P_2O_5; \qquad (3.86)$$

$$P_2O_5 + 3CaO \rightleftarrows Ca_3(PO_4)_2; \qquad (3.87)$$

$$P_2O_5 + CaO \rightleftarrows Ca(PO_3)_2. \qquad (3.88)$$

3.2.4. Влияние металлургических процессов на образование дефектов и свойства сварных соединений

Металлургические процессы при сварке в значительной степени формируют свойства сварных соединений и контролируют образование основных дефектов швов: пор, шлаковых и неметаллических включений и др.

Металлургические реакции, происходящие с выделением газов, могут приводить к образованию пор в сварных швах. Это связано с пересыщением кристаллизующегося металла газами вследствие резкого уменьшения их растворимости в металле с понижением температуры (рис. 3.17). Кроме азота и водорода образование пор может быть вызвано оксидом углерода, образующимся вследствие реакции C + O = CO.

Для предупреждения образования пор необходимо предусматривать меры, способствующие снижению насыщения металла газами, подавлению реакций газовыделения и обеспечению условий наиболее полного удаления газов из сварочной ванны [6].

Снижение содержания азота в расплавленном металле достигается в основном обеспечением максимально возможной защиты зоны сварки от воздуха. Насыщение жидкого металла азотом может быть снижено также путем его легирования нитридообразующими элементами — титаном, хромом и др. [3].

Эффективными средствами предупреждения водородной пористости являются применение низководородистых сварочных материалов, их просушка или прокалка перед сваркой, тщательная очистка поверхности основного и присадочного металлов от оксидов и органических загрязнений, удаление адсорбированной влаги и другие меры, направленные на снижение концентрации водорода в сварном шве. Снижению адсорбции металлом водорода способствует введение в зону сварки окислителей, связывающих водород: $H_2 + {}^1/_2\,O_2 = H_2O$. Водород может быть связан также в не растворимые в металле соединения с фтором путем введения в покрытия или флюсы фтористых соединений.

Кинетика выделения пузырьков газа из сварочной ванны и пористость швов существенно зависят от скорости кристаллизации шва. С увеличением скорости кристаллизации рост кристаллитов опережает рост и всплывание газовых образований, удаление пузырьков газа из шва затрудняется, пористость швов повышается. Снижение скорости кристаллизации при уменьшении скорости сварки, увеличении объема сварочной ванны, повышении начальной температуры и уменьшении теплоотвода в основной металл способствует уменьшению пористости швов. Положительное влияние на процесс удаления газа из кристаллизующегося шва в результате изменения схемы кристаллизации и выпал-

кивающего действия растущих дендритов оказывает увеличение отношения ширины сварочной ванны к ее глубине.

Кроме образования пор водород при сварке легированных сталей может быть причиной образования холодных трещин и так называемых флокенов — локальных растрескиваний, обнаруживаемых в виде светлых пятен в изломах металла.

Протекание окислительно-восстановительных реакций металла со шлаками имеет важное значение для формирования качества сварных соединений. Вследствие неизотермичности условий сварочного процесса восстановительные реакции, протекающие в высокотемпературной зоне сварки, с понижением температуры в хвостовой части кристаллизующейся ванны сменяются окислительными. Образование оксидов происходит в условиях, когда их удаление из затвердевающего металла затруднено и часть оксидов остается в металле шва в виде шлаковых включений. Оксидные включения снижают пластичность и ударную вязкость сварных швов. В зависимости от химического состава металла и хода окислительно-восстановительных реакций в сварочной ванне могут образовываться различные типы неметаллических включений [6], оказывающие заметное влияние на свойства швов.

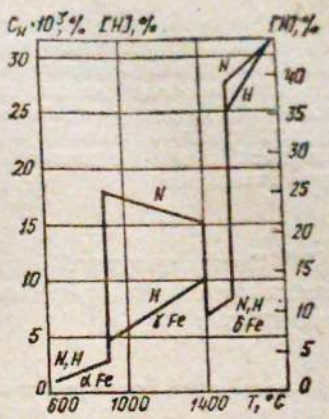
Оксидные включения образуются содержащимся в швах в количествах до 0,1 % кислородом. Распространенными оксидными включениями являются FeO, SiO и MnO, содержание которых регулируется количеством и соотношением кремния и марганца. Общее количество оксидных включений уменьшается с повышением содержания кремния, марганца и алюминия. В состав оксидных и смешанных неметаллических включений могут входить герцинит $FeO \cdot Al_2O_3$ (при низком содержании алюминия), глинозем Al_2O_3 (при высоком содержании алюминия), хромит $FeO \cdot Cr_2O_3$, оксид ванадия V_2O_3, титанат железа $FeO \cdot Ti_2O_3$ (при низком содержании титана), оксид титана Ti_2O_3 (при высоком содержании титана). Неметаллические включения имеют преимущественно округлую шарообразную или неправильную форму. В швах, сваренных под высококремнистым марганцовистым флюсом, наблюдаются межкристаллитные силикатные пленки, снижающие пластичность швов.

Сульфидные включения образуются содержащейся в швах в количествах до 0,02—0,04 % серой в основном в виде сульфидов марганца MnS и сульфидов железа FeS. В зависимости от раскисленности металла сварочной ванны образуются сульфидные включения трех типов [6]. Шаровидные оксисульфидные включения образуются преимущественно при окисленном металле, а также в присутствии хрома и кремния. Сульфидные включения в виде пленок и цепочек образуются по границам кристаллитов под влиянием небольших добавок сильных раскислителей (алюминия, титана, циркония и др.). Сульфидные включения угловатой формы могут образовываться из пленок и цепочек при увеличении содержания алюминия и циркония до концентраций, превышающих необходимые для полного раскисления сварочной ванны. Сульфидные включения в виде пленок и цепочек представляют наибольшую опасность, являясь основной причиной образования горячих трещин в швах.

Важное значение для обеспечения качества сварных швов имеет реакция взаимодействия марганца с сульфидом железа (3.85). Связывание серы в сульфиды марганца способствует удалению серы в шлак и предупреждает образование горячих трещин в процессе кристаллизации.

Нитридные включения встречаются значительно реже оксидных и сульфидных. Вследствие быстрого охлаждения и низкой концентрации (до 0,01—0,1 %) азот в металле шва обычно фиксируется в виде твердого раствора. Нитридные включения образуются при сравнительно высокой концентрации азота в металле шва (при сварке на воздухе открытой дугой или при повышенном содержании азота в основном металле) и выделяются главным образом в процессе охлаждения или термообработки. В случае пересыщения твердого раствора азотом происходит выделение включений нитридов при эксплуатации или нагреве сварных соединений. С этим связано так называемое старение металла.

Рис. 3.17. Растворимость газов в железе при давлении $9{,}81 \cdot 10^4$ Па.



Фосфорсодержащие включения чаще образуются в швах с аустенитной структурой в связи с низкой растворимостью фосфора в аустените. При сварке углеродистых и низколегированных сталей фосфор находится преимущественно в твердом растворе вследствие сравнительно высокой растворимости в феррите и обычно невысокого (до 0,04—0,06 %) содержания в шве. В аустенитных швах фосфорсодержащие включения в виде фосфидов, фосфидных эвтектик и фосфатов располагаются по границам кристаллитов. Фосфидные эвтектики образуют прослойки по границам кристаллитов металла шва или зерен основного металла в околошовной зоне, снижая высокотемпературные характеристики сварных соединений, их сопротивляемость образованию горячих трещин и пластичность при нормальных и низких температурах.

3.3. СВАРИВАЕМОСТЬ МЕТАЛЛОВ

3.3.1. Общее понятие и показатели свариваемости

Протекающие под воздействием сварки процессы кристаллизации, фазовых и структурных превращений в металле формируют физико-химическую неоднородность сварных соединений и обусловливают отличие их свойств от свойств основного металла. Это отличие может быть настолько существенным, что выбранный для той или иной конструкции металл в зоне сварного соединения может не удовлетворять условиям эксплуатации конструкции.

Способность металла образовывать сварное соединение, удовлетворяющее условиям эксплуатации конструкции, принято оценивать комплексной характеристикой — свариваемостью. Свариваемость считается тем лучшей, чем больше способов при широком изменении диапазонов режимов и простоте технологии может быть применено для получения сварного соединения с заданными свойствами.

Свариваемость металла характеризуется совокупностью показателей, определяющих технологическую прочность и эксплуатационную надежность сварных соединений конструкций при выбранном способе сварки. К основным показателям свариваемости относятся: сопротивляемость сварных соединений образованию горячих трещин и трещин при повторных нагревах; сопротивляемость сварных соединений замедленному разрушению (образованию холодных трещин); чувствительность металла к термомеханическому воздействию сварки, характеризуемая его склонностью к росту зерна, структурным и фазовым изменениям в шве и зоне термического влияния, изменением прочностных и пластических свойств; чувствительность к образованию пор; показатели эксплуатационной надежности (прочность, пластичность, долговечность, коррозионная стойкость и др.).

При несоответствии хотя бы одного показателя предъявляемым требованиям металл считается обладающим неудовлетворительной свариваемостью при выбранном способе и технологии сварки.

В качестве критериальных значений показателей эксплуатационной надежности обычно принимают соответствующие показатели основного металла. При невозможности обеспечить свойства сварного соединения на уровне свойств основного металла нормативные значения показателей свойств сварного соединения устанавливают по результатам специальных исследований с учетом опыта эксплуатации конструкций.

3.3.2. Типы первичной структуры, схема кристаллизации и горячие трещины при сварке

Типы первичной структуры при кристаллизации оказывают существенное влияние на свойства сварных соединений. Под первичной структурой (субструктурой) понимают структуру металла, образующуюся в процессе первичной кристаллизации, т. е. при переходе расплавленного металла в твердое состояние. Вторичная структура образуется в результате физико-химических процессов и структурных превращений в твердом состоянии.

Тип первичной микроструктуры сплава зависит от траектории роста кристаллов, определяемой видом фронта кристаллизации, характером распределения температуры расплава T перед этим фронтом и содержанием примесей c_0.

Под влиянием тепловых и кинетических условий кристаллизации металла шва, химического состава сплава, градиента температур, скоростей сварки и кристаллизации в различных зонах шва возможно образование разных первичных структур: столбчатой, полиэдрической. Столбчатая и полиэдрическая структуры, в свою очередь, могут быть ячеистыми, ячеисто-дендритными, дендритными. Такие управляющие параметры роста кристаллов, как скорость кристаллизации $v_{кр}$ и градиент температур в жидкой фазе grad T, оказывающие наиболее существенное влияние на образующуюся структуру, могут рационально подбираться и изменяться при сварке. Температурный градиент в жидкости можно повысить увеличением тепловой мощности дуги путем повышения напряжения и силы тока или понизить путем предварительного подогрева. Скорость кристаллизации можно регулировать изменением скорости сварки.

В случае больших значений grad T при кристаллизации почти чистых металлов ($c_0 \to 0$) происходит плоская кристаллизация. Структура получается столбчатой. Такой тип структуры характерен для шва вблизи зоны сплавления.

При таких же температурных условиях и малых значениях $v_{кр}$ и c_0 образуется ячеистая первичная структура. Металл с такой структурой состоит из ряда параллельных элементов, имеющих форму стержней и протяженных в направлении кристаллизации. Стержни в поперечном сечении имеют форму, близкую к шестиугольнику.

При средних значениях grad T, $v_{кр}$ и c_0 образуется ячеисто-дендритная структура. При малых значениях grad T и больших $v_{кр}$ и c_0 у кристаллов появляются ветви второго порядка и они превращаются в дендриты. Дендриты сплавов имеют субструктуру, напоминающую ячеистую. С уменьшением grad T размеры дендритов и их разветвленность возрастают.

Последние порции расплава иногда оказываются настолько насыщенными примесями (большие c_0), что в них зарождаются новые кристаллы, которые, препятствуя росту столбчатых кристаллов, образуют в центре шва зону с равноосной структурой.

Полиэдрическая структура образуется при больших значениях $v_{кр}$ и c_0 и очень малом grad T. В этих условиях перед фронтом кристаллизации возможно зарождение центров кристаллизации, образование кристаллов, их развитие и встречный рост в направлении растущих кристаллитов движущегося фронта кристаллизации.

На тип первичной структуры влияют химический состав, способ и режим сварки. В зависимости от этих факторов рассмотренные выше особенности кристаллизации, термические и концентрационные эффекты могут быть разными. Так, например, тип первичной микроструктуры в центральных зонах швов среднелегированной стали зависит от состава и скорости сварки следующим образом: при изменении скорости сварки от 5 до 50 м/ч в швах низколегированных сталей с 0,1—0,25 % С первичная структура изменяется от неустойчивой ячеистой до ячеисто-дендритной, а в швах среднелегированных сталей с 0,3 % С и более — от ячеисто-дендритной до развитой равноосной дендритной. Наибольшую технологическую и эксплуатационную прочность сварных соединений обеспечивает дендритная равноосная структура, наименьшую — столбчатая ячеистая первичная структура.

Первичную структуру сварного шва можно регулировать, используя металлургические и технологические приемы. Подавление столбчатой структуры с целью получения равноосных кристаллов в швах осуществляется: а) введением элементов — модификаторов 1-го рода (Ti, V, Nb, Zr и др.); б) введением модификаторов 2-го рода — поверхностно-активных примесей; в) введением элементов, образующих избыточные фазы в твердых растворах (α-фаза, первичные карбиды и др.); г) воздействием на сварочную ванну ультразвуковыми колебаниями, механическими вибрациями или электромагнитным перемешиванием металла ванны; д) термической и термомеханической обработкой, прокаткой сварных швов для получения равноосной структуры.

Схема кристаллизации сварного шва определяется термическими условиями в ванне и технологическими факторами.

В процессе кристаллизации форма межфазной поверхности фронта кристаллизации может быть плоской (линейный процесс кристаллизации при стыковой сварке стержней), цилиндрической (плоский процесс при сварке пластин встык с полным проплавлением) и пространственной (объемный процесс при наплавке или сварке массивного изделия).

При линейном процессе кристаллизации оси кристаллитов направлены по прямой, перпендикулярной к плоскому фронту кристаллизации. Такая макроструктура называется линейной.

При плоском процессе кристаллизации оси кристаллитов лежат в плоскости, перпендикулярной к цилиндрической поверхности фронта кристаллизации. Макроструктура этого типа называется плоской.

При объемном процессе кристаллизации оси кристаллитов представляют собой пространственные кривые. Такая макроструктура называется объемной. При больших скоростях сварки объемная макроструктура приближается к плоской, а плоская — к линейной.

На рис. 3.18 представлена схема кристаллизации в плоскости свариваемых листов. В пределах сварочной ванны одновременно осуществляются два процесса: плавление (NO_1N — фронт плавления) и кристаллизация (NMN — фронт кристаллизации). Схема кристаллизации характеризуется формой осей кристаллитов *1* и значением угла 2ψ между касательными *2* к осям.

Направление роста кристаллита совпадает с направлением максимального теплоотвода, т. е. с нормалью к изотерме *3* фронта кристаллизации.

Дифференциальное уравнение оси кристаллита как ортогональной траектории семейства изотерм кристаллизации имеет вид

$$x = \frac{(ON)^2}{OM}\,\psi, \qquad (3.89)$$

Рис. 6.18. Схема роста кристаллитов в сварочной ванне.

где

$$\psi = \sqrt{1 - k_y^2} - \ln \frac{1 + \sqrt{1 - k_y^2}}{k_y}.$$

Через параметр k_y координата y оси кристаллита задается в долях полуоси ON, т. е. $y = k_y \cdot ON$. Угол α, характеризующий схему кристаллизации, вычисляется по формуле

$$\alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{OM}{ON}\,\zeta\right), \qquad (3.90)$$

где $\zeta = k_y/\sqrt{1 - k_y^2}$.

Скорость кристаллизации $v_{кр} = v \cos \alpha$. С учетом формулы (3.90)

$$v_{кр} = v/\sqrt{1 + \left(\frac{OM}{ON}\right)^2 \zeta^2}. \qquad (3.91)$$

Значения параметров ψ и ζ для различных k_y приведены в табл. 3.9. Значения OM и ON определяются по размерам изотермы плавления для использования в формулах (3.89) — (3.91).

В случае мощного быстродвижущегося линейного источника в пластине (см. (3.16)) уравнение оси кристаллита имеет вид

$$x = -1{,}164\,\frac{m}{n^2}\,\frac{a}{v}\,\psi. \qquad (3.92)$$

В случае мощного быстродвижущегося точечного источника на поверхности полубесконечного тела (см. (3.17))

$$x = -2{,}328\,\frac{m}{n^2}\,\frac{a}{v}\,\psi. \qquad (3.93)$$

В уравнениях (3.92), (3.93) m и n — коэффициенты, зависящие от марки стали и погонной энергии. Для низкоуглеродистых сталей $m = 1{,}67 \cdot 10^{-3}\ q/v$; $n = 1{,}2 \cdot 10^{-3}\ q/v + 0{,}2$, где q/v — в килоджоулях на метр.

Горячие трещины являются распространенным и опасным дефектом сварных соединений. Они образуются как хрупкие межкристаллические разрушения металла шва и околошовной зоны, возникающие при высоких температурах в твердо-жидком или твердом состоянии преимущественно на этапе развития вязко-пластической деформации. Современные представления о природе и механизмах образования горячих трещин при сварке металлов рассмотрены в работах [5—7].

Образование горячих трещин происходит в условиях пониженной пластичности металла в процессе кристаллизации и затвердевания. Диапазон температур, в котором металл имеет пониженную пластичность, назван Н. Н. Прохоровым температурным интервалом хрупкости. Поскольку в диапазоне температур кристаллизации сварного шва деформация растяжения нарастает с понижением температуры по закону, близкому к линейному, интенсивность нарастания деформации, выражаемую первой производной деформации по температуре $\partial e_{вн}/\partial T$, приравнивают постоянной величине $\alpha_{вн}$ — темпу внутренней деформации: $\partial e_{вн}/\partial T = \alpha_{вн}$. Темп внутренней деформации складывается из темпа деформации, обусловленной температурной усадкой $\alpha_{св} = \partial e_{св}/\partial T$, и темпа деформации формоизменения $\alpha_{ф} = \partial e_{ф}/\partial T$:

$$\alpha_{вн} = \alpha_{св} + \alpha_{ф}. \qquad (3.94)$$

Вероятность образования горячих трещин зависит от соотношения трех факторов: темпа деформации металла в ТИХ; пластичности металла в ТИХ; значения ТИХ. С увеличением пластичности металла в ТИХ, уменьшением темпа деформации металла в ТИХ и значения ТИХ вероятность образования горячих трещин уменьшается.

Если за период нахождения металла в ТИХ накопленная деформация не исчерпает его пластичности, имеет место запас технологической прочности $\alpha_з$, измеряемый

Таблица 3.9. Значения параметров ψ и ζ

k_y	ψ	ζ	k_y	ψ	ζ
0,02	3,60	0,0200	0,25	1,10	0,2582
0,04	2,91	0,0400	0,30	0,92	0,3145
0,06	2,51	0,0601	0,35	0,77	0,3736
0,08	2,22	0,0803	0,40	0,65	0,4364
0,10	2,00	0,1005	0,50	0,45	0,5773
0,12	1,82	0,1209	0,60	0,30	0,7500
0,14	1,66	0,1414	0,70	0,18	0,9802
0,16	1,53	0,1621	0,80	0,09	1,3333
0,18	1,41	0,1830	0,90	0,03	2,0647
0,20	1,31	0,2042	1,00	0	∞

темпом деформации:

$$\alpha_з = \alpha_п - \alpha_{вн}, \qquad (3.95)$$

или

$$\alpha_з = \alpha_п - \alpha_{св} - \alpha_{ф}, \qquad (3.96)$$

где $\alpha_п$ — предельный темп деформации сплава.

Разность $\alpha_п - \alpha_{св}$ является показателем технологической прочности сплава, значение которого зависит от пластичности сплава в ТИХ, значения ТИХ и коэффициента линейной усадки сплава.

Значение $\alpha_з$ определяет показатель запаса технологической прочности для сварного соединения конструкции с определенным значением $\alpha_ф$.

3.3.3. Фазовые и структурные превращения. Образование холодных трещин при сварке

Фазовые и структурные превращения металла при сварке в зоне сварного соединения происходят в процессе нагрева и охлаждения. Сварные соединения, полученные сваркой плавлением, состоят из двух характерных участков: металла шва и зоны термического влияния в основном металле. При сварке давлением в твердой фазе выделяется только зона термомеханического влияния. Условия протекания фазовых и структурных превращений металлов определяются термическим циклом сварки. Основными параметрами термического цикла являются максимальная температура нагрева T_{max}, близкая в околошовной зоне к температуре плавления металла $T_{пл}$, длительность пребывания металла выше температуры конца фазового превращения (критическая точка A_{c_3}); скорости нагрева $\omega_н$ и охлаждения $\omega_о$ в интервале фазовых превращений (рис. 3.19, *б*).

В зоне термического влияния металлов и сплавов с полиморфными превращениями выделяют участки, фазовые и структурные превращения в которых протекают в границах характерных температур (рис. 3.19, *а*).

На участке околошовной зоны, нагреваемой до температуры A_{c_3} и выше, происходит полная перекристаллизация металла. Температура A_{c_3} соответствует концу $\alpha \rightarrow \gamma$-превращения стали и $\alpha \rightarrow \beta$-превращения сплавов титана. Участок полной перекристаллизации включает зону сплавления, непосредственно примыкающую к шву, и прилегающую к ней зону крупного зерна. В этих зонах происходят наибольшие изменения структуры и свойств основного металла, развивается химическая неоднородность, снижается пластичность и могут образовываться горячие и холодные трещины.

На участке зоны термического влияния, нагреваемом в диапазоне температур начала фазовых превращений перлита в аустенит (критическая точка A_{c_1} для стали) и $\alpha \rightarrow \beta$-превращения для сплавов титана и конца фазовых превращений (A_{c_3}), происходит частичная перекристаллиза-

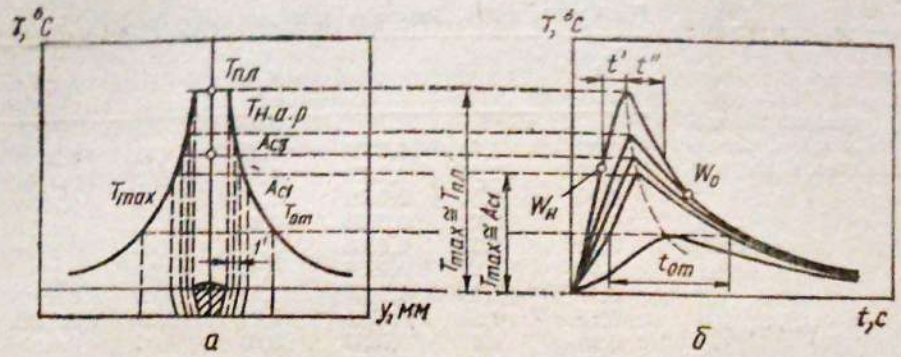


Рис. 3.19. Строение стыкового сварного соединения стали при однопроходной сварке плавлением:

а — распределение максимальных температур T_{max} поперек шва и соответствующие им участки зоны термического влияния; *б* — термические циклы на границах характерных участков зоны термического влияния: $T_{пл}$ — температура плавления; $T_{н.р}$ — температура начала интенсивного роста зерна; A_{c_1} и A_{c_3} — температуры начала и конца фазовых превращений; $T_{от}$ — температура отпуска; $t_{от}$ — время отпуска.

ция металла. Структурные изменения на участке неполной перекристаллизации в меньшей степени влияют на изменение свойств основного металла, чем на участке полной перекристаллизации.

Примыкающий к участку частичной перекристаллизации участок металла, нагреваемого от температуры начала рекристаллизации $T_{н.р}$ до температуры начала фазового превращения $T_{п.ф.п}$, называют участком рекристаллизации или отпуска. Изменение свойств этой зоны зависит от исходного состояния металла и параметров термического цикла — максимальной температуры нагрева в указанном диапазоне температур и длительности пребывания при температуре выше $T_{н.р}$. При сварке стали в состоянии после упрочняющей термической или термомеханической обработки вследствие отпуска мартенсита и рекристаллизации разупрочняется указанная зона. Наибольшее разупрочнение происходит на границе участков рекристаллизации и частичной перекристаллизации.

Структура и свойства околошовной зоны зависят от состава и исходного состояния стали и формируются под воздействием последовательно протекающих процессов фазовой перекристаллизации при нагреве, роста зерна и гомогенизации высокотемпературной фазы и последующего ее превращения при охлаждении.

При сварке плавлением конструкционных сталей с увеличением скорости нагрева температуры критических точек A_{c_1} и A_{c_3} и начала интенсивного роста зерна стали повышаются, диапазон температур $A_{c_1} - A_{c_3}$ расширяется и рост зерна ограничивается. Рост зерна в околошовной зоне увеличивается с повышением температуры нагрева и времени пребывания металла $(t' + t'')$ в диапазоне температур выше A_{c_3}. Ограничению роста зерна способствует легирование стали карбидообразующими элементами. Время $t' + t''$ в зависимости от технологии сварки может изменяться от менее 20 с (ручная и автоматическая сварка стали толщиной до 10 мм) до 30—100 с (автоматическая сварка под флюсом стали толщиной 15—25 мм) и 600—2000 с (электрошлаковая сварка стали толщиной 100—200 мм) [4]. С ростом $t' + t''$ повышается степень гомогенизации аустенита

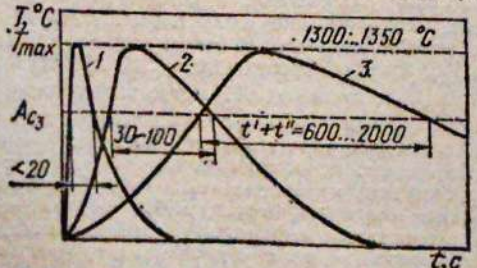


Рис. 3.20. Схема изменения времени $t' + t''$ размера зерна и степени гомогенизации аустенита:

1 — ручная и автоматическая сварка стали толщиной до 10 мм размером зерна 0,1—0,3 мм; *2* — автоматическая сварка стали толщиной 15—25 мм с размером зерна 0,3—0,4 мм; *3* — электрошлаковая сварка стали толщиной 100—300 мм с размером зерна 0,4—0,6 мм.

и происходит рост зерна (рис. 3.20). Укрупнение зерна снижает пластичность металла.

Один из основных показателей свариваемости — реакция стали на термический цикл сварки — оценивается на основе анализа диаграмм анизотермического превращения. На рис. 3.21 показана разница в кинетике фазовых превращений в низколегированных сталях дисперсионного упроч-

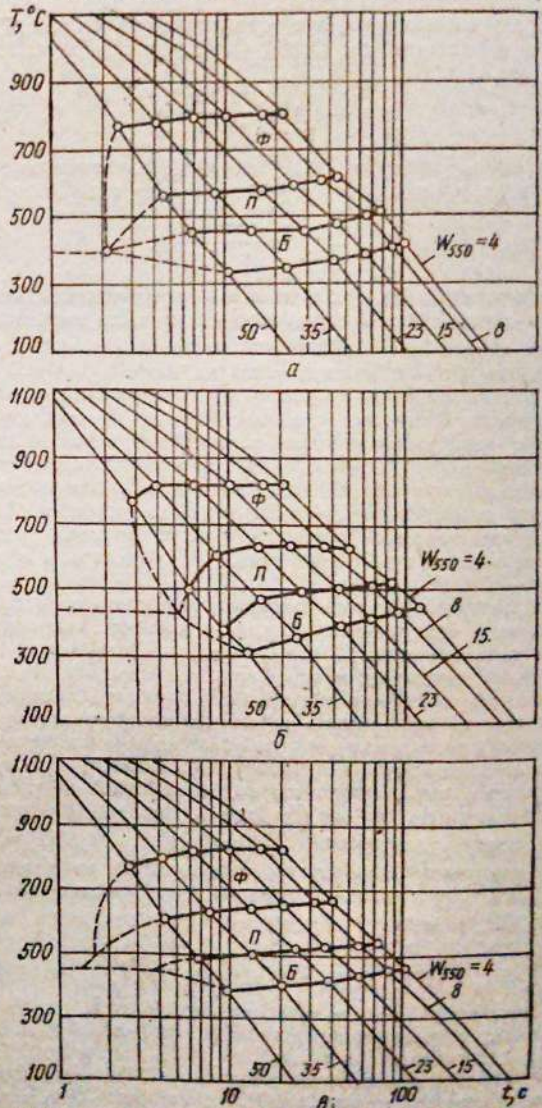


Рис. 3.21. Диаграммы анизотермического превращения аустенита сталей типа Х65 при скорости нагрева 200 °С/с: *а* — 0,19 % С; *б* — 0,13 % С; *в* — 0,08 % С; *Ф* — феррит; *П* — перлит; *Б* — бейнит.

ления класса прочности X65 в зависимости от содержания в них углерода. Диаграммы построены по данным дилатометрических исследований сталей в условиях имитации термического цикла сварки (максимальная температура нагрева 1300 °С, скорость нагрева 200 °С/с) на быстродействующем дилатометре конструкции МГТУ им. Н. Э. Баумана. С понижением содержания углерода в сталях от 0,19 % (рис. 3.21, *а*) до 0,13 % (рис. 3.21, *б*) и 0,08 % (рис. 3.21, *в*) температуры A_{c_3} повышаются с 900 до 910 и 930 °С соответственно. При этом существенно повышается температура мартенситного превращения, в особенности при больших скоростях охлаждения. Данные термокинетических диаграмм свидетельствуют о лучших показателях свариваемости сталей с низким содержанием углерода в широком диапазоне скоростей охлаждения.

Анализ фазовых и структурных превращений металлов под действием сварочного цикла используется для предупреждения наиболее опасных дефектов сварных соединений — холодных трещин.

Холодные трещины представляют собой локальные межкристаллические разрушения металла сварных соединений легированных сталей и сплавов титана. Они выявляются, как правило, после полного охлаждения сварного соединения и имеют блестящий кристаллический излом без следов высокотемпературного окисления. Возникновение холодных трещин обусловлено действием трех основных факторов: 1) структурного состояния металла сварного соединения (наличия составляющих мартенситного и бейнитного типов); 2) содержания и распределения водорода в сварном соединении после сварки; 3) напряженного состояния, формируемого сварочными напряжениями I рода и структурными напряжениями II рода. Действие основных факторов и физические процессы, контролирующие образование холодных трещин, различаются в зависимости от системы легирования сталей. Классификация холодных трещин по физическим признакам приведена в работах [5, 8]. Представления о природе и механизмах образования разновидностей холодных трещин продолжают развиваться.

В настоящее время образование холодных трещин при сварке рассматривается как один из видов замедленного разрушения стали, претерпевающей частичную или полную закалку [5, 7, 8]. Природа замедленного разрушения и образования холодных трещин при сварке закаливающихся сталей объясняется пониженной сопротивляемостью «свежезакаленной» стали микропластическому течению по границам аустенитных зерен. Склонность к микропластической деформации по границам зерен объясняется наличием в структуре мартенсита «свежезакаленной» стали краевых дислокаций высокой плотности, незакрепленных, способных к легкому скольжению. Для описания процесса образования холодных трещин используют схему Зинера, в соответствии с которой вследствие микропластического течения по границам зерен, ориентированным преимущественно в направлении приложенного растягивающего напряжения, происходит релаксация касательных напряжений τ и накопление высоких нормальных напряжений σ по поперечным границам. Предполагается, что максимальные напряжения накапливаются в вершинах зерен, в которые упираются скользящие граничные поверхности. Образование очагов

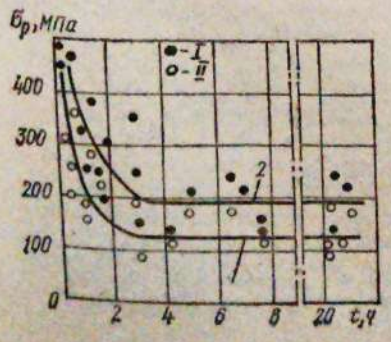


Рис. 3.22. Кривые замедленного разрушения сварных соединений сталей:
1 — типа 18ХГ2САФ (0,20 % С); *2* — типа Х60 (0,19 % С); *I* — трещины есть; *II* — трещин нет.

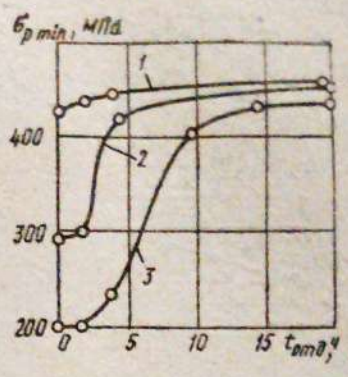


Рис. 3.23. Продолжительность времени «отдыха» сварных соединений стали типа Х60 (0,18 % С) с содержанием водорода в шве, см³/100 г:
1 — 3,5; *2* — 5,5; *3* — 9,5.

и их развитие в макротрещины подчиняются определенным закономерностям [7, 8].

Зарождение и развитие холодных трещин возможно непосредственно после сварки и охлаждения сварного соединения до комнатной температуры и происходит в течение некоторого времени. Минимальные напряжения, вызывающие образование холодных трещин, как правило, значительно ниже предела текучести стали (рис. 3.22). Склонность сварного соединения к образованию холодных трещин сохраняется в течение нескольких часов или суток. С увеличением времени после сварки вследствие протекания релаксационных процессов склонность к замедленному разрушению подавляется и полностью исчезает (рис. 3.23).

Образованию холодных трещин в стали способствует повышение температуры нагрева, скорости охлаждения, напряжений первого рода, микронапряжений и их концентраций. При сварке сталей вероятность образования холодных трещин в околошовной зоне выше, чем при закалке вследствие более высокой температуры нагрева, приводящей к повышению избыточной концентрации дефектов и несовершенств кристаллической решетки, укрупнению зерна, повышению концентрации углерода в твердом растворе, а следовательно, снижению температуры мартенситного превращения. В процессе интенсивного роста зерна по его границам возможны сегрегация некоторых легирующих элементов и вредных примесей и в ряде случаев оплавление легкоплавких фаз и их выделение по границам (явление перегрева), приводящее, как правило, к резкому снижению сопротивляемости образованию холодных трещин.

Повышение содержания водорода способствует увеличению склонности сварных соединений к образованию холодных трещин. Влияние водорода в значительной степени зависит от легирования сталей, режима сварки и других факторов, определяющих структурное состояние сварных соединений.

3.3.4. Методы испытаний на свариваемость

Для определения показателей свариваемости разработано большое количество специальных методов которые можно подразделить на три основные группы:

1) методы исследований кинетики фазовых структурных превращений в металлах при сварке и свойств основного металла в процессе и после его обработки по термодеформационному циклу сварки; 2) методы оценки технологической прочности основного металла и металла шва в процессе кристаллизации, фазовых и структурных превращений при сварке; 3) методы исследований структуры и свойств реальных сварных соединений.

Первая группа методов предусматривает проведение исследований кинетики фазовых и структурных превращений и механических свойств металла на образцах небольших размеров, подвергнутых воздействию термического и термомеханического циклов сварки. Термические циклы имитируются нагревом проходящим током или с помощью индукто-

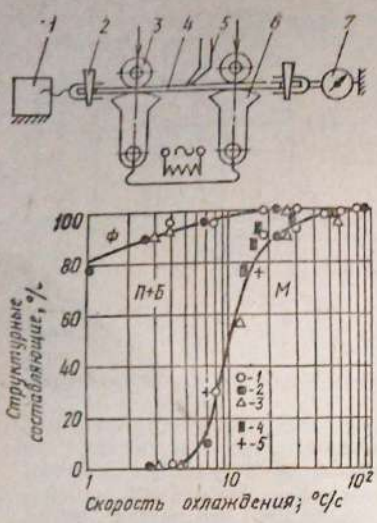


Рис. 3.24. Схема машины для оценки прочности и пластичности металлов в условиях сварки ЛТПЗ-5:

1 — механизм растяжения; *2* — клиновой штифт-компенсатор; *3* — прижим; *4* — образец; *5* — термопара; *6* — токоподводящий сектор; *7* — динамометр.

Рис. 3.25. Сопоставление структурного состояния дилатометрических образцов (*1*), образцов ИМЕТ-1 (*2*) и околошовной зоны образцов сварных проб — валиковой (*3*), CTS (*4*) и крестовой (*5*) стали 45; *Ф* — феррит; *П* — перлит; *Б* — бейнит; *М* — мартенсит.

ра. При необходимости принудительное охлаждение образцов проводится обдувом инертным газом.

Испытания механических свойств образцов металла в процессе обработки проводятся на специальных машинах ЛТПЗ-5 (МГТУ) [5], ИМЕТ-1 [7], Терморестр (Япония) и т. п. Установка ЛТПЗ-5 (рис. 3.24) обеспечивает нагрев образцов выше температуры солидуса и их растяжение с заданной скоростью на этапе охлаждения. Скорость нагружения может быть задана в широком диапазоне значений, различающихся в 10^4 раз.

Кинетику фазовых превращений в металлах под воздействием сварочного цикла исследуют с помощью быстродействующих дилатометров. Известны конструкции дилатометров ИМЕТ [7], МГТУ [5] и др. По данным дилатометрических исследований строят диаграммы анизотермического превращения аустенита (см. рис. 3.21) или структурные диаграммы (рис. 3.25) [7], позволяющие определять скорости охлаждения, при которых в структуре стали образуется допустимое количество мартенсита или других структурных составляющих. Вторая группа, включающая методы оценки сопротивляемости сварных соединений образованию горячих и холодных трещин при сварке, рассмотрена ниже отдельно. Третья группа методов предусматривает проведение исследований зависимости структуры и механических свойств металла от погонной энергии сварки и других параметров технологии как на специальных пробах, так и на реальных сварных соединениях. К специальным пробам относятся: валиковая проба МГТУ, пробы Шнадта и Чабелки, описания и области применения которых приведены в работе [7].

3.3.5. Испытания сварных соединений на сопротивляемость образованию горячих трещин

Методы оценки сопротивляемости сплавов образованию горячих трещин при сварке в зависимости от их сущности и критериев подразделяются на косвенные и прямые. Косвенные методы предусматривают расчет склонности сплавов к образованию трещин по их химическому составу. По характеру критериев косвенные методы дают лишь приближенную оценку технологической прочности. Прямые методы предусматривают испытания сплавов путем сварки специальных проб и оценку их технологической прочности по качественным, полуколичественным и количественным критериям.

Описание, классификация и анализ способов испытаний сплавов на сопротивляемость образованию горячих трещин приведены в работах [5, 7, 11].

Расчет склонности сплавов к образованию горячих трещин по химическому составу применяется для приближенной оценки. В качестве критериев используют эквивалент углерода $C_{экв}$, %, количество δ-железа, %, для аустенитных сталей — и количество равновесной эвтектики Э, %.

Сварка образцов лабораторных технологических проб применяется для качественной, полуколичественной и количественной оценок технологической прочности сплавов. Качественная оценка проводится по критерию наличия горячих трещин при сварке пробы, полуколичественная оценка — по критериям частоты образования трещин, критической скорости сварки и относительной длине трещин. Количественная оценка может проводиться по критерию критического размера пробы. Примеры взятия проб для качественной, полуколичественной и количественной оценок сплавов приведены на рис. 3.26. Применение проб может быть целесообразно для предварительной отбраковки сплавов и технологических вариантов сварки. Из большого числа проб наиболее предпочтительны пробы ЛТП МГТУ, ИМЕТ и Лихайская, использующие в качестве критерия критический размер образца.

Метод принудительной машинной деформации металла в процессе кристаллизации позволяет получить количественную оценку технологической прочности. В качестве критериев используют критическую скорость растяжения и критический темп растяжения шва (при переменном режиме сварки). Метод предусматривает сварку серии образцов в условиях растяжения с различными скоростями в зажимах специальных машин — ЛТП1-4 и ЛТП1-6 (МГТУ), ИМЕТ — ЦНИИЧМ [5] и др. За показатель технологической прочности принимают критические скорость ((А · мм)/мин) или темп деформации $\alpha_{кр}$ металла, при котором начинают образовываться горячие трещины.

Сварка отраслевых технологических проб проводится с целью имитации условий и выбора технологии сварки конструкции, при которых горячие трещины не возникают. Примером отраслевых проб является проба типа «вварыш» (рис. 3.26, *в*).

Запас стойкости швов против образования горячих трещин при сварке конструкций определяют путем сопоставления результатов сварки конструкции или ее элемента и лабораторных образцов с принудительной деформацией [9]

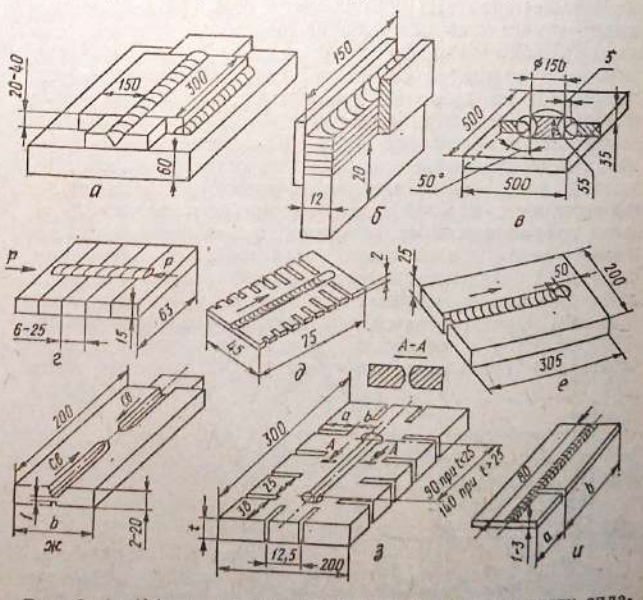


Рис. 3.26. Образцы проб для определения склонности сплавов к образованию горячих трещин по критериям:

наличие трещин: *а* — жесткий стык; *б* — многослойная наплавка; *в* — «вварыш», *г* — Пеллини; относительная длина трещин: *д* — Холдкрофт; *е* — NRL; критический размер пробы: *ж* — ЛТП МГТУ, *з* — Лихайская, *и* — ИМЕТ.

электродами эталонного ряда, различающимися показателем технологической прочности. Определив минимальное значение показателя $\alpha_{кр}$ или критической скорости электродов, при сварке которыми отсутствуют трещины в конструкции, принимают этот показатель за допустимый для данной конструкции. Сравнивая значения допустимого показателя технологической прочности для данной конструкции со значением $\alpha_{кр}$ для технологического варианта сварки, определяют уровень запаса технологической прочности.

3.3.6. Классификация способов оценки сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин

Ряд методов испытаний на сопротивляемость образованию холодных трещин регламентирован ГОСТ 26388—84. Описание и классификация методов содержатся в работах [5, 7, 8]. В зависимости от их назначения и критериев оценки методы разделяются на косвенные и прямые. По своему характеру критерии оценки сопротивляемости сталей образованию трещин разделяются на качественные, полуколичественные и количественные.

Качественные критерии не имеют числового выражения: они оценивают склонность к трещинообразованию по наличию или отсутствию трещин.

Полуколичественные критерии связаны с изменением нескольких активных факторов, обусловливающих образование трещин, но являются числовым выражением только одного из них. Например, при оценке сталей с помощью технологической пробы, предусматривающей последовательное многослойное наложение валиков до появления трещин, в качестве критерия принимается критическое число усадочных валиков (т. е. изменение одного из факторов), в то время как с изменением числа валиков изменяется ряд факторов, влияющих на трещинообразование (термическое воздействие сварки, напряженное состояние, насыщение водородом и др.).

Количественные критерии имеют числовые выражения; они однозначно оценивают сопротивляемость трещинам, так как связаны с изменением только одного из факторов, обусловливающих трещинообразование.

Косвенные методы оценки предусматривают оценку склонности стали к образованию трещин при сварке по химическому составу (эквивалент углерода $C_э$) (см. 1.1.1) или насыщению сварного шва водородом и жесткости соединения (критерий трещинообразования P_c).

По своему характеру критерий $C_э$ полуколичественный, поскольку он является числовым выражением одного фактора, характеризующего сталь (ее химический состав), и не учитывает ряда других факторов, влияющих на трещинообразование (термообработку стали, насыщенность ее водородом и др.). Оценка сопротивляемости сталей образованию холодных трещин при сварке по значению $C_э$ является ориентировочной.

Некоторые исследователи предлагают вводить в формулу $C_э$ значения количества водорода и толщины свариваемого металла с соответствующими коэффициентами. В частности, японскими исследователями (К. Ито и др.) предложен

Таблица 3.10. Прямые методы оценки сопротивляемости сталей образованию холодных трещин при сварке

Назначение метода	Критерий		Проба или метод
	Вид	Использование	
Определение склонности стали к возникновению трещин путем сварки лабораторных технологических проб	Наличие или отсутствие трещин *	Сравнение материалов между собой или с эталонным	Крестовая проба
	Относительная длина трещин **		Проба с кольцевой канавкой
	Критическая скорость охлаждения **		Проба CTS
	Критическая начальная температура **		Проба Тэккен
	Критическое число усадочных валиков **		Проба с круговой наплавкой 4*
	Критическая геометрическая жесткость образца пробы ***		Проба ВМЭИ 4*
Определение сопротивляемости стали образованию трещин путем испытаний сварных образцов на замедленное разрушение	Минимальное напряжение, при котором образуются трещины ***	Сравнение материалов между собой или с эталонным, сопоставление с допустимым показателем	Методы ЛТП2, имплант
Определение сопротивляемости замедленному разрушению путем испытаний образцов основного металла с имитацией термодеформационного цикла	Минимальное разрушающее напряжение ***	Сравнение материалов между собой и с эталонным	Методы ИМЕТ-4, ЛТП3
Определение группы стойкости сварных соединений к образованию трещин путем сварки специализированных (отраслевых) технологических проб	Комплекс условий сварки, при которых не образуются трещины ***	Выбор материалов и технологии сварки конструкций	Проба ЦНИИТС 4*
Определение запаса сопротивляемости образованию трещин путем сопоставления действительного показателя сопротивляемости стали образованию трещин с допустимым для конструкции данной категории	Относительное превышение действительного показателя сопротивляемости стали над допустимыми ***	Выбор материалов и технологии сварки сварных конструкций	Сопоставление результатов испытаний образца и конструкций по критерию

* Качественный критерий.
** Полуколичественный критерий.
*** Количественный критерий.
4* Описание приведено в работе [5].

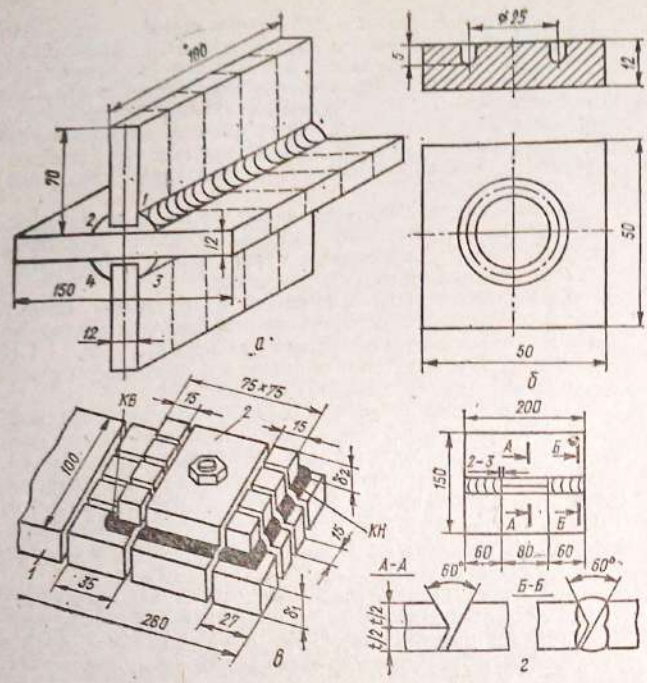


Рис. 3.27. Образцы технологических проб:
а — крестовой; *б* — с кольцевой канавкой; *в* — CTS с регулируемым теплоотводом; *г* — Тэккен (δ — толщина металла).

параметр трещинообразования

$$P_c = C\,\% + \frac{Si\,\%}{30} + \frac{Mn\,\%}{20} + \frac{Cu\,\%}{20} + \frac{Ni\,\%}{60} + \frac{Cr\,\%}{20} + \frac{Mo\,\%}{15} + \frac{V\,\%}{10} + 5B\,\% + \frac{\delta}{600} + \frac{H_2}{60}, \quad (3.97)$$

где δ — толщина свариваемого металла, мм; H_2 — содержание диффузионного водорода в металле шва, см³/100 г. Однако введение в формулу H_2 с постоянным коэффициентом не может считаться достаточно обоснованным, поскольку зависимости сопротивляемости образованию холодных трещин от количества водорода не имеют линейного характера, а наиболее существенно проявляются в определенных пределах насыщения водородом сварного соединения. Диапазон «эффективных» значений водорода и его границы зависят от химического состава сталей, термического цикла сварки и т. д.

Введение в формулу эквивалента углерода толщины свариваемых элементов с целью учета изменения сварочных напряжений при увеличении толщины металла не отражает действительного изменения напряжений, так как зависимость напряжений от жесткости конструкции также нелинейна.

Прямые методы, применяемые в настоящее время, представлены в табл. 3.10.

Технологические пробы представляют собой образцы определенной формы и размеров в большинстве случаев с жестким закреплением свариваемых элементов. С увеличением жесткости возрастает способность проб воспроизводить условия образования холодных трещин в материалах с низкой склонностью к трещинообразованию. При испытании ряда проб предусматривается возможность регулирования термических циклов сварки различных серий образцов. Многие из технологических проб (Лихайская, Пеллини, Тэккен и др.) в зависимости от исследуемых материалов используются для испытаний на склонность к образованию холодных и горячих трещин.

Испытания сталей с помощью технологических проб относительно просты и доступны. Однако качественный или полуколичественный характер критериев оценки склонности к трещинообразованию, неспособность многих проб оценить все стали, при сварке которых образуются трещины, делают их ограниченно пригодными для сравнительной оценки материалов. Технологические пробы не характеризуют запаса технологической прочности, и прогнозирование стойкости сварных соединений конструкций против образования холодных трещин по результатам испытаний большинства проб затруднено.

Описание наиболее распространенных проб приведено в работах [5, 7]. На рис. 3.27 показаны примеры отдельных проб, в которых трещинообразование оценивается по различным критериям, указанным в табл. 3.10.

Крестовая проба (Канада) [7]. Три пластины собирают в крестовидное соединение (рис. 3.27, *а*). Все поверхности касания предварительно шлифуют для обеспечения хорошего контакта. На образце выполняют четыре угловых шва длиной 150 мм в последовательности, указанной на рис. 3.27, *а*. Температура образца перед сваркой очередного шва не должна превышать 28 °С ± 3 °С. Через 48 ч после сварки проводят двухчасовой отжиг для снятия напряжений (595—650 °С). Образец разрезают на поперечные темплеты, приготовляют микрошлифы и выявляют трещины в околошовной зоне. Качественным критерием склонности к трещинам является факт наличия или отсутствия трещин.

Проба с кольцевой канавкой [7]. Сварку образца проводят по канавке (рис. 3.27, *б*). Условия охлаждения образца после сварки регулируют, обдувая его воздухом или дополнительно нагревая в индукционной печи. Холодные трещины выявляют металлографически или методом магнитного порошка после шлифовки поверхности образца на глубину 2,5 мм. Критерием оценки служит отношение длины трещин к длине всей наплавки.

Проба CTS с регулируемым теплоотводом [7]. Испытания предусматривают сварку ряда образцов (рис. 3.27, *в*), каждый из которых в зависимости от толщины пластин и положения сварных швов имеет определенный термический цикл (или термическую жесткость) в околошовной зоне. Образец собирают из двух пластин *1* и *2* из исследуемой стали. Чаще всего толщина пластин одинакова ($\delta_1 = \delta_2$). Пластину *1* прикрепляют к пластине *2* болтом и затем приваривают связующими (фланговыми) угловыми швами. Связующие швы накладывают в два слоя. Перед наложением каждого контрольного (лобового) внутреннего или наружного шва образец полностью охлаждают на воздухе до комнатной температуры. Контрольные швы сваривают в один слой.

В связи с различными условиями теплоотвода скорость охлаждения в околошовной зоне внутреннего шва приблизительно в 1,5 раза выше, чем у наружного. С целью ступенчатого изменения скорости охлаждения и жесткости сварных соединений исследования проводят на образцах из пластин нескольких толщин. После сварки образцы выдерживают в течение недели, а затем разрезают на шлифы поперек зоны термического влияния. Шлифы травят и исследуют на наличие холодных трещин. В качестве критерия стойкости против образования трещин принята критическая скорость охлаждения (обычно при температуре 300 °С), при которой в околошовной зоне появляются трещины, или длина трещин, выраженная в процентах от катета шва.

Проба Тэккен [5]. Образец (рис. 3.27, *г*) с центральной канавкой, имеющей *Y*-образную разделку кромок, заваривают контрольным швом на режимах, обеспечивающих толщину шва не более 6 мм, с обязательным непроваром в корне шва. Контрольный шов выполняют при различных температурах предварительного подогрева. Трещины образуются преимущественно в околошовной зоне от концентратора напряжений в корне шва. После сварки образцы выдерживают на воздухе не менее 24 ч. Затем из пробы вырезают поперечные шлифы, травят их 2—4 %-ным раствором HNO_3 в этиловом спирте и исследуют на наличие трещин при увеличении не менее чем в 100 раз. Основным критерием склонности к трещинам является критическая скорость охлаждения при 300 °С (или время охлаждения от 800 до 500 °С), при которой появляются трещины. Оценку

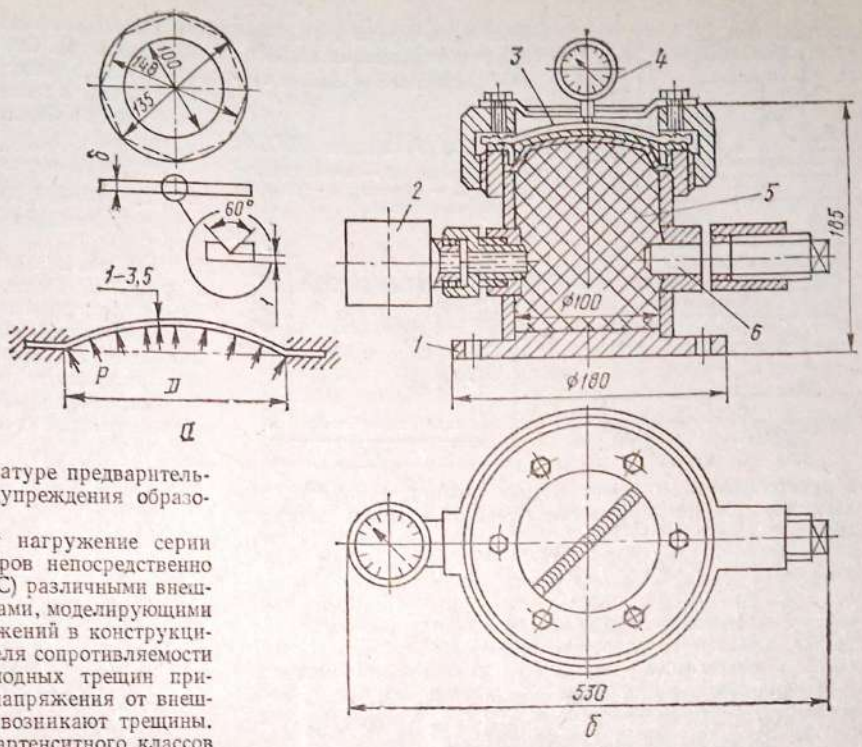


Рис. 3.28. Образец (*а*) и устройство ЛТП2-5 (*б*) для испытаний по методу ЛТП2:
1 — корпус; *2* — манометр; *3* — образец; *4* — индикатор; *5* — гидропластмасса; *6* — плунжерная пара.

проводят также по минимальной температуре предварительного подогрева, необходимой для предупреждения образования трещин.

Метод ЛТП2 [5] предусматривает нагружение серии сварных образцов ограниченных размеров непосредственно после сварки (после охлаждения до 50 °С) различными внешними постоянно действующими нагрузками, моделирующими действие остаточных сварочных напряжений в конструкциях. В качестве количественного показателя сопротивляемости сварного соединения образованию холодных трещин принимают минимальные растягивающие напряжения от внешней нагрузки, при которых в образце возникают трещины. При испытании сталей перлитного и мартенситного классов достаточна выдержка под нагрузкой в течение 20 ч. Предусмотрены различные схемы испытаний (табл. 3.11), позволяющие воспроизводить все разновидности холодных трещин в сварных соединениях и оценивать сопротивляемость материалов их образованию.

При сварке образцов для испытаний необходимо воспроизводить и фиксировать термический цикл (в частности, скорость охлаждения w_0), характерный для сварки конструкций из исследуемого металла, а также определять концентрацию водорода в наплавленном металле с помощью карандашной спиртовой пробы [8] или вакуумным методом. Показатель сопротивляемости стали трещинообразованию может использоваться только при одновременном указании термического цикла сварки и концентрации водорода в наплавленном металле.

Для широкого применения, исходя из простоты оборудования, использования небольших нагружающих сил и возможности одновременного испытания серии из 5—10 образцов, рекомендуются схемы испытаний, предусматривающие нагружение изгибающей нагрузкой.

Испытание круглых образцов изгибом распределенной нагрузкой [5]. Образцы (рис. 3.28, *а*) сваривают в зажимном приспособлении из меди толщиной, равной 3—5 толщинам свариваемого металла. Устройство для испытаний ЛТП2-5 (рис. 3.28, *б*) состоит из корпуса, заполненного гидропластмассой, и плунжерной пары, с помощью которой внутри корпуса создается давление до $150 \cdot 9{,}81 \cdot 10^4$ Па. Гидропластмасса обладает высокой вязкостью и не протекает в зазорах, не превышающих 0,02 мм. При нагрузке в первый час испытания падение давления не превышает 2—3 %. В последующий период обеспечивается практическое постоянство давления во времени. Сопротивляемость трещинам оценивают либо по критическому давлению, либо по критическому напряжению, рассчитанному по формуле

$$\sigma_p \approx 0{,}12\left(\frac{D}{\delta}\right)^2 P + 0{,}00044\,\frac{1}{E}\left(\frac{D}{\delta}\right)^6 P^2. \quad (3.98)$$

Испытание тавровых образцов консольным изгибом [5]. Образцы (рис. 3.29) собирают и сваривают «в лодочку»

Таблица 3.11. **Схемы испытаний по методу ЛТП2**

Схема нагружения	Тип сварного образца	Толщина, мм	Оборудование для испытаний
Растяжение	Прямоугольный с поперечным стыковым швом; прямоугольный с продольным стыковым швом	1—10	Разрывные машины ЛТП2-7, создающие постоянное усилие (5...100) · 9,81 · 10^3 Н
Изгиб распределенной нагрузкой образца, жестко закрепленного по контуру	Круглый (или восьмигранный) плоский со стыковым швом по диаметру	1—3	Гидропластмассовое устройство ЛТП2-5, развивающее давление до 150 · 9,81 · 10^4 Па
Изгиб консольный	Тавровый с угловым швом	8—20	Установка ЛТП2-3 для нагружения постоянным изгибающим моментом (10...165) × × 9,81 Н · м
Изгиб трехточечной сосредоточенной нагрузкой	Прямоугольный с поперечным стыковым швом; прямоугольный с продольным стыковым швом	8—20	Прессы или разрывные машины, снабженные устройствами для сжатия усилием (3...30) × × 9,81 · 10^3 Н, с жесткими скобами (ЛТП2-6)

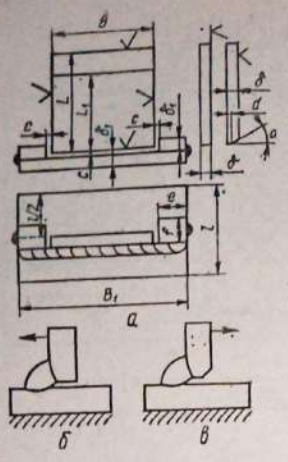


Рис. 3.29. Схема испытаний образца консольным изгибом:
а — образец; *б*, *в* — схемы нагружения.

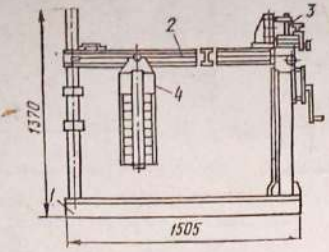


Рис. 3.30. Установка ЛТП2-3:
1 — станина; *2* — рычаг нагружения; *3* — образец; *4* — кассета с набором грузов.

в приспособлении из двух медных пластин, которые охлаждаются водой по внутренним каналам. Размеры таврового образца:

δ, мм	B, мм	L, мм	L_1, мм	α, град	d, мм
8—20	100	100	80	15	4
8—14	100	230	200	60	3—7 (2) *

l, мм	e × f, мм²	c, мм	δ_1, мм	B_1, мм	S, мм	R, мм
100	25×25	1,5—2	10—14	150	—	—
160	30×40	2	—	—	40	8

* Для испытаний корня сварного соединения.

Установка для испытаний ЛТП2-3 (рис. 3.30) состоит из пяти одинаковых секций, расположенных на общей станине. Образец нагружают изгибающим моментом с помощью грузов, подвешенных на рычаге. Изменение нагружающего момента достигается перемещением грузов по рычагу. Максимальный изгибающий момент — 165 · 9,81 Н · м (при массе свинцовых грузов 150 кг). После испытания образцы со стороны корня шва травят 5 %-ным раствором HNO_3, высушивают и разрушают. Протравленные участки излома считают трещинами. В качестве показателя сопротивляемости трещинам принято критическое разрушающее напряжение

$$\sigma_p \approx 6M_{изг}/bh^2, \qquad (3.99)$$

где $M_{изг}$ — постоянный изгибающий момент, Н · м; b — ширина образца, м; h — средняя высота излома (или катета шва) по 3—5 измерениям, м.

Испытания стыковых образцов изгибом сосредоточенной нагрузкой [5]. Образцы (рис. 3.31, *а*) сваривают в медных зажимных приспособлениях, охлаждаемых водой (применяется также охлаждение нижней поверхности образца водяным душем). Размеры стыкового образца:

δ мм,	B, мм	L, мм	L_1, мм	α, град	d, мм	l, мм	l×f, мм²	c, мм	S, мм	R, мм
16—20	100	330	280	60	9—13 (3)*	180	30×40	3	50	10

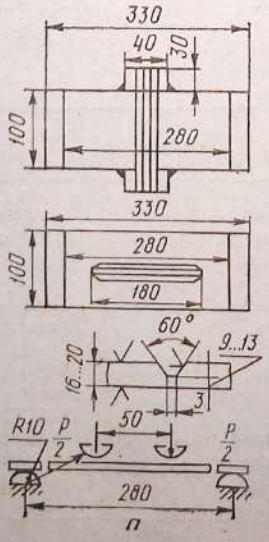
* Для испытаний корня сварного соединения.

Сваренные образцы нагружают в жестких скобах ЛТП2-6 (рис. 3.31, *б*) до заданного усилия или прогиба, после чего фиксируют положение сварного образца в напряженном состоянии и выдерживают его в течение 20 ч. Наличие трещин выявляют осмотром поверхности образца или его излома по максимально нагруженному сечению. Перед изломом образец травят 5 %-ным раствором HNO_3 и высушивают. Протравленные участки излома считают трещинами. Сопротивляемость трещинам оценивают критическим разрушающим напряжением

$$\sigma_p \approx K\,\frac{12E\delta\,(f_m - f_o)}{2L_1^2 + 2S - S^2}, \qquad (3.100)$$

где f_m — полный прогиб в центре образца; f_o — остаточный прогиб на базе L_1; K — переменный коэффициент, учитывающий возрастание момента сопротивления при изгибе в условиях развития пластической деформации, при $f_o = 0$ $K = 1$, при $f_o = 2f_y$ $K = 0{,}8$, при $f_o = 4f_y$ $K = 0{,}65$ (f_y — упругий прогиб при $f_o = 0$).

Метод имплант получил широкое применение в основном за рубежом [7]. Образец для испытаний состоит из вставки диаметром 8 мм с Х-образным надрезом (рис. 3.32, *а*), изготовленной из испытываемой стали вдоль направления проката, и пластины толщиной 20 мм (рис. 3.32, *б*) из той же низкоуглеродистой стали. Вставку устанавливают на скользящей посадке с зазором 0,05—0,15 мм в отверстие пластины, на которую наплавляют валик с одновременным переплавлением верхней части вставки (рис. 3.32, *в*). Расстояние между надрезом и концом образца равно максимальной глубине проплавления при выбранном режиме сварки. Погонную энергию сварки изменяют таким образом, чтобы обеспечить время охлаждения в околошовной зоне вставки от 800 до 500 °С ($t_{8/5}$) при исходной температуре пластины 20 °С, равное 6, 10 и 20 с. Для получения меньших значений $t_{8/5}$ применяют образцы диаметром 6 мм и пластины толщиной 30 мм. Наплавку выполняют автоматическим способом покрытым электродом, проволокой под флюсом или в среде защитных газов. В процессе охлаждения в диапазоне темпе-



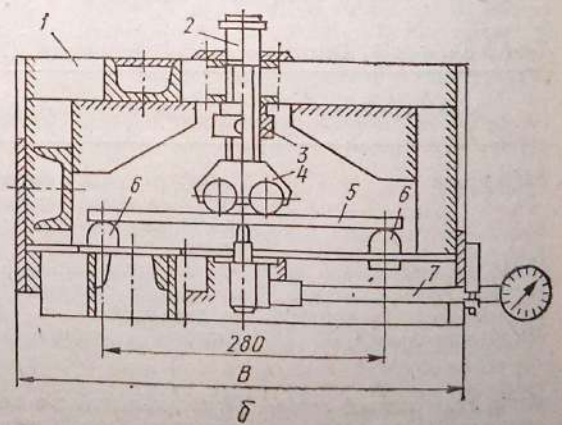


Рис. 3.31. Образец (*а*) и устройство ЛТП2-6 (*б*) для испытаний по методу ЛТП2:
1 — корпус; *2* — шток; *3* — гайка; *4* — пуансон; *5* — образец; *6* — опора; *7* — устройство для измерения прогиба.

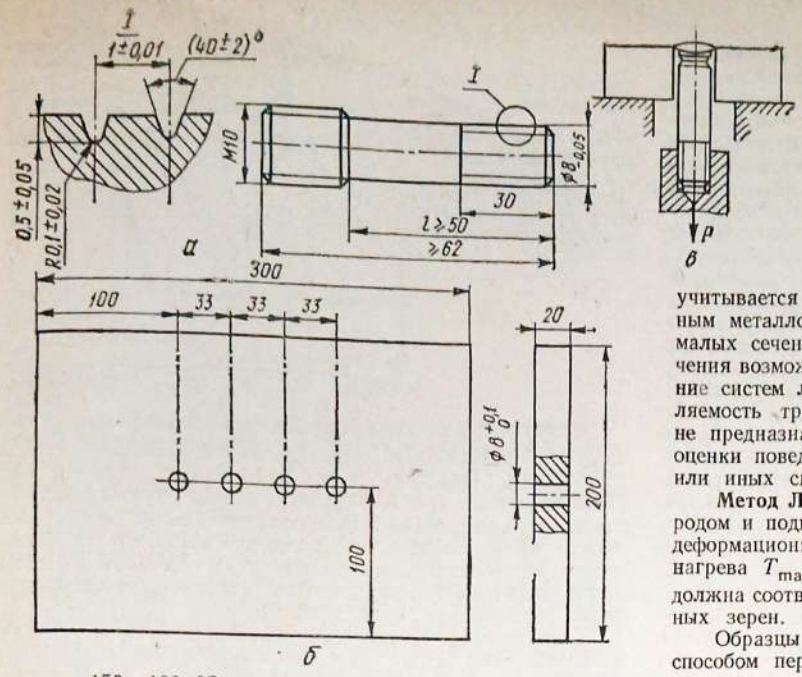


Рис. 3.32. Образец-вставка (*а*), пластина (*б*) и схема нагружения при испытании по методу имплант (*в*).

ратур 150—100 °С образец постепенно (до 1 мин) нагружают до заданного усилия. Время выдержки под нагрузкой — 20 ч. При разрушении образцов в процессе испытаний фиксируют время разрушения. Наличие или отсутствие трещин в неразрушившихся образцах выявляют на продольных шлифах. При испытаниях определяют количество водорода в наплавленном металле.

Метод ИМЕТ-4 [7]. Метод предусматривает оценку стойкости против замедленного разрушения (образования холодных трещин) образцов основного металла (рис. 3.33) после их обработки термическим или термомеханическим воздействием по сварочному циклу околошовной зоны. Обработка образцов по заданному циклу и последующая выдержка при постоянной нагрузке до разрушения проводятся в специальной машине ИМЕТ-4.

Критериями оценки сопротивляемости трещинам служит минимальное разрушающее напряжение $\sigma_{p\,min}$ и время до разрушения $t_{p\,min}$ при этом напряжении. В сравнении с методом ЛТП2 данный метод содержит ряд упрощений: не

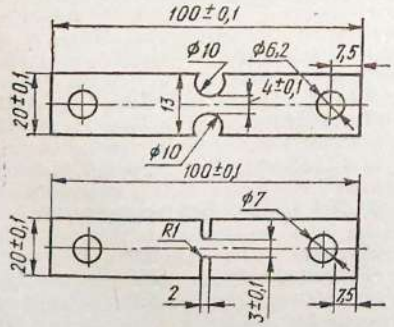


Рис. 3.33. Образцы для испытаний по методу ИМЕТ-4.

учитывается взаимодействие между металлом шва и основным металлом в зоне сплавления, испытываются образцы малых сечений и пр. Упрощения приняты с целью обеспечения возможности в более чистом виде анализировать влияние систем легирования и вредных примесей на сопротивляемость трещинам [7]. Испытания по методу ИМЕТ-4 не предназначены для получения точной технологической оценки поведения металлов при сварке с применением тех или иных сварочных материалов и технологии сварки.

Метод ЛТП3 [5]. Образцы (рис. 3.34) насыщают водородом и подвергают воздействию термического либо термодеформационного цикла сварки. Максимальная температура нагрева T_{max} образцов проходящим электрическим током должна соответствовать началу оплавления границ аустенитных зерен.

Образцы насыщаются водородом электролитическим способом перед обработкой термическим циклом. Воспроизведение термических или термодеформационных циклов сварки выполняют на ЛТП3-5 или ЛТП3-6. Деформационный цикл воспроизводят на этапе охлаждения путем растяжения образцов с заданной постоянной скоростью либо во всем диапазоне температур от T_{max} до 20 °С, либо в заданном диапазоне температур. После обработки образцов по термическому или термодеформационному циклу сварки их нагружают постоянной нагрузкой путем растяжения или изгиба в приспособлениях к машине ЛТП2-3. В качестве критерия сопротивляемости трещинам приняты минимальные разрушающие напряжения, которые определяют условно по формуле для чистого изгиба с учетом только рабочего сечения образца.

Определение запаса стойкости против трещин [5, 10]. Показатель сопротивляемости трещинам, определенный при испытании сварных образцов или образцов основного металла, обработанных по имитированному сварочному циклу, не может быть непосредственно применен для оценки стойкости сварных соединений конструкций против трещин, поскольку он отражает только свойства материалов в определенных условиях сварки или воздействия сварочного цикла. Стойкость соединений конструкций против образования трещин помимо этого зависит также от сварочных напряжений в конструкции.

Запас стойкости против трещин сварных соединений конструкций в принципе может быть определен сопоставлением показателя сопротивляемости, определенного при испытании сварных образцов, и сварочных напряжений в конструкции. Однако определение напряжений в большинстве сложных по форме конструкций затруднено. Одним из возможных путей определения стойкости конструкций против трещин является сопоставление показателей сопротивляемости исследуемого материала и эталонного, т. е. материала того же класса, при применении которого в сварных

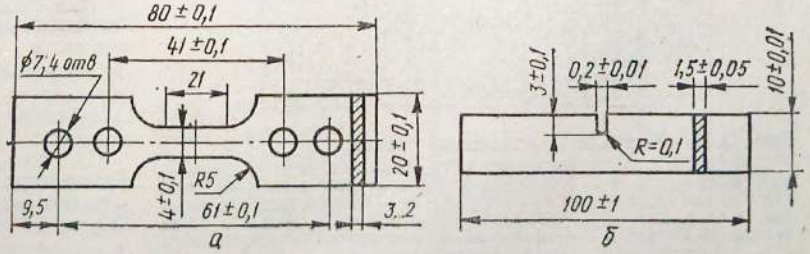


Рис. 3.34. Образцы для испытаний по методу ЛТП3 растяжением (*а*) и изгибом (*б*).

конструкциях отсутствовали трещины. Другой путь определения запаса стойкости заключается в сопоставлении показателя сопротивляемости исследуемого материала и допустимого для данного типа конструкций. Допустимый показатель определяется путем параллельного проведения испытаний образцов по методу ЛТП2 и соответствующих по материалу сварных конструкций или заменяющих их натурных образцов. Методика определения допустимого показателя предусматривает идентичность материалов, термических циклов, влажности электродных материалов и окружающего воздуха при сварке образцов и конструкции [10]. При этом параметры технологии задаются в нескольких вариантах так, чтобы в определенных условиях обеспечивалось отсутствие, а в других — наличие трещин в сварных соединениях конструкции. Минимальный показатель сопротивляемости, определенный по методу ЛТП2, соответствующий условиям, при которых отсутствовали трещины в конструкции, принимают в качестве допустимого. При равенстве или превышении показателем сопротивляемости материала значения допустимого показателя обеспечивается стойкость конструкции против трещин в условиях сварки, идентичных условиям сварки образцов.

3.3.7. Влияние параметров технологии сварки на сопротивляемость низколегированных сталей образованию холодных трещин

Холодные трещины относятся к наиболее распространенным и опасным дефектам сварных соединений сталей повышенной и высокой прочности, и в большинстве случаев условия их предупреждения являются определяющими при выборе технологии и режимов сварки конструкций. Склонность к образованию холодных трещин, как правило, повышается с увеличением содержания легирующих элементов в сталях, возрастанием скорости охлаждения при сварке, а также с повышением содержания водорода в наплавленном металле и ростом напряжений в сварном соединении.

Из современных сталей повышенной и высокой прочности наибольшей сопротивляемостью образованию холодных трещин при сварке обладают стали низкоперлитного класса. С повышением содержания углерода в сталях до 0,18—0,20 % их сопротивляемость образованию холодных трещин значительно снижается (рис. 3.35).

Повышение содержания водорода в металле сварного соединения — одна из причин увеличения склонности к образованию холодных трещин при сварке низколегированных сталей повышенной и высокой прочности. Содержание водорода в наплавленном металле зависит от способа сварки (табл. 3.12), влажности атмосферы, насыщения водородом основного металла и других факторов.

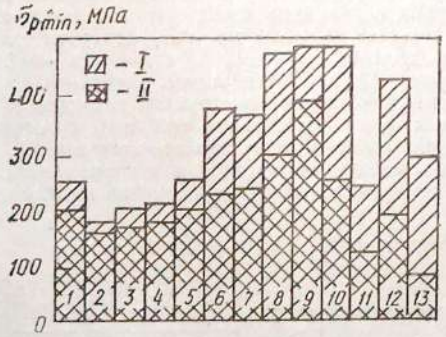


Рис. 3.35. Результаты испытаний сталей:
1 — 17ГС; *2* — 18ХГ2САФ (0,2 % С); *3* — Х60 (0,21 % С); *4* — Х60 (0,19 % С); *5* — Х60 (0,18 % С); *6* — Х60 (0,15 % С); *7* — 18ХГ2САФ (0,13 % С); *8* — 08Г2ФЮ; *9* — Х65 (0,08 % С); *10* — Х65 (0,13 % С); *11* — 17Г2САФ; *12* — 16ГБР (0,14 % С); *13* — 16ГФР (0,16 % С); *I* — электроды с покрытием основного типа; *II* — электроды с покрытием органического типа.

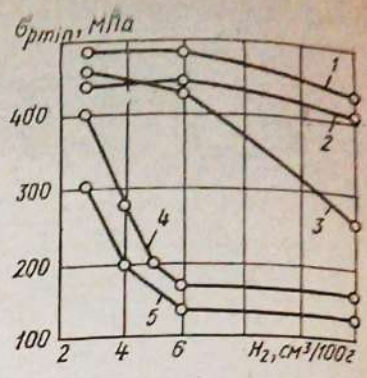


Рис. 3.36. Зависимость показателя $\sigma_{p\,min}$ от содержания водорода при сварке сталей:
1 — 08Г2ФЮ; *2* — Х65 (0,08 % С); *3* — Х65 (0,13 % С); *4* — Х60 (0,19 % С); *5* — 18ХГ2САФ (0,20 % С).

Влияние содержания водорода на показатель $\sigma_{p\,min}$ различно в зависимости от химического состава сталей (рис. 3.36). При сварке низкоперлитных сталей типа 08Г2ФЮ (кривая *1*) и Х65 с содержанием углерода 0,08 % показателя технологической прочности сохраняются независимо от прокалки электродов, и незначительное снижение сопротивляемости трещинам наблюдается лишь при сварке электродами органического типа.

С увеличением содержания углерода до 0,13 % в сталях типа 18ХГ2САФ (кривая *3*) и Х65 высокие значения показателя $\sigma_{p\,min}$ в условиях данного термического цикла сохраняются также при содержании водорода в металле шва до 5—6 см³/100 г. Однако при дальнейшем увеличении содержания водорода (сварка электродами органического типа) наблюдается более резкое понижение сопротивляемости трещинам.

При сварке сталей с содержанием углерода 0,19—0,20 % типа Х60 (кривая *4*) и 18ХГ2САФ (кривая *5*) наиболее резкое снижение показателя $\sigma_{p\,min}$ (в 2—3 раза) наблюдается

Таблица 3.12. Содержание диффузионного водорода в наплавленном металле, определенное по спиртовой пробе при различной технологии сварки

Способ сварки	Сварочный материал	Температура двухчасовой прокалки, °С	Содержание диффузионного водорода, см³/100 г
Ручная дуговая электродами с покрытием:			
органического типа	ВСЦ-4А	70	12
	«Фокс Цел» (Австрия)	70	11,6
	HYCO (Япония)	70	11,8
основного типа	УОНИ 13/55	Без прокалки	6,0
	«Гарант» (Германия)	200	5,0—5,2
		350	2,9—3,1
	АНП-2, АНП-8	350	1,5
Автоматическая под слоем флюса	Св-08ХМ, АН-22	Без прокалки	6,5
		350	4,1
	Св-08ГА, АН-348А	Без прокалки	6,1
		350	4,0
		500	3,1
	Св-08ХМ, АН-47	350	4,1
Газоэлектрическая в среде CO_2	Св-08Г2С	Просушка газа	1,8

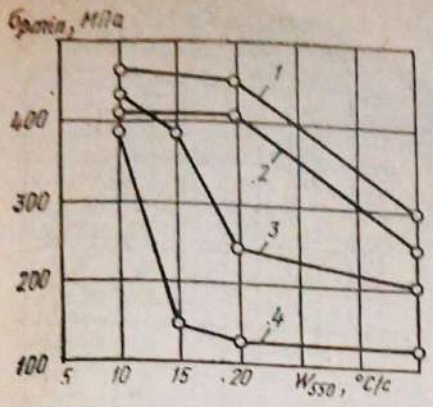


Рис. 3.37. Зависимость показателя $\sigma_{p\ min}$ от w_{550} при сварке сталей:
1 — 08Г2ФЮ; *2* — Х65 (0,08 % С); *3* — Х65 (0,13 % С); *4* — 18ХГ2САФ (0,2 % С).

с увеличением содержания водорода в наплавленном металле от 3 до 6 мл/100 г, в то время как дальнейшее повышение содержания водорода до 10—12 мл/100 г практически не снижает $\sigma_{p\ min}$ указанных сталей.

Зависимость показателя сопротивляемости от количества диффузионного водорода не имеет линейного характера. Отрицательное влияние водорода на стойкость против образования холодных трещин при сварке сталей различного химического состава наиболее существенно проявляется в определенных пределах насыщения водородом сварного соединения. Положение границ диапазонов, в которых наблюдается наибольшее влияние водорода, зависит от химического состава стали и склонности ее к развитию закалочных процессов под действием термического цикла сварки. При сварке сталей, более склонных к закалке, эти границы смещаются в область низких концентраций водорода.

Регулирование термического цикла сварки с целью обеспечения высокой сопротивляемости соединений образованию холодных трещин при сварке является одним из наиболее распространенных технологических приемов. К основным параметрам термического цикла сварки, влияющим на свойства сварных соединений, относятся скорости нагрева $w_н$ и охлаждения $w_о$ при сварке и время $t_н$ пребывания зоны сварного соединения выше температуры A_{c_1}.

Тепловой режим сварки на практике регулируют величиной q/v, а также предварительным и сопутствующим подогревом, воздействуя посредством указанных параметров технологии на основные параметры термического цикла сварки — время $t_н$ и скорость охлаждения при 550 и 300 °С — w_{550} и w_{300}.

Изменение параметров термического цикла околошовной зоны при однопроходной сварке оказывает сложное влияние на сопротивляемость сталей замедленному разрушению [7,8]. При переходе от жестких к мягким режимам сварки скорости нагрева и охлаждения снижаются, а время $t_н$ возрастает. В этих условиях повышению сопротивляемости образованию холодных трещин способствуют: 1) развитие процессов самоотпуска мартенсита, релаксации напряжений, упорядочения строения границ зерен и т. д.; 2) снижение избыточной концентрации вакансий; 3) снижение количества мартенсита (в сталях с невысокой устойчивостью аустенита). Снижение сопротивляемости могут вызвать: увеличение размера зерен; увеличение концентрации углерода в мартенсите вследствие более полного растворения карбидов; повышение концентрации примесей на границах зерен вследствие роста зерен и последующего медленного охлаждения; протекание мартенситного превращения при относительно более низких температурах.

По характеру превращения аустенита в условиях сварки стали различного состава можно разделить на группы [8]: I — с низкой устойчивостью аустенита при температурах перлитного превращения (углеродистые и низколегированные, не содержащие карбидообразующих элементов); II — с низкой устойчивостью аустенита при температурах бейнитного превращения (низкоуглеродистые среднелегированные, содержащие карбидообразующие элементы, а также с повышенным содержанием никеля); III — с высокой устойчивостью аустенита при температурах перлитного и бейнитного превращений (среднеуглеродистые среднелегированные, содержащие карбидообразующие элементы).

При сварке сталей I группы наиболее важным параметром цикла является w_{550}. Регулируя величину w_{550} путем изменения параметров технологии сварки, можно получить перлитно-бейнитную структуру сварных соединений, не склонную к образованию холодных трещин. Влияние времени $t_н$ практически не проявляется, так как процессы гомогенизации и роста зерна завершаются за время, значительно меньшее пределов возможного регулирования данного параметра. Наиболее эффективными средствами повышения сопротивляемости образованию холодных трещин сталей этой группы являются активно влияющие на w_{550} увеличение q/v и предварительный подогрев.

При сварке сталей II группы характерно превращение в области нижнего бейнита, а затем мартенсита. Повышение сопротивляемости образованию трещин достигается снижением w_{550}, обеспечивающим бейнитное превращение при возможно более высоких температурах, с одновременным ограничением $t_н$. Рекомендуется умеренный предварительный подогрев до 80—120 °С, а также сопутствующий нагрев, способствующий самоотпуску мартенсита и более полному удалению диффузионного водорода из сварного соединения.

При сварке сталей III группы, содержащих карбидообразующие элементы в исходной структуре, гомогенизация и рост зерна замедлены, что дает возможность регулирования этих процессов варьированием $t_н$. Для повышения сопротивляемости образованию трещин рекомендуется снижение q/v путем применения концентрированных источников нагрева (электронный луч, лазер и т. п.) или многопроходной сварки. Важным параметром термического цикла этих сталей является также w_{300}. Снижение w_{300} путем сопутствующего нагрева обеспечивает самоотпуск мартенсита на этапе охлаждения и повышает сопротивляемость этой группы сталей образованию трещин.

В качестве критериальных параметров термического цикла используют также время охлаждения сварного соединения в диапазоне температур от 800 до 500 °С $t_{8/5}$ и время охлаждения до температуры 100 °С t_{100}.

Для разработки технологии сварки, обеспечивающей стойкость соединений против образования холодных трещин, наибольший практический интерес представляют количественные зависимости сопротивляемости сталей образованию холодных трещин от скорости охлаждения околошовной зоны и допустимые скорости охлаждения. Учитывая, что изменение термического цикла сварки оказывает влияние и на действие водорода как фактора, способствующего образованию трещин, указанные зависимости относят к определенным вариантам технологии сварки, характеризующимся тем или иным фиксированным содержанием диффузионного водорода.

На рис. 3.37 представлены зависимости $\sigma_{p\ min}$ от w_{550} при сварке сталей различного химического состава электродами с покрытием органического типа марки «Фокс Цел», показывающие, что в определенных условиях при сварке

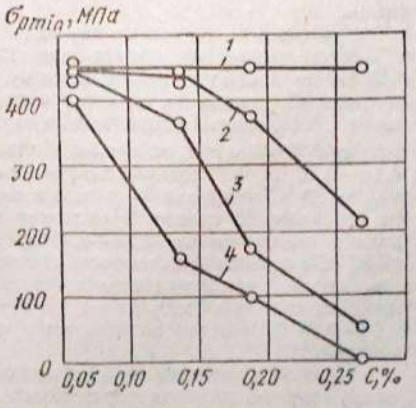


Рис. 3.38. Зависимость показателя $\sigma_{p\ min}$ от содержания углерода в стали при сварке с различной скоростью охлаждения.

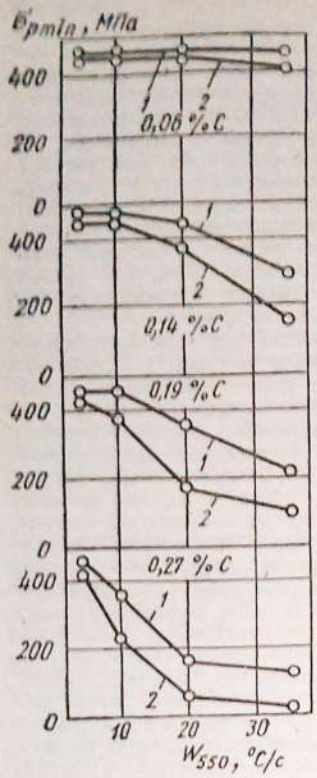
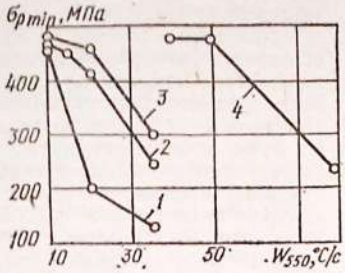


Рис. 3.39. Зависимость показателя $\sigma_{p\,min}$ стали с различным содержанием углерода от скорости охлаждения при сварке электродами с покрытием:

1 — основного типа; *2* — органического типа (прокалка соответственно при 350 и 80 °С).

Рис. 3.40. Зависимость показателя $\sigma_{p\,min}$ сварных соединений стали Х60 (0,18 % С), выполненных различными способами, от скорости охлаждения.



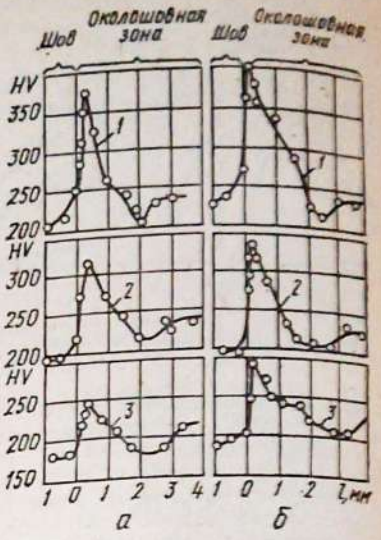


Рис. 3.41. Зависимость твердости сварных соединений термически упрочненных сталей 16ГБР (*а*) и 16ГФР (*б*) от скорости охлаждения при сварке:

1 — 35 °С/с; *2* — 20 °С/с; *3* — 10 °С/с.

высоководородистыми электродами склонность к замедленному разрушению сохраняется даже у низкоперлитных сталей с содержанием углерода 0,08 %. Для каждой стали существуют определенные диапазоны скоростей охлаждения, в которых наблюдается наиболее интенсивное изменение сопротивляемости образованию трещин. При сварке низкоперлитных сталей типа 08Г2ФЮ высокая сопротивляемость образованию трещин сохраняется в диапазоне скоростей охлаждения $w_{550} \approx 20...25$ °С/с (кривые *1* и *2*). При сварке сталей 18ХГ2САФ с содержанием углерода 0,20 % диапазон значений w_{550}, в котором происходит наиболее интенсивное повышение $\sigma_{p\,min}$, смещается в область $w_{550} \approx 15...10$ °С/с (кривая *4*). Промежуточное положение занимает сталь типа Х65 с содержанием углерода 0,13 % (кривая *3*).

Влияние содержания углерода в низколегированных сталях на показатель $\sigma_{p\,min}$ в условиях сварки с различными скоростями охлаждения при использовании опытных плавок сталей с содержанием углерода 0,06; 0,14; 0,19 и 0,27 % показано на рис. 3.38. Содержание марганца, кремния и других элементов в данных плавках находилось в пределах, характерных для трубных сталей карбонитридного упрочнения.

При малых значениях скоростей охлаждения ($w_{550} \leqslant 5$ °С/с) увеличение содержания углерода в сталях до 0,27 % не приводит к замедленному разрушению сварных соединений (кривая *1*). При скоростях охлаждения $w_{550} \approx 10$ °С/с (кривая *2*) существенное снижение $\sigma_{p\,min}$ происходит при повышении содержания углерода в сталях свыше 0,18—0,20 %. С повышением скорости охлаждения до $w_{550} \approx 20$ °С/с (кривая *3*) резкое снижение сопротивляемости образованию трещин происходит при содержании углерода в сталях свыше 0,13—0,15 %. При значении $w_{550} \geqslant 35$ °С/с (кривая *4*) склонность к замедленному разрушению при сварке высоководородистыми электродами начинает проявляться при содержании углерода в сталях свыше 0,06—0,08 % и резко повышается с его дальнейшим увеличением.

Диапазон значений w_{550}, в котором обеспечивается высокая сопротивляемость образованию трещин тех или иных сталей, зависит от содержания водорода в сварном соединении (рис. 3.39).

С повышением содержания углерода в сталях диапазоны скоростей охлаждения, в которых наблюдается наибольший положительный эффект от перехода к сварке низководородистыми электродами, смещаются в область более низких значений w_{550}.

Результаты сравнительной оценки зависимостей $\sigma_{p\,min}$ от w_{550} различных вариантов сварки, различающихся содержанием диффузионного водорода в наплавленном металле (см. табл. 3.12), приведены на рис. 3.40. При сварке в среде CO_2 (кривая *4*) высокая сопротивляемость образованию трещин сохраняется в более широком диапазоне значений w_{550}, что объясняется меньшим в сравнении с другими вариантами сварки содержанием водорода. Это может быть связано также с различием в характере высокотемпературных процессов, влияющих на развитие химической и физической неоднородности вблизи границы сплавления.

С повышением содержания диффузионного водорода, в особенности при сварке электродами органического типа (кривая *1*), диапазон значений w_{550}, в котором сопротивляемость образованию трещин возрастает, смещается в область меньших значений w_{550}. Варианты ручной электродуговой сварки электродами с покрытием фтористокальциевого типа (кривая *3*) и автоматической сварки под флюсом (кривая *2*), характеризующиеся практически одинаковым содержанием водорода, обеспечивают повышение сопротивляемости трещинам в общем интервале w_{550}.

При сварке термически упрочненных сталей, как правило, стремятся подавить нежелательное развитие процессов разупрочнения околошовной зоны, используя более жесткие режимы, принудительное охлаждение зоны терми-

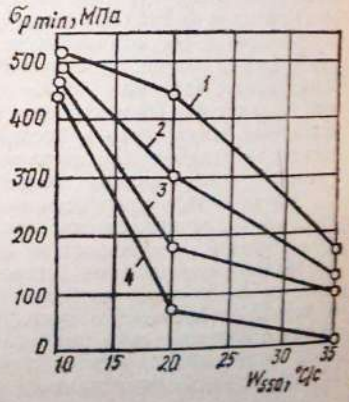


Рис. 3.42. Зависимость показателя $\sigma_{p\,min}$ термически упрочненных сталей 16ГБР (*1*, *3*) и 16ГФР (*2*, *4*) от w_{550} при сварке электродами УОНИ 13/55 (*1*, *2*) и «Фокс Цел» (*3*, *4*).

ческого влияния и т. п., что может способствовать образованию холодных трещин. С повышением $w_{\delta 50}$ при сварке термически упрочненных сталей типа 16ГБР и 16ГФР существенно сужается зона разупрочнения, однако при этом значительно повышается твердость околошовной зоны вблизи границы сплавления (рис. 3.41) и резко снижается $\sigma_{p\,min}$, в особенности при сварке высоководородистыми электродами (рис. 3.42). Технология сварки термически упрочненных сталей должна разрабатываться с целью оптимизации параметров термического цикла сварки с учетом его влияния как на разупрочнение, так и на сопротивляемость соединений образованию холодных трещин. В качестве одного из основных способов повышения сопротивляемости образованию трещин при ограничении возможностей регулирования $\sigma_{p\,min}$ изменением термического цикла сварки рекомендуется снижение содержания водорода в сварном соединении. Для указанных сталей эффективно применение сварки в среде CO_2.

3.3.8. Испытания сварных соединений на стойкость против коррозии

Виды коррозионных разрушений сварных соединений

Причиной различных видов коррозии являются химические и электрохимические процессы, протекающие между металлом изделия и контактирующей с ним коррозионной средой. Так как сварное соединение отличается химической, структурной, физической и механической неоднородностью, часто возникает необходимость оценивать свариваемость материалов и по коррозионной стойкости соединений в условиях эксплуатации.

Особенности коррозионных разрушений сварных конструкций определяются свойствами металла и коррозионной среды, характером взаимодействия металла со средой (температура, время, давление и др.), напряженным состоянием конструкции.

Для сварной конструкции характерны: структурно-химическая макронеоднородность различных зон сварных соединений и микронеоднородность в этих зонах; неоднородность напряженного состояния и распределения пластической деформации, вызванная действием остаточных напряжений и внешней нагрузки; геометрическая неоднородность вследствие конструктивных и технологических концентраторов.

Эти основные виды неоднородности вызывают механическую, физическую и электрохимическую макро- и микронеоднородность сварных соединений, интенсифицирующую коррозионные процессы, определяют особенности коррозионных разрушений.

По механизму процесса различают химическую и электрохимическую коррозию. Химическая коррозия — это процесс химического взаимодействия металла с агрессивными компонентами среды. Электрохимическая коррозия представляет собой самопроизвольное разрушение металла в результате электрохимических реакций и процессов: анодного перехода ионов металла в раствор, катодного восстановления окислительных компонентов среды, коррозионного тока (перетекания электронов в металле и перемещения катионов и анионов в растворе).

По виду разрушения различают коррозию общую (равномерную, неравномерную, избирательную); местную (локальную на поверхности, межкристаллитную); коррозионное растрескивание под действием статических и циклических нагрузок.

Для сварных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей в таких средах, как атмосфера, вода, почва, характерна общая электрохимическая коррозия. При ее протекании сварное соединение является многоэлектродной короткозамкнутой электрохимической системой. Характерные электроды системы: шов, зона термического влияния, основной металл.

Таблица 3.13. **Электродные потенциалы зон сварных соединений [13]**

Материал	Способ сварки	φ, мВ		
		Основной металл	Сварной шов	Зона термического влияния
Стали низкоуглеродистые низколегированные:				
09Г2С	Ручная дуговая, электрод Э55	—460	—540	—480
17Г2С1	То же	—500	—540	—550
17Г2СФ	»	—455	—540	—485
Коррозионностойкие стали:				
12Х18Н10Т	Аргонодуговая без присадки	+137	+108	+75
10Х14АГ15	Ручная дуговая, электроды ОЗЛ8	—170	—165	—250
Алюминиевые сплавы:				
АМг6	Аргонодуговая без присадки	—492	—514	—567
АМг62	То же	—680	—700	—880

Электродные потенциалы φ зон сварного соединения в 3 %-ном растворе NaCl представлены в табл. 3.13.

Показатель макронеоднородности — разность начальных потенциалов $\Delta\varphi$ соответствующих зон сварного соединения, показатель микронеоднородности в зоне соединения — разность локальных потенциалов $\Delta\varphi_i = \varphi_{i\max} - \varphi_{i\min}$ в пределах зоны.

В случае $\Delta\varphi > 0$, $\Delta\varphi_i \to 0$ коррозия протекает в основном по макроэлектрохимическому механизму. Если $\Delta\varphi \to 0$, $\Delta\varphi_i > 0$, коррозия происходит по микроэлектрохимическому механизму. При $\Delta\varphi > 0$, $\Delta\varphi_i > 0$ реализуется смешанный механизм коррозии.

Для сварных конструкций из высоколегированных сталей и цветных сплавов характерна местная избирательная коррозия, одним из наиболее опасных видов которой является межкристаллитная коррозия.

Межкристаллитная коррозия вызывает разрушение основного металла и сварных соединений по границам зерен (кристаллов). Она обусловлена электрохимической неоднородностью металла вследствие выпадения по границам зерен мелкодисперсных избыточных фаз (карбидов, нитридов, сульфидов, интерметаллидов и др.). Коррозия этого вида развивается в газовых средах и в растворах электролитов. Результатом развития межкристаллитной коррозии в локальном слое зоны сплавления является ножевая коррозия.

Коррозионное растрескивание представляет собой сложный процесс разрушения металлов в условиях одновременного воздействия электрохимической коррозии и статических растягивающих напряжений. При циклических нагрузках развивается коррозионная усталость.

Коррозионное разрушение под напряжением включает два этапа: зарождение на поверхности металла локальных коррозионно-механических трещин и развитие трещины до критических размеров с последующим лавинообразным разрушением.

Для условий коррозионного растрескивания металлов в различных средах существуют пороговые напряжения $\sigma_{пор}$, ниже уровня которых растрескивание не происходит (совсем или на выбранной базе испытаний).

Таблица 3.14. Значения отношения $\sigma_{пор}/\sigma_т$ в характерных средах [13]

Материал	Среда	T, К	$\sigma_{пор}/\sigma_т$	
			Основной металл	Сварное соединение
Углеродистые и низколегированные стали	Щелочные растворы	$T > 330$ К	0,9—1	0,9—1
	Растворы нитратов	Кипение	0,5	0,5
	Сероводородные среды	Нормальная	0,5—1	0,3—0,5
Коррозионно-стойкие стали типа 12Х18Н10Т:				
отожженные	Хлориды	Кипение	0,5—0,6	0,4—0,5
деформированные	»	»	0,2—0,5	0,2—0,4
Алюминиевые сплавы	3 %-ный раствор NaCl	Нормальная	0,6	0,5

В табл. 3.14 представлены изменяющиеся в пределах 0,2—1 значения $\sigma_{пор}/\sigma_т$.

Видно, что склонность сварных соединений к растрескиванию выше, чем у основного металла. Это объясняется влиянием на свойства металла термодеформационного цикла сварки и действием остаточных напряжений, способных вызвать интенсивное растрескивание в коррозионных средах без внешней нагрузки.

Стойкость сварных соединений против коррозионного растрескивания можно повысить путем снятия (уменьшения, перераспределения) остаточных напряжений, устранения концентраторов напряжений, уменьшения неравномерности распределения анодных участков.

Методы испытаний на стойкость против коррозии

Методы коррозионных испытаний сварных соединений на общую коррозию и под напряжениями не стандартизованы. Испытания на склонность к межкристаллитной коррозии аустенитных и аустенитно-ферритных сталей выполняются в соответствии с ГОСТ 6032—75.

Целью коррозионных испытаний могут быть выбор материала и оптимальной технологии сварки изделия, определение причин потери конструкцией работоспособности, установление механизма разрушения сварного соединения в коррозионной среде.

В зависимости от типа объекта различают испытания образцов (из основного металла и сварных); моделей конструктивных элементов, узлов и макетов; натурные испытания изделий.

По виду напряженного состояния различают испытания объектов с собственными (остаточными) напряжениями; с напряжениями от внешней нагрузки; с суммарным напряженным состоянием; при наличии концентраторов напряжений и без концентраторов.

Возможно проведение испытаний в различных испытательных средах: в производственных условиях и в условиях ускоренных сравнительных испытаний.

В табл. 3.15 приведены составы сред (водные растворы) для ускоренных испытаний сварных соединений.

В зависимости от вида коррозии используют различные методы оценки и показатели сопротивляемости сварных соединений коррозионному разрушению (табл. 3.16).

Для оценки стойкости сварных соединений против общей коррозии применяют образцы из основного металла; сварные, включающие шов и ЗТВ; сварные, включающие шов, ЗТВ и основной металл.

Размеры образцов, как правило, 25 × 50 и 25 × 70 мм, площадь поперечного сечения $F_{обр} = (5...10)\ F_{ЗТВ}$.

Для определения стойкости сварных соединений против коррозии под напряжением используют следующие виды испытаний: испытания сварных образцов при одноосной внешней нагрузке (растяжение или изгиб) при постоянном напряжении, постоянном деформировании, непрерывном деформировании. Предпочтительна схема испытания при постоянной нагрузке. Проводятся: а) сравнительная оценка влияния состава материала, технологических и других факторов; б) испытания натурных сварных узлов и сварных образцов, имитирующих реальные соединения; эффективно использование дисковых образцов с круговым швом, позволяющим при изменении радиуса шва получать различные виды напряженного состояния (от жесткого двухосного до одноосного); рекомендуемые размеры образца: диаметр

Таблица 3.15. Составы сред для ускоренных испытаний [13]

Материал	Состав среды	Режим испытания
Углеродистые и низколегированные стали	3...6 % NH_4NO_3 + 50...57 % $Ca(NO_3)_2$; 35 % NH_4NO_3 + 45 % $Ca(NO_3)_2$; 25—50 % NaOH; 50 % NH_4NO_3; 42 % $MgCl_2$	Погружение при кипячении
	3 % NaCl; 3 % NaCl + 1 % $FeCl_3$; увлажненный H_2S	Переменное погружение, распыление, погружение
Коррозионно-стойкие хромоникелевые стали	42 % $MgCl_2$; 3...6 % NH_4NO_3 + 50...57 % $Ca(NO_3)_2$; 10 % HNO_3 + + 3 % HF	Погружение при кипячении Погружение при 340—350 К
	3 % NaCl; морская вода	Погружение, переменное погружение, распыление в камере
Алюминиевые сплавы	3 % NaCl; 3 % NaCl + 0,1 H_2O_2; 3 % NaCl + 1 % HCl; 3 % NaCl + + 0,1 % CH_3COOH + 0,1 % CH_3COONa; морская вода	То же

Таблица 3.16. Методы оценки и показатели коррозии [13]

Тип коррозионного разрушения	Метод оценки коррозии	Показатель коррозии
Общая коррозия	Гравиметрический	Изменение массы
	Профилографический	Глубина коррозии
	Механический (при растяжении и изгибе)	Изменение механических свойств
	Электрохимический	Электродный потенциал
Межкристаллитная и избирательная местная коррозия	Механический (при растяжении и изгибе)	Изменение механических свойств
	Металлографический и профилографический	Глубина коррозионного поражения
Язвенная и точечная местная коррозия	То же	Глубина поражения, время до поражения, число коррозионных центров
Статическая коррозионная усталость (коррозионное растрескивание)	Механический (при статической нагрузке)	Число образцов с трещинами, время и скорость растрескивания, пороговое (критическое) напряжение, коэффициент интенсивности напряжений
Повторно-статическая и циклическая коррозионная усталость	Механический (при переменной нагрузке)	Число циклов до появления трещины и до разрушения, условный предел коррозионно-циклической прочности

100—150 мм, толщина 2—5 мм, диаметр осесимметричного шва 20—40 мм; проводится оценка влияния остаточных сварочных напряжений; в) испытания образцов, узлов, макетов, конструктивно и технологически подобных реальной конструкции, при статическом, повторно-статическом и циклическом нагружениях; оценивают влияние реального напряженного состояния, определяемого действием остаточных напряжений и внешней нагрузки.

Испытания сварных соединений на межкристаллитную коррозию регламентируются ГОСТ 6032—75. Для испытаний изготовляются образцы с перекрещивающимися односторонними или двухсторонними швами, из которых вырезаются темплеты длиной 80 мм, толщиной 5 мм. Контрольная поверхность зачищается. Темплеты кипятят в травителях, промывают, просушивают и изгибают в зоне сплавления под углом 90°. Браковочным признаком служит наличие трещин.

3.3.9. Критерии выбора технологии и режимов сварки углеродистых и низколегированных сталей

Надежная эксплуатация сварных соединений ответственных конструкций может быть гарантирована только при обеспечении комплекса требований: технологической прочности (отсутствие горячих и холодных трещин) и эксплуатационных свойств (прочности, пластичности, долговечности, коррозионной стойкости и др.). Поэтому выбор технологии и режимов сварки производят по ряду критериев, характер и число которых зависят от физико-химических свойств свариваемых сталей и условий эксплуатации конструкции.

Углеродистые и низколегированные строительные стали с учетом особенностей их сварки могут быть разделены на три основные группы.

I. Низкоуглеродистые и простейшие низколегированные стали в состоянии после прокатки, не склонные к закалке при сварке, относятся к хорошо свариваемым материалам. Технология и режимы сварки таких сталей выбираются с учетом степени огрубления структуры околошовной зоны и шва. Режимы сварки устанавливают в оптимальном диапазоне значений погонной энергии или скорости охлаждения w_o, гарантирующих ударную вязкость и пластичность сварных соединений. Сварочные материалы должны выбираться с учетом обеспечения стойкости швов против образования горячих трещин.

II. Углеродистые и низколегированные стали, склонные к закалке, требуют определенных ограничений при сварке, связанных с обеспечением стойкости сварных соединений против образования холодных трещин. При выборе технологии и режимов сварки таких сталей кроме обеспечения требований, указанных для I группы сталей, требуется проверка технологических вариантов сварки по критериям сопротивляемости образованию холодных трещин.

III. Низколегированные стали в состоянии после термической или термомеханической обработки, склонные к закалке и разупрочнению в околошовной зоне при сварке. При выборе технологии и режимов сварки этих сталей наряду с особенностями сварки сталей II группы следует учитывать влияние степени разупрочнения в околошовной зоне на работоспособность конструкции.

В зависимости от условий эксплуатации конструкции может потребоваться определение и других характеристик сварных соединений: долговечности, хладостойкости, коррозионной стойкости и др.

Критериальные значения показателей технологической прочности устанавливаются на основе специальных исследований конкретных конструкций с применением рассмотренных методов оценки сопротивляемости сварных соединений образованию горячих и холодных трещин.

Применительно к конструкциям, имеющим однотипные геометрические формы и размеры, методики определения критериев выбора технологического варианта сварки, обеспечивающего стойкость сварных соединений против образования горячих и холодных трещин, могут быть рассмотрены на примерах оценки запаса технологической прочности кольцевых стыков трубопроводов [9, 10].

Склонность к образованию горячих трещин при сварке конструкций определяется сопоставлением реального темпа деформации формоизменения сварного соединения, зависящего от типа сварного соединения, размеров конструкции и режима сварки, с деформационной способностью затвердевающего металла в ТИХ, определяемой критическим темпом машинной деформации $\alpha_{м.кр}$ (либо показателем A при неизменном термическом цикле сварки). Если деформационная способность кристаллизующегося металла оказывается достаточно высокой для восприятия определенного типа деформации сварного соединения в ТИХ без образования горячих трещин, то имеет место запас технологической прочности. Для конкретного типа сварного соединения темп деформации формоизменения может быть косвенно

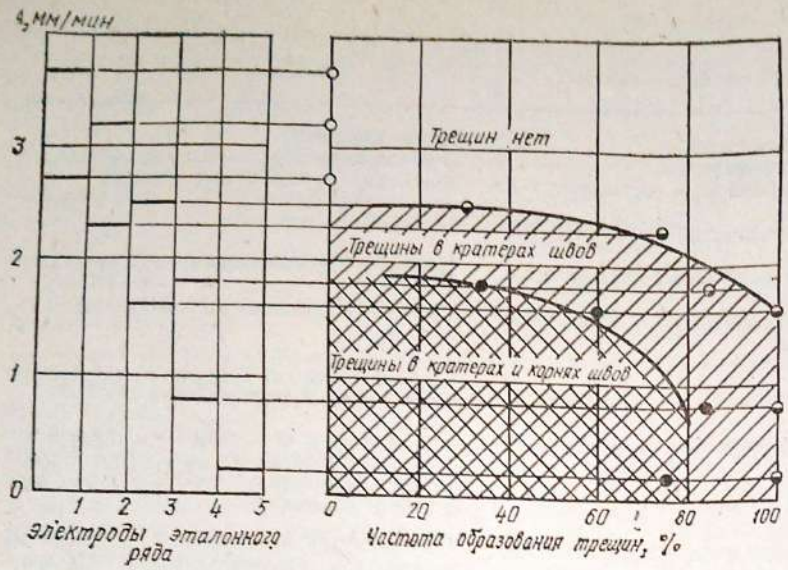


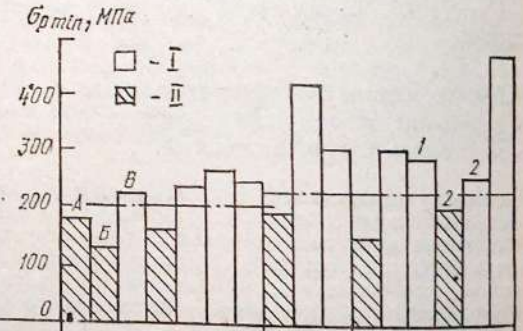
Рис. 3.43. Диаграмма оценки запаса технологической прочности корневых швов стыковых соединений трубопроводов размерами 1220 × × 12,5 мм.

определен методом эталонного ряда. Сущность метода сводится к следующему. Последовательно сваривая электродами с убывающими значениями показателя технологической прочности копии исследуемого узла, находят электрод с известным (определенным на машине) показателем $\alpha_{м.кр}$ (или A), при сварке которым начинают образовываться горячие трещины. Показатель технологической прочности данного электрода $A_{кр}$ косвенно определяет темп деформации формоизменения в ТИХ при сварке данного узла в исследованном режиме, который можно сопоставить с результатами лабораторных испытаний электродов в идентичном режиме сварки. При этом разность $A - A_{кр}$, где A — показатель исследуемого электрода, количественно определит запас технологической прочности при сварке данного изделия. Для исключения вероятности образования горячих трещин при сварке таких конструкций необходимо, чтобы показатель A был больше $A_{кр}$.

На рис. 3.43 представлена диаграмма для определения запаса технологической прочности корневых швов трубопроводов размерами 1220 × 12,5 мм при сварке в режиме $I_{св} = 180$ А, $U_д = 25...26$ В; $v_{св} = 8...9$ м/ч. Показатели технологической прочности $A = 2,5$ мм/мин и $A = 1,8$ мм/мин косвенно характеризуют критический темп деформации формоизменения сварного соединения, при котором начинают образовываться горячие трещины в кратерах и в корне шва соответственно.

Использование методов количественной оценки сопротивляемости сталей образованию холодных трещин при сварке позволяет разработать количественный критерий выбора технологического варианта сварки, обеспечивающего стойкость сварных соединений против образования холодных трещин.

Поскольку метод испытаний постоянно действующим нагружением сварного образца (ЛТП2) предусматривает моделирование напряжений I рода в сварном соединении внешне приложенной нагрузкой, возможно сопоставление напряжений от этой нагрузки с напряжениями I рода в конструкции при условии идентичности технологии сварки конструкции и образца. Точное расчетное определение количественной взаимосвязи между напряжениями I рода в конструкции и $\sigma_{p\,min}$ в образце затруднено. Однако можно с достаточной для практики точностью установить допустимые значения $\sigma_{p\,min}$ путем сопоставления результатов лабораторных испытаний со склонностью сварных соединений



Размеры трубы, мм	1220×12,5					1420×17,5	1420×20		
Марка стали	18ХГ2САФ	Х60	18ХГ2САФ-А	17ГГС	18ХГ2САФ-Б	Х60	Х60		
Марка электрода	ВСЦ4А			„Гарант"		„Гарант"	ВСЦ4А	„Гарант"	
Температура кромок труб перед сваркой, °С	0-5		160-180	5-15	-20-(-25)	120-140	70-80	140-160	230-250	10-15	70-80	180-200

Рис. 3.44. Взаимосвязь показателя $\sigma_{p\,min}$ технологического варианта сварки корневых швов и сопротивляемости соединений образованию хлоридных трещин при сварке стыков труб:

I — электроды прокалены при 350 °С; *2* — электроды без прокалки; *А, Б, В* — содержание углерода в стали соответственно 0,18, 0,20 и 0,13 %; *I* — трещин нет; *II* — трещины есть.

конкретных конструкций к образованию холодных трещин при сварке [10]. Значения критических минимальных разрушающих напряжений $\sigma_{p\ min\ кр}$, при которых не образуются холодные трещины в конструкции, принимаются за критерий выбора технологического варианта сварки. При определении $\sigma_{p\ min\ кр}$ обязательным условием является проведение испытаний образцов и конструкций из одной и той же стали в идентичных условиях в отношении термического цикла сварки, содержания диффузионного водорода в наплавленном металле и площади сечения сварного шва.

На рис. 3.44 представлены результаты исследований взаимосвязи показателей различных технологических вариантов сварки корневых швов и сопротивляемости соединений стыков труб диаметром 1220 и 1420 мм соответственно образованию холодных трещин. Значения $\sigma_{p\ min\ кр}$ для ручной дуговой сварки корневых швов стыков труб диаметром 1220 мм с толщиной стенки 12,5 мм и труб диаметром 1420 мм с толщинами стенки 17,5—20 мм составляют соответственно 200 и 225 МПа. Эти данные получены в условиях, когда сварное соединение находится под воздействием собственных сварочных напряжений и воздействие внешней нагрузки исключено. В случаях, когда на сварное соединение действует внешняя нагрузка (от веса конструкции, растягивающих или изгибающих усилий), необходимо корректировать значения $\sigma_{p\ min\ кр}$ с учетом напряжений от этой нагрузки.

Разработанный критерий позволяет в заданных условиях сварки (заданы термический цикл сварки, сварочный материал, дающий определенное количество водорода, и т. д.) оценить возможность сварки конструкции из той или иной стали без образования холодных трещин (например, по данным, представленным на рис. 3.35); определять параметры технологии сварки конструкции из новых сталей с применением различной технологии (например, по зависимостям, представленным на рис. 3.36—3.40).

При этом для разработки технологии сварки сведения о сопротивляемости стали образованию холодных трещин могут быть получены в виде, представленном на рис. 3.40, где учтено влияние способа сварки, термического цикла и содержания водорода в наплавленном металле на показатель $\sigma_{p\ min}$. По результатам таких испытаний определяется допустимая скорость охлаждения w_{550}, по значениям которой, используя расчетный аппарат теории тепловых процессов, находят значения погонной энергии сварки, а также необходимость и температуру предварительного подогрева для металла той или иной толщины.

ГЛАВА 4

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ, НАПЛАВКИ И РЕЗКИ

4.1. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

4.1.1. Назначение, конструктивные особенности и классификация источников питания

Для осуществления дугового разряда в сварочную цепь подается электрическая энергия от электротехнического устройства — источника питания. Конструкция источника и его технические характеристики зависят от способа сварки и технологических особенностей процесса. Источники питания для сварки должны удовлетворять следующим требованиям: технологическим, обеспечивающим надежное зажигание дуги, ее устойчивое горение в рабочем диапазоне режимов, качественный перенос электродного металла и формирование сварного шва, управление процессом сварки, и технико-экономическим, включающим КПД, коэффициент мощности (cos φ), габаритные размеры, массу, надежность, эргономические и другие показатели. Основными электротехническими характеристиками источников питания являются статическая и динамическая.

Электрические свойства источника при работе в статическом режиме определяются внешней характеристикой, которая имеет и другое название — вольт-амперной характеристики. Под внешней статической характеристикой подразумевается зависимость между напряжением на его зажимах и током, протекающим через сварочную цепь при нагрузке в установившемся состоянии. Внешняя статическая характеристика источника питания может быть крутопадающей *1*, пологопадающей *2*, жесткой *3* и возрастающей *4* (рис. 4.1, *а*). В современных источниках питания внешняя статическая характеристика имеет сложную форму (рис. 4.1, *б*), состоящую из двух, трех и более участков.

Важнейшими параметрами источника питания и его внешней статической характеристики являются напряжение холостого хода $U_{х.х}$, ток короткого замыкания $I_{к.з}$, рабочие напряжение $U_р$ и ток $I_р$ (рис. 4.1, *в*).

Возбуждение дуги происходит при касании электродом изделия. Оно происходит тем легче, чем выше напряжение холостого хода источника. Для надежного возбуждения напряжение холостого хода должно быть не ниже 40 В.

Устойчивое горение дуги обеспечивается правильным выбором внешней статической характеристики источника питания (см. 4.1, *в*). В квазистатическом состоянии устойчивость процесса сварки обеспечивается при выполнении условия

$$K_у = \frac{dU_д}{dI_д} - \frac{dU_и}{dI_и} > 0.$$

Это неравенство называется условием устойчивого горения сварочной дуги без корректирующих обратных связей.

Как видно из рис. 4.1, *в*, равенство токов и напряжений дуги и источника питания имеет место в точках A и B. Из них только точка A удовлетворяет условию устойчивого горения дуги, когда $K_у > 0$. Если под действием внешних возмущений ток уменьшится, то напряжение источника питания станет больше напряжения дуги, что вызовет увеличение тока и возвращение в точку A. Если ток увеличится, то напряжение источника станет меньше напряжения дуги, ток уменьшится и режим горения восстановится. Таким образом, осуществляется устойчивое горение дуги и поддержание постоянства режима сварки с применением источников питания без корректирующих обратных связей.

При изменениях, происходящих в дуге, значения тока и напряжения источника питания устанавливаются не мгновенно, а в течение некоторого времени после воздействия. Способность источника быстро реагировать на изменения, происходящие в дуге, определяет его динамические свойства. Высокие динамические характеристики источника обеспечивают перенос электродного металла в сварочную ванну без разбрызгивания и ухудшения процесса формирования шва.

Под динамической характеристикой источника питания понимают время, необходимое для восстановления напряжения от нулевого значения в момент короткого замыкания до рабочего. У источников с хорошими динамическими свойствами это время не превышает 0,95 с.

О динамических свойствах источника питания можно судить по характеру и скорости протекания переходных процессов в нем, что может быть определено при скачкообразном изменении сварочного тока, при ступенчатых изменениях проводимости дуги, которые вызываются резкими переходами из одного установившегося режима в другой, например переходом от холостого хода к короткому замыканию при возбуждении дуги. В процессе сварки происходят изменения тока и напряжения за счет переноса капель расплавленного металла, перемещения активных пятен на поверхностях электрода и изделия, возникновения в столбе дуги потоков ионизированного газа, колебаний напряжения сети, неравномерности скорости подачи сварочной проволоки и т. д.

Динамические характеристики сварочных трансформаторов определяются в основном магнитными свойствами сердечника и качеством изготовления вторичных катушек.

Динамические качества сварочных генераторов постоянного тока определяются взаимоиндуктивностью обмоток возбуждения и скоростью самовозбуждения.

Хорошими динамическими свойствами обладают сварочные выпрямители с электронной схемой управления или с промежуточным элементом повышенной частоты (инверторного типа).

Электротехническая установка, в том числе и источник питания для дуговой сварки, рассчитывается на определенную нагрузку, т. е. на определенный режим работы, а также на заданное напряжение, которое определяет класс применяемых изоляционных материалов.

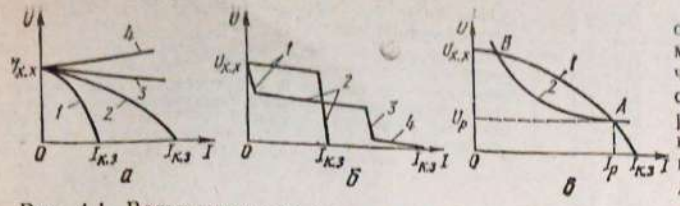


Рис. 4.1. Вольт-амперные характеристики:
а — источников питания; *б* — источника питания с различным наклоном их участков (*1, 2, 3, 4*); *в* — источника питания (*1*) и дуги (*2*).

Ток, напряжение, мощность и режим работы источника питания, на которые он рассчитан, называются номинальными. Номинальные значения ($I_н$, $U_н$, $P_н$) и режим работы записываются на щитке источника и приводятся в паспорте, а также в описании и инструкции по эксплуатации.

Нагрузка сварочного источника питания, как правило, является переменной. Весь процесс сварки обычно состоит из ряда повторяющихся циклов длительностью $t_ц$, в которых рабочий период $t_р$ чередуется с паузами $t_п$, в течение которых происходит смена электрода, подготовка к сварке следующего изделия и т. д.

Согласно стандартам на сварочные источники питания различают три типовых режима работы: 1) продолжительный — режим работы при неизменной нагрузке; 2) перемежающийся — режим, при котором кратковременные рабочие периоды чередуются с периодами работы источника на холостом ходу. Режим характеризуется относительной продолжительностью нагрузки $ПН = \frac{t_р}{t_ц} \cdot 100\ \%$; 3) повторно-кратковременный режим, при котором кратковременные рабочие периоды чередуются с периодами отключения источника от электросети. Режим характеризуется относительной продолжительностью включения $ПВ = \frac{t_р}{t_ц} \cdot 100\ \%$.

Длительность цикла работы при перемежающемся и повторно-кратковременном режимах составляет 5 мин для источников ручной дуговой сварки и 10 мин для источников механизированной сварки и универсальных.

Номинальный сварочный ток всегда связан с режимом работы, на который рассчитан данный источник питания. Например, $I_{д_н} = 315$ А, $ПВ = 60\ \%$.

Длительно допустимый по нагреву сварочный ток источника $I_{д_{дл}}$ связан с номинальным сварочным током и режимом работы следующим соотношением: $I_{д_{дл}} = I_{д_н}\sqrt{ПН}$ или $I_{д_{дл}} = I_{д_н}\sqrt{ПВ}$.

Все источники питания для дуговой и электрошлаковой сварки можно классифицировать по следующим основным признакам: 1) по роду тока: переменного тока (трансформаторы, генераторы повышенной частоты); постоянного тока (генераторы, выпрямители); 2) по конструктивным особенностям: а) сварочные трансформаторы с нормальным мягким рассеянием — с отдельным дросселем (реактивной катушкой), с реактивной катушкой на общем сердечнике; б) сварочные трансформаторы с увеличенным магнитным рассеянием — с подвижным магнитным шунтом, с подвижными катушками, с неподвижным магнитным шунтом и дополнительной обмоткой управления; в) специальные трансформаторы — для электрошлаковой сварки (с жесткой внешней статической характеристикой), трехфазные; г) сварочные генераторы — с независимой намагничивающей и последовательной размагничивающей обмотками, с параллельной намагничивающей и последовательной размагничивающей обмотками, с расщепленными полюсами, бесколлекторные; д) сварочные выпрямители: по схеме выпрямителя — трехфазная, шестифазная; по типу полупроводниковых вентилей — селеновые, кремниевые; по управляемости вентилей — управляемые, неуправляемые; по способу управления режимом — электрические и электронные; по характеру преобразования энергии — обычные, с промежуточным элементом повышенной частоты; 3) по виду внешних статических характеристик: с падающими характеристиками, с жесткими характеристиками, с универсальными характеристиками; 4) по числу фаз питания: однофазные, трехфазные; 5) по числу одновременно подключаемых сварочных постов: однопостовые, многопостовые; 6) по виду привода для генераторов: сварочные преобразователи (генераторы, соединенные с электродвигателями), сварочные агрегаты (генераторы, соединенные с двигателями внутреннего сгорания); 7) по способу установки: стационарные, передвижные.

Источники питания, предназначенные для стран СНГ и для поставок на экспорт в страны с умеренным климатом, изготовляются в климатическом исполнении с категориями размещения 2, 3, 4 по ГОСТ 15150—69.

Источники питания, предназначенные на экспорт в страны с тропическим климатом, изготовляются в климатическом исполнении Т с категориями размещения 2, 3 и 04 по ГОСТ 15150—69.

Конструкции всех сварочных источников питания должны удовлетворять требованиям безопасности по ГОСТ 12.2.007.0—75, ГОСТ 12.2.007.8—75 и ГОСТ 12.1.003—83.

В настоящее время принята единая структура обозначения сварочного оборудования (рис. 4.2). В этой структуре на месте буквы А проставляется первая буква названия изделия (А — агрегат, В — выпрямитель, П — преобразователь, Т — трансформатор); на месте буквы Б проставляется буква, обозначающая вид сварки (Д — дуговая, П — плазменная); на месте буквы В проставляется буква (буквы), обозначающая способ сварки (Д — ручная штучным электродом, ДО — открытой дугой, ДФ — под флюсом, ДГ — в защитном газе). Так как буква Д повторяется под индексами Б и В, то в названиях она ставится один раз (только для дуговой сварки). Дополнительно в буквенной части обозначения могут появляться буквы М — для многопостовых источников (однопостовые дополнительного обозначения не имеют), И — для импульсной сварки, а также буквы Б или Д, обозначающие соответственно вид двигателя: бензиновый или дизельный — для агрегатов с приводным двигателем внутреннего сгорания.

Цифровая часть обозначения должна состоять из одно-, трех- или четырехзначного числа, первые две (или одна) цифры которого указывают значение сварочного тока источника, округленного в сотнях ампер; две последующие цифры — регистрационный номер изделия; следующие буква и цифра — климатическое использование и категорию размещения. Так, наименование изделия ВДУМ-4×401У3 обозначает выпрямитель для дуговой сварки, универсальный, многопостовой, на четыре поста, на ток 400 А, регистрационный номер 01, климатическое исполнение У, категория размещения 3.

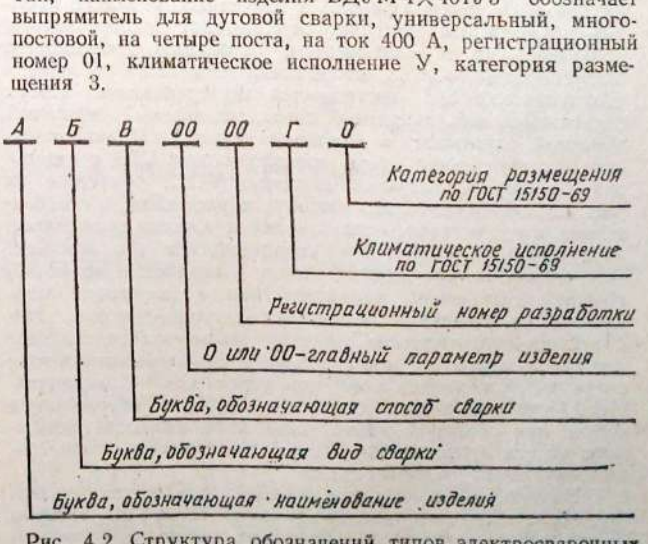


Рис. 4.2. Структура обозначений типов электросварочных источников.

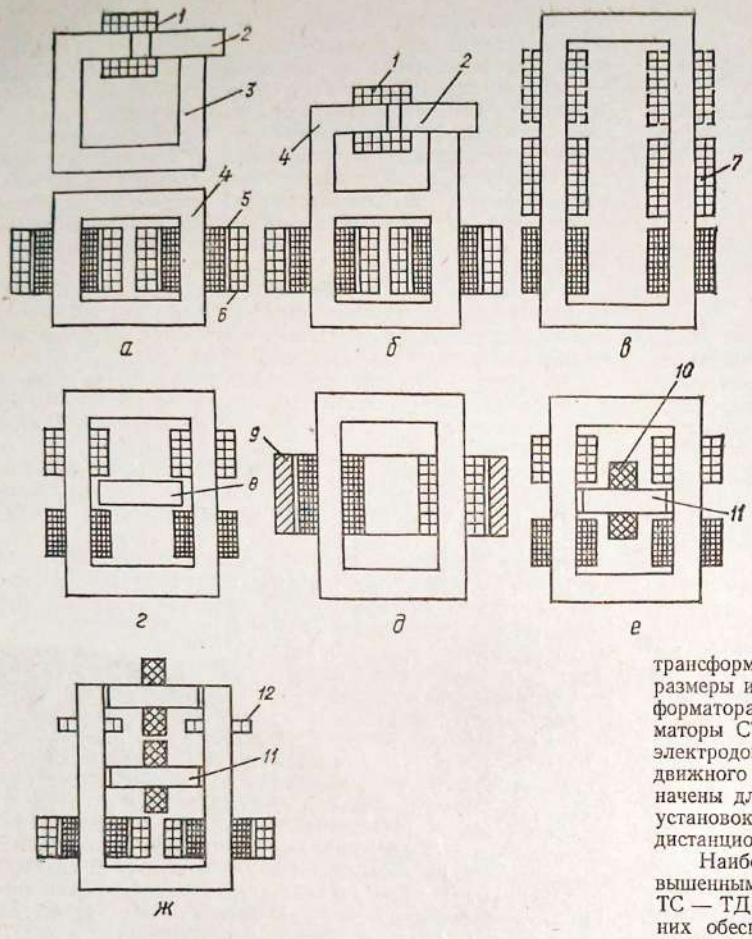


Рис. 4.3. Конструктивные схемы сварочных трансформаторов:

1 — обмотка дросселя; *2* — подвижный сердечник дросселя; *3,4* — магнитопроводы дросселя и трансформатора; *5,6* — первичная и вторичная обмотки; *7* — подвижная вторичная обмотка трансформатора; *8* — подвижный магнитный шунт; *9, 10* — обмотки охватывающие и управления; *11* — неподвижный магнитный шунт; *12* — секция вторичной обмотки.

4.1.2. Источники питания переменного тока

Источниками переменного тока для сварки служат трансформаторы. Они конструктивно просты, надежны, удобны в эксплуатации. В зависимости от применяемого способа регулирования режима сварки и получения падающей внешней статической характеристики различают трансформаторы с нормальным и повышенным магнитным рассеянием. У трансформаторов с нормальным магнитным рассеянием вторичная обмотка наматывается непосредственно поверх первичной и весь магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, охватывает и вторичную обмотку. Принципиальная конструктивная схема трансформатора СТЭ с отдельной реактивной катушкой-дросселем РСТЭ приведена на рис. 4.3, *а*. Из-за малого магнитного рассеяния, а следовательно, и индуктивного сопротивления обмоток трансформатора внешняя статическая характеристика его жесткая. Для регулирования режима сварки и получения падающей внешней статической характеристики в сварочную цепь включается отдельная реактивная катушка-дроссель. Индуктивное сопротивление дросселя изменяется регулированием воздушного зазора в его ярме. При уменьшении зазора сварочный ток уменьшается, при увеличении — увеличивается. Недостатком этих источников является неустойчивая работа при сварке на малых токах из-за вибрации подвижного пакета дросселя, вызываемой значительными электродинамическими воздействиями.

На рис. 4.3, *б* показана принципиальная конструктивная схема сварочных трансформаторов СТН и ТСД, которые также имеют нормальное магнитное рассеяние. Преимуществами трансформаторов этого типа по сравнению с трансформаторами типа СТЭ являются меньшие габаритные размеры и масса. Однако и они не лишены присущих трансформаторам с отдельным дросселем недостатков. Трансформаторы СТН предназначены для дуговой сварки штучным электродом и снабжены ручным приводом перемещения подвижного пакета дросселя. Трансформаторы ТСД предназначены для питания автоматических и полуавтоматических установок и снабжены электромеханическим приводом для дистанционного регулирования режима сварки.

Наиболее распространенными трансформаторами с повышенным магнитным рассеянием являются трансформаторы ТС — ТД (рис. 4.3, *в*). Регулирование режима сварки в них обеспечивается изменением потока рассеяния между первичной и вторичной обмотками. Преимуществом трансформаторов этого типа перед трансформаторами СТЭ, СТН — ТСД является снижение механических воздействий, влияющих на подвижные элементы системы регулирования.

Перемещение подвижной обмотки в трансформаторах ТС — ТД осуществляется вручную с помощью винта. При разведении обмоток сварочный ток уменьшается, при сближении — увеличивается.

Для расширения диапазона регулирования сварочного тока в трансформаторах ТС — ТД имеется возможность переключения катушек вторичной обмотки с последовательного соединения на параллельное.

К трансформаторам с повышенным магнитным рассеянием относятся трансформаторы СТАН — СТШ и трансформатор ТС-350, конструкция которых представлена на рис. 4.3, *г*. В этих трансформаторах магнитное рассеяние создается подвижным магнитным шунтом, помещенным между стержнями трансформатора. При выдвижении магнитного шунта за пределы магнитопровода рассеяние уменьшается, что приводит к увеличению сварочного тока. Перемещение магнитного шунта в трансформаторах СТАН — СТШ проводится вручную с помощью винтового механизма.

Принцип регулирования режима сварки за счет подмагничивания шунта заложен в основу работы трансформаторов ТДФ (рис. 4.3, *е*), предназначенных для автоматической сварки под флюсом. При увеличении тока подмагничивания магнитное сопротивление шунта возрастает, поток рассеяния уменьшается и сварочный ток увеличивается.

На рис. 4.3, *ж* показана схема трансформатора с регулируемой магнитной коммутацией (ТРМК). У этих трансформаторов вторичная обмотка секционирована. Большая часть ее витков расположена, как у трансформаторов с нормальным рассеянием, а около 30—40 % витков находится

Таблица 4.1. Технические характеристики сварочных трансформаторов

Тип сварочного трансформатора	Напряжение, В		Сварочный ток, А		Коэффициент		Мощность, кВ·А	ПН, %	Габаритные размеры (длина×ширина×высота), мм	Масса, кг
	номинальное	холостого хода	номинальный	пределы регулирования	мощности	полезного действия				
Трансформаторы с нормальным магнитным рассеянием и реактивной катушкой										
СТН-450	30	70—90	450	80—800	0,40	0,85	40	65	840×420×850	320
СТН-500	30	60	500	150—700	0,54	0,85	38,5	65	796×410×840	270
СТН-700	35	60	700	200—900	0,66	0,85	43,5	60	796×429×840	380
ТСД-500-1	40	80	500	200—600	0,55	0,85	48,5	60	950×818×1215	420
ТСД-1000-4	42	69—78	1000	400—1200	0,62	0,87	78	60	950×818×1215	510
ТСД-2000-2 *	53	72—84	2000	800—2200	0,64	0,89	186	50	1050×900×1300	675
ТДР-1601 *	39—49	76	1600	1000—1600	—	—	130	85	663×1053×1606	1100
Трансформаторы с увеличенным магнитным рассеянием и подвижными катушками										
ТС-300	30	63	300	30—395	0,51	0,84	20	60	765×524×1010	180
ТС-500	30	60	500	40—650	0,53	0,85	32	60	845×600×1100	250
ТСК-500	30	60	500	165—650	0,65	0,83	27	60	872×566×1090	280
ТД-300	30	61—79	300	60—380	0,51	0,86	19,4	60	640×490×715	137
ТД-304	35	61—79	300	60—350	0,60	0,87	19,4	50	640×490×885	157
ТД-500	30	60—76	500	90—650	0,53	0,87	32	60	720×580×850	210
ТДМ-317 *	33	62—80	315	60—360	—	—	—	60	555×585×818	130
ТДМ-401 *	36	63—75	400	80—460	—	—	—	60	555×585×848	145
ТДМ-503 *	—	65—80	500	90—560	—	—	35	60	555×585×888	170
ТДП-1	26	68	160	55—175	0,5	0,72	11,4	20	435×290×535	38
ТСП-2	30	62	300	90—300	0,6	0,78	19,4	20	510×370×590	65
ТД-102	26,4	80	160	60—175	—	—	11,4	20	570×325×530	38
ТД-306	30	70	250	100—300	—	—	17,5	25	630×365×590	65
ТД-500-4	40	80	500	100—560	—	—	32	60	880×580×850	191
СТШ-250 *	25	61	250	80—260	0,57	0,72	15,3	20	420×310×425	44
СТШ-300	30	63	300	110—405	0,52	0,88	20,5	60	545×720×750	158
СТШ-500	30	60	500	145—650	0,53	0,90	33	60	670×666×753	220
СТШ-500-80 *	30	60	500	60—800	0,53	0,92	44,5	60	965×762×750	323
ТС-350 *	30	60—70	350	60—450	0,52	0,85	24	65	—	185
Трансформаторы с увеличенным магнитным рассеянием и подмагничиваемым магнитным шунтом										
ТДФ-1001	44	68—71	1000	400—1200	—	0,87	82	100	1200×830×1200	740
ТДФ-1601 *	60	95—105	1600	600—1600	—	0,88	182	100	1200×830×1200	1000
Трансформаторы с ярмовым рассеянием										
ТСМ-250 *	25	60	250	92—250	0,55	0,77	16	20	418×360×400	33
Разряд-250 *	30	60	250	90—250	0,59	0,69	—	20	345×300×465	55
Разряд-315 * (ТДК-315)	35	45	315	60—360	—	—	—	60	420×350×470	60
Трансформаторы с тиристорным управлением										
ТДЭ-402 *	25—44	80	400	80—400	—	—	13,6	60	590×595×820	180
ТДФЖ-1002	30—56	125	1000	300—1200	—	—	86	100	760×1220×1370	550
ТДФЖ-2002 *	32—76	—	2000	600—2200	—	—	260	—	764×1204×1295	490
Трансформаторы со ступенчатым регулированием магнитной связи обмоток										
ТСП-1	25	65—70	160	105—180	0,46	0,75	12	20	254×424×435	35

* Трансформаторы рассчитаны на подключение к питающей сети напряжением 380 В, остальные трансформаторы рассчитаны на подключение к сети 220 или 380 В.

между верхним и средним ярмами трансформатора. Плавная регулировка тока осуществляется подмагничиванием среднего и верхнего ярм. Преимуществом этих конструкций является отсутствие подвижных частей, а наличие подмагничивающего шунта позволяет сделать управление сваркой дистанционным. Широкое применение находят специальные облегченные переносные трансформаторы ТСМ-250, «Разряд-250», ТСП-1. Они имеют пониженное значение продолжительности нагрузки и предназначены для сварки в строительно-монтажном производстве. Плавная регулировка режима внутри каждой ступени проводится намоткой от 1 до 5 витков сварочного провода вокруг корпуса трансформатора (рис. 4. 3, *д*).

Технические характеристики приведены в табл. 4.1.

Питание установок для электрошлаковой сварки осуществляется от специальных трансформаторов с нормальным магнитным рассеянием. Регулирование режима в этих трансформаторах — ступенчатое: переключением обмоток Δ/λ или I/I у трехфазных трансформаторов и изменением числа витков первичной и вторичной обмоток. У трансформаторов типа ТШС-1000-1, ТШС-3000-1, ТШС-1000-3, ТШС-3000-3 предусмотрена возможность осуществлять регулировку на-

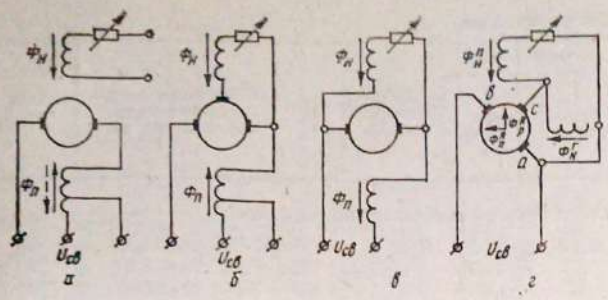


Рис. 4.4. Принципиальные схемы сварочных генераторов.

пряжения в выбранном диапазоне под нагрузкой. Для электрошлаковой сварки предназначен и трансформатор ТРМК-3000-1 с регулируемой магнитной коммутацией.

Технические характеристики приведены в табл. 4.2.

4.1.3. Источники питания постоянного тока

К источникам питания постоянного тока относятся генераторы и выпрямители. Источники питания, состоящие из генератора и привода от электродвигателя или двигателя внутреннего сгорания, называются сварочными преобразователями и агрегатами соответственно.

Существующие генераторы в зависимости от схемы соединения их обмоток разделяются на три основные группы: а) с независимым питанием намагничивающей обмотки и последовательной размагничивающей или подмагничивающей обмоткой (рис. 4.4, *а*); б) с питанием намагничивающей обмотки от дополнительной щетки (с самовозбуждением) и последовательной размагничивающей или подмагничивающей обмоткой (рис. 4.4, *б*); в) с расщепленными полюсами и самовозбуждением (рис. 4.4, *г*). У всех генераторов результирующий магнитный поток $\Phi_{об}$, определяющий их выходное напряжение, является алгебраической суммой потоков $\Phi_н$ и $\Phi_п$. В генераторах первой группы с последовательной размагничивающей обмоткой $\Phi_{об} = \Phi_н - \Phi_п$. При постоянном намагничивающем потоке $\Phi_н$ и потоке $\Phi_п$, зависящем от протекающего по размагничивающей обмотке тока, результирующий поток $\Phi_{об}$, а следовательно, и напряжение на выходе генератора уменьшаются с увеличением нагрузки. Характеристика такого генератора падающая, причем тем круче, чем больше витков в последовательной обмотке. У генераторов с последовательной намагничивающей обмоткой $\Phi_{об} = \Phi_н + \Phi_п$, а конструктивные элементы этой обмотки выбраны таким образом, что при увеличении тока нагрузки быстрота падения напряжения в обмотках якоря генератора, снижающая выходное напряжение, компенсируется возрастанием потока $\Phi_п$. С некоторым приближением можно считать, что напряжение на клеммах генератора зависит в основном от потока $\Phi_н$. Характеристика такого генератора в зависимости от параметров последовательной обмотки может быть пологопадающей, жесткой или возрастающей. Регулирование холостого хода в генераторах этой группы осуществляется изменением тока намагничивающей обмотки, а наклон характеристики регулируется секционированием последовательной обмотки.

Генераторы второй группы отличаются от генераторов первой только тем, что питание их намагничивающей обмотки осуществляется от одной из основных и дополнительной щеток, напряжение между которыми, благодаря подмагничивающей составляющей реакции якоря, практически не зависит от нагрузки. В остальном принцип действия этих генераторов не отличается от принципа действия генераторов с независимым возбуждением.

Генераторы с расщепленными полюсами являются разновидностью генераторов с самовозбуждением, у которых питание намагничивающей обмотки осуществляется от одной основной и дополнительной щеток.

Технические характеристики приведены в табл. 4.3.

Многопостовые генераторы сконструированы по принципу однопостовых генераторов первой группы с последовательной подмагничивающей обмоткой, но с питанием намагничивающей обмотки от главных щеток генератора (рис. 4.4, *в*). Регулирование тока на каждом сварочном посту осуществляется последовательным включением балластного реостата.

Технические характеристики сварочных преобразователей и агрегатов приведены в табл. 4.4 и 4.5.

В настоящее время все более широкое применение в качестве источников питания постоянного тока находят сварочные выпрямители. Они состоят из трансформатора и выпрямительного блока (блока вентилей). Существующие сва-

Таблица 4.2. Технические характеристики трансформаторов для электрошлаковой сварки

Тип	Охлаждение	Номинальный фазный ток при ПВ = 100 %, А	Напряжение, В			Мощность, кВ·А	Габаритные размеры (длина×ширина×высота), мм	Масса, кг
			номинальное	пределы регулирования	количество ступеней регулирования			
ТШС-600-3	Воздушное, принудительное	600	54	38—62	18	100	1160×1010×1382	1160
		1200	54	38—62	18	67	1160×1010×1382	1160
ТШС-1000-1	То же	1000	56	38—62	18	56	980×690×1150	510
ТСШ-1000-3	»	1000	56	38—62	18	170	1470×900×1715	1400
		2000	56	38—62	18	112	1470×900×1715	1400
ТШС-3000-3	Водяное	3000	46	13—46	10	138	960×706×780	600
		6000	23	13—23	10	138	960×706×780	600
ТШС-10000-1	»	10 000	28—41	28—41	4	410	1370×1335×1505	2200
ТШП 10-1	»	10 000	72	40—72	4	724	1740×1100×1840	3050
		10 000	61	36—61	4	610	1740×1100×1840	3050
ТШП-15-3	»	15 000	30	14—50	10	1370	1450×1300×1300	3250
ТШП-20-1	»	21 000	36	21—54	10	760	1800×1050×1380	3100
ТРМК-3000-1 (ТЭШ-3001)	Воздушное, принудительное	8000	18—57	—	3	190	1060×1040×1050	1100

Примечание. Обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены по схеме треугольник — звезда или по однофазной схеме.

рочные выпрямители подразделяются на однопостовые с падающими, жесткими, пологопадающими и универсальными характеристиками и многопостовые с жесткими характеристиками. В сварочных выпрямителях применяют селеновые или кремниевые вентили, собранные по трехфазной мостовой или шестифазной схеме выпрямителя (рис. 4.5). Выпрямители типа ВСС, ВКС и ВД имеют падающие внешние статические характеристики, создаваемые силовым трехфазным трансформатором с повышенным магнитным рассеянием. Регулирование режима в этих выпрямителях смешанное. При соединении обмоток трансформатора звезда — звезда (Y/Y) — диапазон малых токов, при соединении треугольник — треугольник (△/△)— диапазон больших токов. Плавная регулировка внутри каждого диапазона обеспечивается изменением расстояния между первичными и вторичными обмотками трансформатора. Выпрямители с пологопадающей характеристикой типа ВС и ВЖ-2М имеют трансформаторы с нормальным магнитным рассеянием. Регулирование режима осуществляется переключением числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора. Выпрямители ВС-200, ВС-300 и ВС-600 имеют дополнительный дроссель, включенный в сварочную цепь. Выпрямители с пологопадающей характеристикой типа ВСК имеют основной трансформатор с нормальным рассеянием и четыре вольтодобавочных трансформатора: один трехфазный и три однофазных. Регулирование режима осуществляется путем различных комбинаций включения обмоток вольтодобавочных трансформаторов — согласно или встречно с основным трансформатором. Динамические характеристики регулируются включенным в сварочную цепь секционированным дросселем. Выпрямители типа ИПП, так же как и ВСК, имеют основной и вольтодобавочный трехфазные трансформаторы и дроссель в сварочной цепи. Регулирование режима — смешанное: ступенчато — включением обмоток вольтодобавочного трансформатора встречно или согласно со вторичной обмоткой основного трансформатора — и плавно — с помощью трехфазного автотрансформатора, питающего обмотки вольтодобавочного трансформатора. Выпрямители типа ВДГ с пологопадающей характеристикой имеют трансформатор с нормальным магнитным рассеянием и дроссель насыщения, рабочие обмотки которого включены в плечи выпрямительного блока. Регулирование напряжения выпрямителя смешанное: ступенчато — переключением числа витков вторичных обмоток трансформатора — и плавно — путем изменения тока подмагничивания дросселя насыщения. Скорость нарастания тока в сварочной цепи регулируется секционированным дросселем. Выпрямители типа ВСЖ с пологопадающими внешними характеристиками имеют трансформаторы с регулируемой магнитной коммутацией (см. рис. 4.3, ж). Регулирование напряжения смешанное: ступенчато — переключением числа витков вторичных обмоток трансформатора — и плавно — подмагничиванием среднего и верхнего ярм. Универсальные сварочные выпрямители типа ВСУ имеют жесткие и крутопадаю-

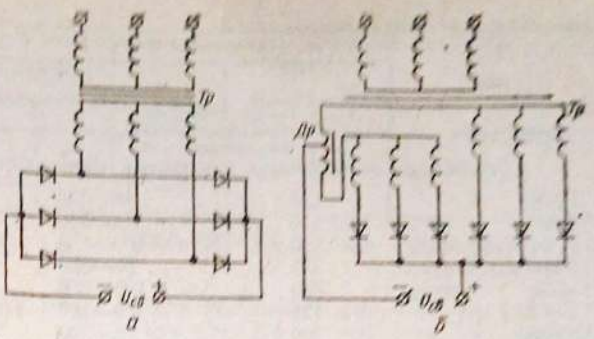


Рис. 4.5. Принципиальные схемы сварочных выпрямителей: *а* — трехфазная мостовая; *б* — шестифазная с уравнительным дросселем.

Таблица 4.3. Технические характеристики генераторов постоянного тока

Тип	Сварочный ток, А		Напряжение, В		ПВ, %	Мощность, кВт
	номинальный	пределы регулирования	номинальное	холостого хода		
Генераторы однопостовые с падающей характеристикой, независимым возбуждением и последовательной размагничивающей обмоткой						
ГСО-300А	300	75—300	30	65	65	9
ГСО-300-3	315	115—315	32	90	60	9,6
ГСО-500	500	120—600	40	62—80	65	20
ГС-1000-II	1000	300—1200	45	90	65	45
ГС-1000-III	1000	300—1200	45	90	65	45
ПГС-300 *	300	75—340	30	65	65	9
Генератор однопостовой с жесткой характеристикой, независимым возбуждением и последовательной подмагничивающей обмоткой						
ГСТ-500-1	500	60—500	40 16—40	18—42	60	20
Генераторы однопостовые с универсальной характеристикой и независимым возбуждением **						
ГД-304	300	15—350 80—300	32 16—45	75—80	65 60	9,6
ГД-502	500	15—500 —	40 15—50	90	65 60	20
ГСУ-300	300	75—300 —	30 10—35	48 16—36	65 60	9
ГСУ-500-2	500	120—500 60—500	40 16—40	65 60	65 60	20
ГСУМ-400	400	100—400 —	70	100 25—70	65	28

Продолжение табл. 4.3

Тип	Сварочный ток, А		Напряжение, В		ПН, %	Мощность, кВт
	номинальный	пределы регулирования	номинальное	холостого хода		
Генераторы однопостовые с падающей характеристикой, с самовозбуждением от дополнительной щетки						
ГД-101	125	15—135	25	80	60	3,12
ГД-303	315	15—350	32	75—80	60	9,6
ГД-307	250	100—250	30	—	60	7,5
ГД-310	315	60—350	33,6	90	60	—
ГС-500	500	120—600	40	62—80	65	20
ГСО-120-2	120	30—120	25	40—85	65	3,0
ГСО-300	300	75—320	30	75	65	9
ГСО-300М	300	80—300	32	65	65	9,6
ГСО-300-4	300	75—320	30	—	65	9,6
ГСО-300-5	300	100—300	32	52—80	60	9,6
ГСО-300-8	300	100—300	32	52—80	60	9,6
ГСО-300-12	300	100—300	32	90	60	9,6
Генераторы однопостовые с падающей характеристикой, с расщепленными полюсами и самовозбуждением от дополнительной щетки						
СГ-300-М	300	80—340	35	72	65	11,9
СГ-300-М-1	340	80—380	30	—	65	—
СМГ-2М-У1	300	75—340	30	65	65	9
Генераторы многопостовые						
ГСГМ-500 *	500	Два поста до 250 А	30	16—35	60	15
ГСМ-500	500	Два поста до 300 А	50	55	100	27,5
ГСМ-1000-4	1000	До 6 постов по 300 А	60	60	100	60
СГ-1000	1000	До 6 постов по 300 А	60	60	100	60
Генераторы однопостовые с падающей характеристикой, вентильные, индукторного типа						
ГД-308	315	40—315	33	—	60	10,5
ГД-312	315	40—350	32	85	60	10,1
ГД-502-У3	500	15—500	40	—	60	20,0

* Генератор имеет независимое возбуждение от дополнительного источника питания.
** Значения над чертой — при падающих характеристиках, под чертой — при жестких.

Таблица 4.4. Технические характеристики сварочных преобразователей и агрегатов с электродвигателями

Тип		Приводной электродвигатель на напряжение сети 220/380 В			Коэффициент		Габаритные размеры (длина×ширина×высота), мм	Масса, кг	Исполнение
преобразователя или агрегата	генератора	Тип	Мощность, кВт	Частота вращения, мин⁻¹	полезного действия	мощности			
ПД-303	—	АВ2-51-2	—	2890	0,60	—	1031×608×996	331	Однокорпусный, передвижной, на колесах
ПД-305	—	—	10,4	2890	0,60	—	1300×600×850	295	То же
ПД-502	—	—	—	2900	0,63	—	1065×650×935	550	» »
ПС-300М	СГ-300М	А-62/4	14,0	1450	0,57	0,87	1200×755×1180	570	» »
ПС-300М-1	СГ-300М-I	А-62/4	14,0	1450	0,57	0,87	1200×755×1180	550	Однокорпусный, на лапах
ПС-500	ГС-500	А-72/4	28,0	1450	0,55	0,88	1400×770×1140	940	Однокорпусный, передвижной, на колесах
ПС-1000-III	ГС-1000-II ГС-1000-III	АВ-82/74	55,0	1460	0,69	0,87	1465×770×910	1600	Однокорпусный, стационарный, на лапах
ПС-1000	СГ-1000-II	АВ2-82-4	55,0	1470	0,69	0,89	1465×770×910	1600	То же
ПСО-300	ГСО-300	АВ2-62-4	14,0	1450	0,70	0,88	1015×590×980	400	Однокорпусный, передвижной, на колесах
ПСО-300-2	—	4АВ-160А4	—	1450	—	—	1069×620×822	435	То же

Продолжение табл. 4.4

Тип		Приводной электродвигатель на напряжение сети 220/380 В			Коэффициент		Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг	Исполнение
преобразователя или агрегата	генератора	Тип	Мощность, кВт	Частота вращения, мин⁻¹	полезного действия	мощности			
ПСО-300-3	ГСО-300-3	АВ2-61-4	13,0	1450	—	—	1069×590×800	400	Однокорпусный, передвижной, на колесах
ПСО-500	ГСО-500	АВ2-71-2	30,0	2930	0,54	0,89	1075×650×1085	540	То же
ПСГ-500-1	ГСГ-500-1	АВ2-71-2	30,0	2930	—	—	1050×590×870	460	» »
ПСМ-1000-II	СГ-1000	АД-91/4	75,0	1450	0,74	0,89	1520×820×910	1600	Однокорпусный, стационарный, на лапах
ПСМ-1000-IV	ГСМ-1000-4	А2-82/2	75,0	2925	0,73	0,9	1430×620×820	950	То же
ПСУ-300	ГСУ-300	АВ2-52-2	10,0	2890	0,63	0,83	1160×490×740	300	Однокорпусный, передвижной, на колесах
ПСУ-500-2	ГСУ-500-2	АВ2-71-2	30,0	2930	0,63	0,9	1075×1085×650	545	То же
АСУМ-400	ГСУМ-400	АМ-82-2	—	2925	0,9	0,84	1860×620×920	875	Двухмашинный, стационарный, на общей раме
АСО-2000	СГ-1000-II, 2 шт.	А101-4	125,0	1460	0,6	0,89	4000×935×1190	4000	Трехмашинный, стационарный, на общей раме
САМ-300	ГСО-300М	П62М	16,0	1560	0,68	—	1435×600×832	635	Двухмашинный, стационарный, на общей раме
СДАУ1	ГСГ-500-1	А-71/2	28,0	2930	—	—	1950×900×1500	1000	Однокорпусный, на одной раме с двумя полуавтоматами
САМ-400-2	СГП-3-У	МАФ82-73/4	32,0	1465	—	—	1760×650×920	1300	—
САМ-400-1	СГП-3-У	ПН-290	42,0	1500	—	—	1977×650×940	1650	—

Таблица 4.5. **Технические характеристики агрегатов с бензиновыми и дизельными двигателями**

Тип		Приводной двигатель			Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг	Исполнение
агрегата	генератора	Тип	Мощность, кВт	Частота вращения, мин⁻¹			
АБ-8-АСБ-300М	ПГС-300	407-Д1	14,7	3000	1690×810×1080	515	Общая рама с крышей. Стенки съемные
АД-301	ГСО-300-12	Д-37М	29,4	1600	1915×895×1250	900	То же
АД-302	ГСО-300-12	Д-22	22,0	1600	1915×895×1250	840	» »
АДБ-2502	—	—	—	3000	1526×950×1125	510	Общая рама с крышей. Стенки откидные
АДБ-306	ГСО-300-5	320-01	29,4	2000	1915×895×1250	650	Общая рама с крышей. Стенки съемные
АДБ-309	ГД-303	320Б	29,4	2000	1890×880×1200	750	То же
АДБ-3120	—	—	—	2000	1870×950×1405	650	Общая рама с крышей. Стенки откидные
АДБ-3122	—	—	—	2000	1900×950×1420	690	То же
АДБ-3123	—	—	—	2000	3300×2010×2300	1170	» »
АДБ-3125	—	—	—	2000	1870×950×1405	670	» »
АДБ-318	ГД-312	320-01	29,4	2000	1895×880×1655	710	Общая рама с крышей. Стенки съемные
АДД-4×250	—	Д-240Л	55,2	2200	6600×2350×2740	5000	Общая рама с крышей на четырехколесном прицепе
АДД-303	ГСО-300-12	Д-37Е	29,4	1600	1915×895×1250	900	Общая рама с крышей. Стенки съемные
АДД-304	ГД-307	1Р2-10	13,2	1800	1820×930×1450	850	Общая рама на двухколесном прицепе. Стенки съемные
АДД-305	ГД-310	Д-37Е	29,4	1600	1915×895×1140	900	Общая рама с крышей. Стенки съемные
АДД-3112	—	—	—	1600	1860×950×1210	875	Общая рама с крышей. Стенки откидные

Тип агрегата	Тип генератора	Приводной двигатель: Тип	Мощность, кВт	Частота вращения, мин$^{-1}$	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг	Исполнение
АДД-3114	—	—	—	1800	1900×950×1600	750	Общая рама с крышей Стенки откидные
АДД-4001	—	Д-144-81	36,8	1800	2050×950×1300	875	Общая рама
АДД-502	—	Д-37Е-С2	36,8	1800	2550×1200×1270	1600	» »
АДД-504	—	—	36,8	1800	2550×1200×1270	4650	С прицепом
АСБ-300М	ГСО-300М	408	14,7	3000	1660×1095×935	565	Общая рама с крышей. Стенки съемные
АСБ-300-7	ГСО-300-5	ГАЗ-320	29,4	2000	1915×895×1250	640	То же
АСБ-300-8	ГСО-300-8	ГАЗ-320	29,4	2000	1915×895×1250	640	» »
АСБГ-300	ГСО-300-5	ГАЗ-320Ж	18,4	2000	1915×895×1655	860	» »
АСД-300	ГСО-300	5П4-44-8,5/11	17,7	1500	1885×875×1470	980	» »
АСД-300-М	ГСО-300	5П4-44-8,5/11	17,7	1500	1885×875×1470	980	» »
АСДП-500	СГП-3-VIII	ЯАЗ-М204Г	44,0	1500	5380×1930×2600	4400	Общая рама с крышей на четырехколесном прицепе. Стенки съемные
АСДП-500Г	—	—	44,4	1500	3875×2350×2360	38 755	Общая рама с крышей на четырехколесном прицепе
АСДП-500Г-3М	ГСМ-500	ЯАЗ-М204Г	44,0	1500	6400×2500×2800	5000	Общая рама с крышей на четырехколесном прицепе. Стенки съемные
АСДП-1000	ГС-1000-III	У1Д-6-С2	121,0	1500	6350×2250×2900	6250	То же
ПАС-400-VI	СГП-3-VI	ЗИЛ-120	47,0	1500—1700	2950×1920×880	1900	Общая рама с крышей, Стенки откидные
ПАС-400-VII	СГП-3-VI	ЗИЛ-164А	48,0	1600	2950×1920×880	1900	То же
ПАС-400-VIII	СГП-3-VI	ЗИЛ-164А	48,0	1600	2950×1920×880	1900	» »
ПЭГП-2×250	ГСТМ-500	ГАЗ-320	29,4	2000	—	—	Общая рама с крышей на прицепе. Стенки съемные
САК-2М-VI	СМГ-2М-VI	ГАЗ-МК	22,0	1430	2080×810×730	900	Общая рама с крышей. Стенки откидные
СДУ-2В	ГСО-300-5, 2 шт.	Д-108	79,5	2000	5235×2460×3040	13 500	Общая рама с крышей на тракторе Т-100М. Стенки откидные
СДУ-2Б-1	ГСО-300-5	Д-108	79,5	2000	5730×3250×3040	15 400	То же, на тракторе Т-100МБ
С4УА	ГСО-300-5, 4 шт.	Д-108	79,5	2000	5770×2460×3040	14 600	То же, на тракторе Т-100М

Таблица 4.6. **Технические характеристики однопостовых сварочных выпрямителей с падающими характеристиками**

Тип	Сварочный ток, А: номинальный, ПН=60 %	Сварочный ток, А: пределы регулирования	Напряжение, В: номинальное	Напряжение, В: холостого хода	Мощность, кВт	Коэффициент: мощности	Коэффициент: полезного действия	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
ВД-201 *	200	30—200	21—28	64—71	15,0	—	0,57	716×622×715	120
ВД-301	300	45—300	32	65—68	21,0	0,58	0,72	1200×756×830	230
ВД-302	300	40—320	32	50—60	21,0	0,67	0,67	1200×756×830	220
ВД-306 *	315	45—315	22—32	61—70	24,0	—	—	770×760×820	165
ВД-401	400	50—450	36	80	14,4	—	0,69	772×770×785	200
ВД-502-1	500	50—500	40	65—80	40,0	—	—	810×550×1077	348
ВД-502-2	500	40—500	—	80	42,0	—	0,78	810×560×950	330
ВКС-300	300	30—340	30	55—65	22,0	0,65	0,63	785×628×953	235
ВКС-500	500	60—550	40	65—74	36,0	0,74	0,75	785×628×953	410
ВКС-500-1 *	500	80—550	40	78	37,0	0,65	0,74	870×650×1250	385
ВКСУ-500-1	500	75—595	40	78	36,0	0,75	0,74	870×870×1220	420
ВКСУ-500-2	1000	150—1150	40	78	65,0	0,75	0,74	1850×870×1220	850
ВПС-300	300**	35—350	25—30	58—64	20,5	—	—	850×550×972	220

* Выпрямители рассчитаны на напряжение питающей сети 380 В, остальные типы выпрямителей могут быть подключены к сети с напряжением 220/380 В.

** ПН = 65 %.

щие характеристики. Регулирование режима этих выпрямителей также ступенчатое — переключением числа витков первичных обмоток трансформатора и дросселем насыщения. Переход с жестких характеристик на падающие производится переключателем, соединяющим рабочие обмотки дросселя насыщения последовательно. Выпрямители типа ВДУ также являются универсальными. Они состоят из силового трехфазного трансформатора и выпрямительного блока, собранного на тиристорах по шестифазной схеме с уравнительным реактором. Регулирование режима осуществляется изменением угла открытия тиристоров выпрямительного блока. Многопостовые выпрямители имеют силовой трансформатор с нормальным магнитным рассеянием и выпрямительный блок. Внешняя характеристика этих выпрямителей жесткая. Регулирование тока осуществляется на каждом посту балластным реостатом.

Технические характеристики сварочных выпрямителей приведены в табл. 4.6—4.9.

4.1.4. Источники питания для плазменной резки

Для плазменной резки разработаны специальные выпрямители с повышенным напряжением холостого хода и крутопадающей внешней характеристикой. Трансформаторы этих выпрямителей имеют нормальное магнитное рассеяние. Режим регулируется с помощью дросселя насыщения. Технические характеристики источников питания для плазменной резки приведены в табл. 4.10.

4.1.5. Инверторные источники питания

Сварочные инверторные источники питания — это источники, имеющие высокочастотное преобразующее звено. В таких источниках входной выпрямитель подключается непосредственно к однофазной либо трехфазной сети без промежуточного трансформатора. Затем выпрямленный ток преобразуется с помощью инвертора в высокочастотный. К выходу сварочного трансформатора подключен выходной выпрямитель, который питает сварочную дугу.

Благодаря такому исполнению инверторные источники позволяют значительно (в 6—8 раз) снизить удельные массогабаритные показатели по сравнению с аналогичными показателями традиционных сварочных выпрямителей, например ВДУ, ВДГ, ВС, и уменьшить расход активных материалов, используемых для электромагнитных элементов (трансформатора, реактора); повысить энергетические показатели (КПД, cos φ).

Наличие обратных связей обеспечивает формирование требуемой внешней статической характеристики. Инверторные источники обладают лучшими динамическими характеристиками и сварочными свойствами.

Эти особенности инверторных источников позволяют выполнять их универсальными, т. е. предназначенными для нескольких видов сварки. В каждом способе сварки инверторные источники технологически превосходят традиционные. Так, при ручной дуговой сварке инверторные источники обеспечивают лучшее зажигание дуги, высокую эластичность и малое разбрызгивание.

При аргонодуговой сварке неплавящимся электродом инверторные источники обладают лучшими стартовыми характеристиками и более высоким коэффициентом стабилизации сварочного тока при различных возмущениях.

При сварке в среде углекислого газа инверторные источники уменьшают разбрызгивание металла и обеспечивают более высокое качество сварного соединения.

Инверторные источники питания, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины, ВНИИЭСО, ВНИИМонтажспецстрое, выпускаются малыми опытными сериями на токи от 160 до 315 А. Они предназначены для ручной дуговой сварки штучными электродами, аргонодуговой сварки неплавящимся электродом и сварки в углекислом газе.

Инверторный источник питания И166, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины, предназначен для ручной дуговой сварки штучными электродами и аргонодуговой сварки. Его технические характеристики:

Напряжение сети, В	380
Частота сети, Гц	50
Напряжение холостого хода, В	65
Номинальный сварочный ток, А, при ПВ = 60 %	160
Пределы регулирования тока сварки, А	15—160
Номинальная мощность, кВ · А	4
Коэффициент мощности cos φ	0,95
КПД, %	0,78
Крутизна внешней статической характеристики, В/А	Не менее 6
Масса, кг	21
Габаритные размеры, мм	255×330×450

Источник обеспечивает импульсный режим сварки с плавным автоматическим переходом на номинальный режим и заваркой кратера. Параметры импульсного режима: время ввода в режим и заварки кратера 0—5 с, длительность импульса и паузы 0,5—3 с.

В числе инверторных источников, разработанных ВНИИЭСО, можно отметить следующие.

Универсальный тиристорный инверторный источник питания с жесткими и падающими характеристиками для ручной сварки и в среде углекислого газа типа ВДУЧ-301, ток 315 А, ПВ = 60 %, масса 68 кг. Источник освоен в мелкосерийном производстве на Симферопольском электромашиностроительном заводе.

Транзисторный инверторный источник питания с промежуточной частотой 16 кГц. На базе этого источника серийно выпускается Симферопольским заводом установка УДГ-350 для аргонодуговой сварки на постоянном токе в непрерывном и импульсном режимах. Сварочный ток 315 А, ПВ = = 60 %, масса 45 кг. Установка снабжена горелками на 200 и 315 А, газовым клапаном, блоком разъемов, позволяющим при необходимости увеличить зону сварки до 30 м.

Инверторный источник питания ВДЧИ-251 для ручной сварки в непрерывном и импульсном режимах магистральных трубопроводов и других объектов. Ток 250 А, ПВ = 60 %, масса 50 кг. Серийное производство осваивается на заводе «Электрик».

4.1.6. Вспомогательные устройства для источников питания

При ручной дуговой сварке наряду с источниками питания используется различное оборудование, обеспечивающее высокое качество сварки, простоту и удобство ведения процесса.

Осцилляторы предназначены для облегчения зажигания дуги и повышения ее стабильности при переходе сварочного тока через ноль в случае работы на переменном токе. В зависимости от конструкции осциллятор подключается к сварочной цепи параллельно или последовательно источнику питания.

Конструктивно осциллятор состоит из повышающего трансформатора, преобразователя частоты и устройства ввода высокого напряжения в сварочную цепь. Осциллятор создает ток высокого напряжения (2—3 кВ) повышенной частоты (150—260 кГц). Технические характеристики сварочных осцилляторов приведены в табл. 4.11.

Возбудители дуги предназначены для возбуждения дуги постоянного и переменного тока. Возбудители могут иметь независимое питание от сети или питаться непосредственно напряжением от дуги. Последние обладают преимуществами перед первыми: они не нуждаются в дополнительной питающей цепи, автоматически включаются при подаче напряжения на дуговой промежуток и автоматически прекращают работу после зажигания дуги. Основными составными частями возбудителя являются источник высокого напряжения

Таблица 4.7. Технические характеристики однопостовых сварочных выпрямителей с пологопадающими и жесткими

Тип выпрямителя	Сварочный ток, А		Напряжение, В		Число ступеней регулирования напряжения	Мощность, кВ·А	Коэффициент	
	номинальный, ПН = 60 %	пределы регулирования	холостого хода	пределы регулирования			мощности	полезного действия
ВДГ-301	300	40—300	—	15—32	3	—	0,88	0,72
ВДГ-302 *	315	50—315	—	16—38	3	18,0	—	0,75
ВДГ-303	315	50—315	60	16—40	—	21,0	—	0,73
ВДГ-601	630	100—700	66	20—40	—	69,0	—	—
ВДГИ-301	315	40—325	10—35	19—30	—	13,0	—	—
ВДГИ-302	315	40—325	10—35	19—45	—	17,3	—	—
ВС-200	150 **	30—200	—	17—21	5	—	—	—
ВС-300	300 ***	30—300	—	20—40	24	—	0,90	0,70
ВС-500	500 ***	50—500	21—53	16—41	27	31,0	—	0,75
ВС-600	500 ***	100—500	21—53	20—40	27	31,0	0,95	0,75
ВС-1000	1000	—	28—63	17—48	4	75,0	0,85	0,78
ВС-1000-2	1000	—	38—85	20—65	4	92,0	0,85	0,78
ВСЖ-301	300	50—300	—	9—32	5	—	0,78	0,76
ВСЖ-302 *	315	50—315	18—44	9—33	5	—	0,78	0,76
ВСК-300	300	75—400	70	14—34	—	—	0,82	0,75
ВСК-300-1А	300 **	50—400	70	15—51	—	—	0,82	—
ВСК-500	500	125—675	70	26—38	—	—	0,82	0,76
ИИП-120П	120 ***	40—120	25	14—24	2	—	0,94	0,73
ИИП-300П	300 ***	50—300	40	16—40	2	13,0	0,90	0,75
ИИП-500П	500 ***	80—500	50	17—50	4	30,0	0,91	0,76
ИИП-1000П	1000 ***	100—1000	66	20—60	—	65,0	0,92	0,81

* Выпрямители рассчитаны на подключение к питающей сети напряжением 220/380 В.
** ПН = 100 %.
*** ПН = 65 %.

Таблица 4.8. Технические характеристики однопостовых сварочных выпрямителей с универсальными характеристиками

Тип выпрямителя	Сварочный ток, А		Напряжение, В		Коэффициент		Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
	номинальный	пределы регулирования	номинальное	холостого хода	полезного действия	мощности		
ВДГ-503	500	60—500 50—500	18—50 22—50	—	—	—	920×800×700	До 300
ВДУ-504 ВДУ-504-1	500	70—500 100—500	45 18—50	72—76 18—50	0,82	—	1275×816×940	400
ВДУ-505	500	50—500 60—500	22—46 18—50	85 18—50	0,83 0,84	—	800×700×920	300
ВДУ-506	500	50—500 60—500	22—46 18—50	85 18—50	—	—	820×620×1100	310
ВДУ-601	630	65—630 60—630	52—56	92	0,75	—	1250×800×1300	400
ВДУ-1001	1000 **	300—1000	24—56	56—66	—	—	—	900
ВДУ-1201 *	1250	—	36—80 24—66	100 24—66	0,83	—	1350×800×1250	850
ВДУ-1601	1600 **	500—1600	26—66	26—66	—	—	—	950
ВДУ-1602 *	1600 **	—	50	25—90	—	—	—	1550
ВСУ-300	240 300	40—260 50—330	30 18—35	60 40—60	0,63 0,68	0,62 0,72	910×612×960	300
ВСУ-500	350 500	50—360 100—550	30 20—40	67 49—68	0,60 0,67	0,63 0,75	1186×953×1017	440

* Выпрямители рассчитаны на подключение к питающей сети напряжением 380 В.
** ПН = 100 %.

характеристиками

Индуктивность дополнительного дросселя, мГн	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
0,16—0,56	960×700×775	210
0,16—0,56	1015×748×853	275
—	950×753×605	230
—	1234×868×1081	530
—	935×1045×748	350
—	720×593×938	250
0,22—0,26	660×480×1200	190
0,25—0,35	560×720×965	250
0,25—0,35	770×600×1150	350
0,22—0,43	1000×865×1510	490
—	880×700×1375	600
—	880×700×1575	650
0,3	—	—
—	1020×670×755	220
—	—	135
—	745×760×1410	400
—	—	—
—	800×640×915	180
—	956×700×1045	255
—	956×700×1045	450
—	925×925×1300	850

высокочастотный генератор и устройство ввода высокого напряжения в цепь сварочной дуги. Технические характеристики возбудителей дуги даны в табл. 4.12.

Для стабилизации горения сварочной дуги при сварке покрытыми электродами переменным током служат стабилизаторы, технические характеристики которых приведены в табл. 4.13. Конструктивно стабилизаторы представляют собой электронный блок, монтируемый в источнике питания переменного тока, обеспечивающий синхронное поступление импульса тока в момент перехода переменного сварочного тока через ноль.

Ограничители напряжения холостого хода предназначены для ограничения или отключения напряжения холостого хода источников питания сварочной дуги при снятии нагрузки. В зависимости от конструкции ограничители напряжения холостого хода применяются либо для источников питания постоянного тока, например выпрямителей, либо для источников питания переменного тока — трансформаторов.

Конструктивно ограничители напряжения холостого хода представляют собой электронную схему на силовых тиристорах, включаемую в сварочную цепь. Технические характеристики ограничителей напряжения холостого хода приведены в табл. 4.14.

Для регулирования режима сварки и получения необходимой внешней характеристики от источника питания с естественной жесткой характеристикой применяют балластные реостаты, представляющие собой активное сопротивление. Они включаются в сварочную цепь последовательно сварочной дуге, и с их помощью осуществляют ступенчатую регулировку сварочного тока.

Конструктивно балластные реостаты представляют собой нихромовую проволоку различного поперечного сечения, создающую определенное падение напряжения в каждой из секций. Классифицируют балластные реостаты по номиналь-

Таблица 4.9. **Технические характеристики многопостовых сварочных выпрямителей**

Тип выпрямителя	Сварочный ток, А			Напряжение, В		Мощность, кВ·А	Коэффициент		Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
	номинальный, ПН=100 %	одного поста	количество постов	номинальное	холостого хода		полезного действия	мощности		
ВДМ-1001	1000	300	До 6	60	70	—	—	—	—	—
ВДМ-1601	1600	300	До 9	60	70	122	0,88	0,89	1035×820×1630	750
ВДМ-3001	3000	300	До 18	60	70	230	0,88	0,89	2175×835×1650	1750
ВМГ-5000 *	5000	300	До 30	30, 35, 40, 50, 60	30, 35, 40, 50, 60	317	0,94	—	1850×1150×1880	3200
ВДУМ-4×401	—	400	До 4	45, 36	100	87	0,75	—	1350×850×1200	790

* Для охлаждения вентилей требуется вода.

Таблица 4.10. **Технические характеристики источников питания для плазменной резки***

Тип источника питания	Ток, А		Напряжение, В		Мощность, кВ·А	Коэффициент		Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
	номинальный, ПВ = 100 %	пределы регулирования	номинальное	холостого хода		полезного действия	мощности		
ВПР-402М	400	100—500	200	300	120	0,85	—	—	1200
ВПР-602	630	200—700	200	300	190	0,92	0,71	1460×1150×1150	2500
ВПР-602М	630	200—700	200	300	200	0,85	—	—	1900
ИПГ-500-1	500	100—600	200	300	150	0,80	0,75	1128×870×1460	2000
ВПР-1001	1000	250—1200	275	400	400	0,80	—	—	4450
ВПР-1002	1000	200—1200	200	300	400	0,85	—	—	3800
ВПС-801 **	800	200—900	80	120	100	0,96	—	—	1165

* Источники питания изготавливаются в совмещенном исполнении с аппаратурой управления.
** Источник питания предназначен для сварки сжатой дугой.

Таблица 4.11. Технические характеристики сварочных осциллятора

Тип осциллятора	Напряжение, В: номинальное	Напряжение, В: холостого хода	Номинальная мощность, кВт	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
ОСП-3-2М-1	220	8000	0,02	250×176×110	4
ОСП-3-300М	220	5000	0,04	290×225×150	7
ОСП-3-2М	220	6000	0,044	250×170×110	6
ОСПВ-2	220	2300	0,08	300×215×236	16
М3	65,40	2500	0,08	350×240×290	15
М2	220,110	2600	0,14	300×235×265	20
ОСП-3-1	65	2500	0,2	230×340×310	14
ТУ-2	220,65	3700	0,225	390×270×350	20
ТУ-177	220,65	2500	0,4	390×270×350	20
ОСПН	220	2300	0,4	390×270×310	35
ТУ-77	220	1500	1,0	390×270×350	25

Таблица 4.12. Технические характеристики возбудителей дуги

Тип возбудителя дуги	Напряжение питания, В	Род тока: питающего	Род тока: дуги	Номинальный ток дуги, А	ПН, %
УПД-1	200	Переменный	Постоянный	80, 200, 315	60
ВИС-501	60—90	Постоянный	»	500	—
ВИР-101	180—300	»	»	80	2

Таблица 4.13. Технические характеристики стабилизаторов дуги

Тип стабилизатора дуги	Частота импульсов, Гц	Масса, кг	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм
СД-2	50	5,0	320×190×90
СД-3	100	7,0	340×200×90

Таблица 4.14. Технические характеристики ограничителей напряжения холостого хода сварочных источников питания

Тип ограничителя	Сварочный ток, А: номинальный	Сварочный ток, А: пределы регулирования	Длительность цикла сварки, с	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
УСНТ-0,5	84	—	300	—	38
УСНП-1	85	40—315	300	—	32
УСНТ-4	85	—	300	530×230×396	23
УТСН-1 У3	300	До 300	300	325×290×300	13
УТСН-2 У3	300	До 300	300	325×290×300	13
УСНТ-1	315	40—315	300	—	32
УСНТ-0,6	500	70—560	—	328×430×205	12

Таблица 4.15. Технические характеристики балластных реостатов

Тип реостата	Номинальный сварочный ток, А	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
РБ-201	200	580×355×648	30
РБГ-301	300	600×410×648	32
РБ-301 У2	315	580×410×648	35
РБ-501	500	580×465×648	40

ному току. Технические характеристики балластных реостатов приведены в табл. 4.15.

Модулятор ОИ101, разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины, предназначен для модулирования переменного сварочного тока при ручной дуговой сварке покрытыми электродами. Он может работать с любым серийным трансформатором на токах до 315 А.

Модулятор позволяет значительно упростить технику сварки, повысить производительность труда в вертикальном и потолочном положениях, осуществлять сварку тонколистовых конструкций толщиной 0,6—0,8 мм электродами диаметром 3 и 4 мм. Техническая характеристика модулятора:

Номинальное напряжение питающей сети, В	220
Частота питающей сети, Гц	50
Ток импульса, А	315
Изменение тока паузы, А:	
ступень I	85—95
ступень II	100—120
Регулирование времени, с:	
импульса	0,02—0,5
паузы	0,02—0,5
Регулирование стартового импульса, с	0,5—1,5
Габаритные размеры, мм	350×216×515
Масса, кг	16

4.2. ИНСТРУМЕНТ, АППАРАТУРА, УСТАНОВКИ И ЗАЩИТНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ И РЕЗКИ

4.2.1. Инструмент и аппаратура для сварки и резки в газовой среде

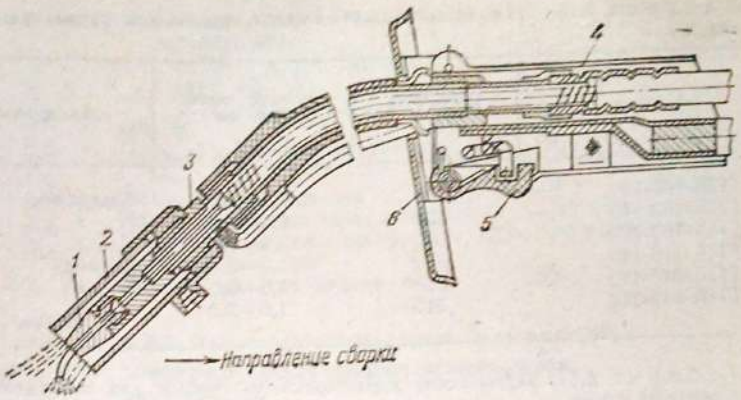
Для проведения сварочных работ в среде защитных газов используют горелки, держатели и специальные установки.

Горелки и держатели для сварки в защитном газе

Ручная и механизированная сварка в защитном газе осуществляется как плавящимся, так и неплавящимся электродами. Различие этих методов определяет конструкцию применяемого рабочего инструмента — горелок и держателей.

Горелки для сварки плавящимся электродом. Сварочная горелка — это сменный инструмент, конфигурация, размеры и устройство которого соответствуют типоразмеру свариваемого изделия. Сварочные горелки предназначены для подвода к месту сварки электродной проволоки, тока и защитного газа. При автоматической сварке в углекислом газе на токах до 500 А обычно применяют горелки без охлаждения, и только при сварке на больших токах — горелки с водяным охлаждением. Водяное охлаждение горелок на токи 400—

Рис. 4.6. Горелка для механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах:
1 — наконечник; *2* — сопло; *3* — переходная втулка с каналами для подачи защитного газа; *4* — рукоятка; *5* — пусковая кнопка; *6* — щиток.



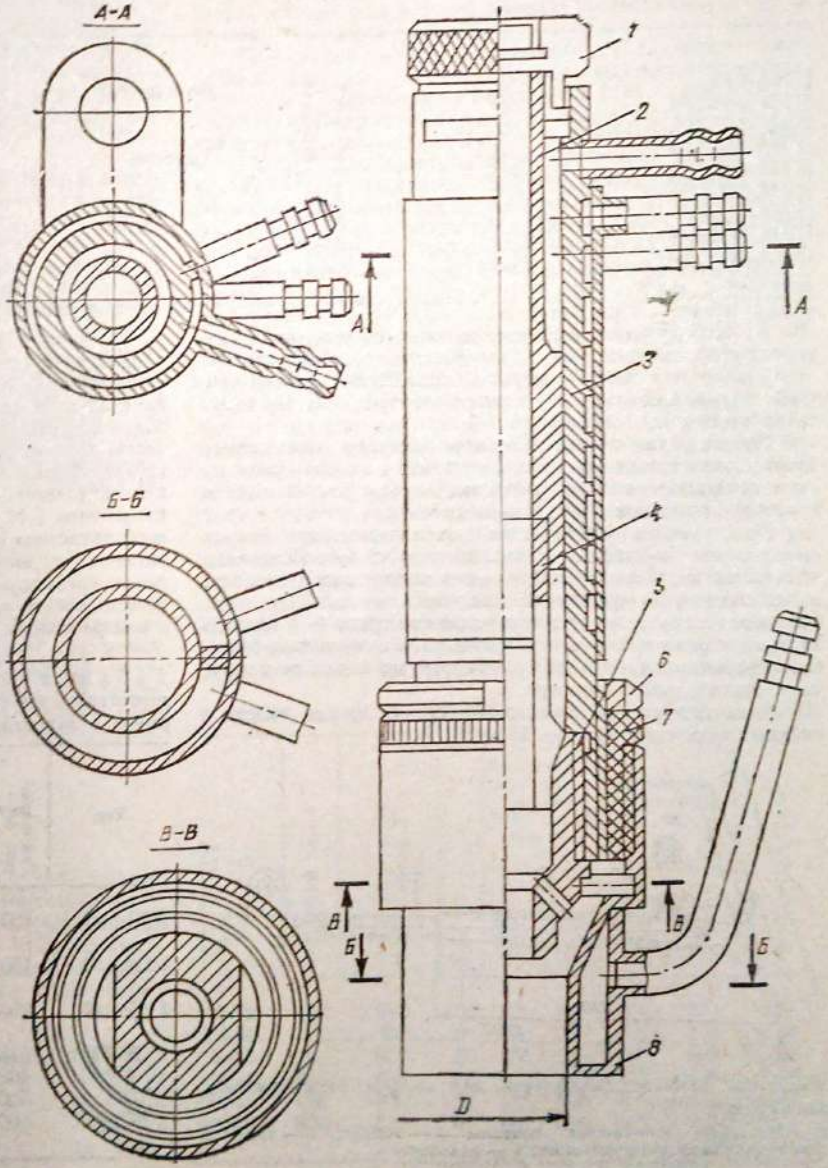


Рис. 4.7. Сварочная горелка типа 1ГНА:
1, 6 — гайки; *2* — цангодержатель; *3* — корпус; *4* — цанга; *5* — распылитель; *7* — изолятор; *8* — сопло.

Таблица 4.16. **Технические характеристики горелок для автоматической сварки плавящимся электродом в защитных газах**

Тип	Сварочный ток, А	Диаметр электрода, мм	Охлаждение	Размеры, мм		Масса, кг
				диаметр	высота	
ГПА-160-100	160	0,6—1,6	Воздушное	14, 16	100	0,356
ГПА-160-140	160	0,6—1,6	»	14, 16	140	0,415
ГПА-160-180	160	0,6—1,6	»	14, 16	180	0,455
ГПА-315-140	315	1,6—3,0	Водяное	16, 18	140	0,470
ГПА-315-180	315	1,6—3,0	»	16, 18	180	0,540
ГПА-315-220	315	1,6—3,0	»	16, 18	220	0,625

Таблица 4.17. **Технические характеристики горелок для автоматической дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах**

Тип	Сварочный ток, А	Диаметр электрода, мм	Охлаждение	Размеры, мм		Масса, кг
				диаметр	высота	
1ГНА-040	40	0,8—2	Воздушное	6, 8	100	0,115
2ГНА-160-140	160	1,5—4	»	9, 12	140	0,210
2ГНА-160-180	160	1,5—4	»	9, 12	180	0,236
2ГНА-315-140	315	2—6	Водяное	12, 16	140	0,398
2ГНА-315-180	315	2—6	»	12, 16	180	0,470
2ГНА-315-220	315	2—6	»	12, 16	220	0,540
1ГНА-630-П	630	4—10	»	16, 20	220	1,2
1ГНА-1000-220	1000	6—12	»	20, 28	220	1,6
1ГНА-1000-280	1000	6—12	»	20, 28	280	2,0

500 А, особенно для механизированной сварки, повышает ресурс сопла и токоподвода, уменьшает их забрызгивание.

Технические характеристики горелок для автоматической дуговой сварки плавящимся электродом в защитных газах приведены в табл. 4.16.

Горелки для механизированной сварки плавящимся электродом в защитных газах соединяются с механизмом подачи проволоки гибким шлангом, по которому подаются к горелке проволока, защитный газ и ток.

Конструкция горелки для механизированной сварки плавящимся электродом показана на рис. 4.6. Сварочная проволока подается в корпус через наконечник и спираль, затем выходит из мундштука. Защитный газ поступает в рукав через штуцер, а через отверстия во втулке — в полость корпуса и через сопло — в зону сварки. Газ не только защищает сварочную дугу и ванну, но и отводит тепло от корпуса и токоведущих проводов.

Промышленность серийно выпускает горелки вместе с гибкими шлангами на токи 150—300 А.

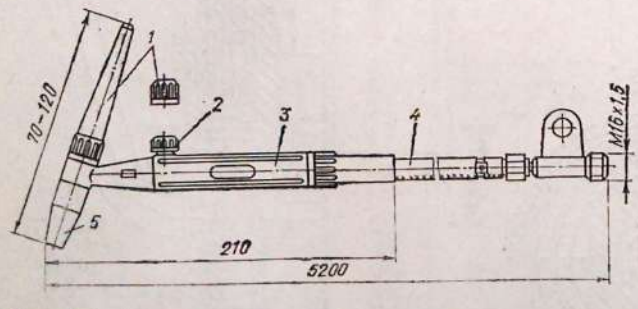


Рис. 4.8. Электрододержатель для сварки неплавящимся электродом ЭЗР:

1 — колпачок; *2* — газовый вентиль; *3* — корпус; *4* — газо- и токоподводящие коммуникации; *5* — наконечник.

В серийно выпускаемых горелках используют гибкие шланги трех типов: 1) у шланга типа А547 УМ токоведущая часть набрана из нескольких медных плетенок, натянутых на стальную спираль, внутри которой помещена сменная спираль для подачи электродной проволоки; токоведущая часть, провода управления от кнопки «Пуск» и газовая трубка помещены в общий резиновый шланг; этот шланг гибкий и легко ремонтируется; 2) составной шланг включает в себя канал типа КН для подачи проволоки, токоведущую часть, изготовляемую из сварочного кабеля типа ПРГ, провода управления от кнопки «Пуск» и газовую трубку; все эти элементы соединены гибкими хомутами — стяжками; 3) шланг на базе кабеля шлангового типа КПЭС сечением 30 и 50 мм²; в центре кабеля имеется армированное отверстие для смен-

Таблица 4.18. **Технические характеристики горелок и держателей для ручной дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах**

Тип	Сварочный ток, А	Диаметр электрода, мм	Охлаждение	Габаритные размеры, (длина × ширина × высота), мм	Масса без шлангов, кг
ЭЗР-3-66	150	1,5; 2; 3	Воздушное	260×35×110	0,78
РГА-150	150	0,8; 1; 2; 3	»	260×80×85	0,296
ГНР 160	160	0,8; 1; 2; 3	»	323×30×30	0,212
ГНР-315	315	3; 4; 5	Водяное	345×35×35	0,305
РГА-400	400	4; 5; 6	»	270×34×105	0,43
ЭЗР-4	500	4; 5; 6	»	235×120×140	0,7
ГДСв-500	500	4; 5; 6	»	200×120×140	0,65

Таблица 4.19. **Технические характеристики резаков для воздушно-дуговой резки**

Тип	Рабочий ток, А, при ПВ, %		Давление на входе в резак, МПа	Расход воздуха, м³/ч	Длина без коммутации, мм	Масса комплекта, кг
	60	100				
РВДм-315	480	315	0,4—0,63	20	310	3,8
«Раздан»	1500	1200	0,588	30—40	250	19,5

ной спирали, по которой подается электродная проволока; в кабеле три провода управления сечением 1—1,5 мм²; газоподводящая трубка расположена отдельно рядом с кабелем и скреплена с ним гибкими стяжками.

Горелки и держатели для сварки неплавящимся электродом. Горелки для сварки неплавящимся электродом можно разделить на две группы: для автоматической и ручной сварки. Горелки для автоматической дуговой сварки неплавящимся электродом, у которых электрод с цангой вынимается вверх, могут иметь воздушное и водяное охлаждение не только корпуса, но и сопла. На рис. 4.7 изображена горелка с водяным охлаждением, без осевого перемещения электрода; цанга и электрод вынимаются вверх; подвод тока, воды и газа раздельный. Корпус и сопло горелки паяные из латуни с раздельным водяным охлаждением. Такие горелки позволяют осуществлять сварку на токах до 1000 А.

Горелки для автоматической сварки неплавящимся электродом, у которых электрод с цангой вынимается вниз, также могут иметь воздушное и водяное охлаждение. Технические характеристики приведены в табл. 4.17.

Для ручной дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах разработаны и серийно выпускаются держатели типа ЭЗР (рис. 4.8). Наружная цанга держателя электрода поворотом колпачка втягивается и фиксирует сопло. Одновременно наружная цанга сжимает внутреннюю цангу, которая закрепляет вольфрамовый электрод концентрично относительно сопла. На пластмассовой рукоятке расположен вентиль регулировки подачи газа. Имеются держатели с водяным и воздушным охлаждением. Держатели типа ЭЗР предназначены для работы на постоянном и переменном токе.

Технические характеристики приведены в табл. 4.18.

Резаки для воздушно-дуговой резки

Для ручной воздушно-дуговой разделительной и поверхностной резки металлов в монтажных условиях, удаления дефектных участков сварных швов и подготовки кромок под сварку рекомендуется резак РВДм-315; для резки и строжки металлов при обрубочно-очистных операциях, а также для подготовки кромок под сварку и удаления дефектов швов — резак «Раздан» (РВДл-1200), основные технические характеристики которых приведены в табл. 4.19.

Установки для ручной дуговой сварки неплавящимся электродом

Установки типа УДГ предназначены для ручной дуговой сварки алюминия и его сплавов, стационарные установки — для работы в закрытых помещениях. Сварка осуществляется на переменном токе промышленной частоты 50 Гц неплавящимся вольфрамовым электродом при номинальном напряжении холостого хода 70±5 % в среде аргона марки Б по ГОСТ 10157—79.

	УДГ-301-1	УДГ-501-1
Номинальное напряжение питающей сети, В	220 или 380	380
Номинальный сварочный ток, А	315	500
Пределы регулирования тока, А	15—315	40—500
Номинальная мощность, потребляемая:		
силовой цепью (однофазная), кВ · А	25	40
трехфазной цепью, кВт	0,5	0,5
ПВ, %	60	60
Продолжительность включения, мин	10	10
Диаметр электрода, мм	0,8—6	2—10
Расход защитного газа, л/мин	5—10	5—15
Габаритные размеры шкафа управления, мм	700×1100×900	—
Масса шкафа управления, кг	380	—

4.2.2. Электрододержатели для ручной электродуговой сварки плавящимся электродом

Основные параметры и технические требования, предъявляемые к электрододержателям, маркировка, методы испытания их установлены ГОСТ 14651—78 Е. Типы и основные параметры электрододержателей должны соответствовать требованиям, указанным в табл. 4.20.

Конструкция электрододержателя должна обеспечивать замену электрода в течение не более 4 с и закрепление электрода в одной плоскости не менее чем в двух положениях — перпендикулярно и под углом, а также надежное присоединение одножильных кабелей с медными жилами сечением 16 и 25 мм² для электрододержателей типа ЭД-12; 25 и 35 мм² — для электрододержателей типа ЭД-20; 35 и 50 мм² — для электрододержателей типа ЭД-25 и ЭД-31; 50—70 мм² — для электрододержателей типа ЭД-40-и ЭД-50. При этом не должно быть повреждений жилы кабеля или ее выдавливания из-под крепежных деталей. Изолирующие детали электрододержателей, расположенные в области электрода, должны быть изготовлены из материала, стойкого к термическому воздействию сварочной дуги.

Электрододержатели должны соответствовать гребованиям безопасности ГОСТ 12.2.007.8—75, при этом сопротивление изоляции токопроводящих частей электрододержателей при нормальных климатических условиях должно быть не менее 5 МОм; изоляция рукоятки должна выдерживать без пробоя в течение 1 мин испытательное напряжение 1500 В частотой 50 Гц; превышение температуры наружной поверхности рукоятки над температурой окружающего воздуха на участке, охватываемом рукой сварщика, при нормальном режиме работы не должно быть более 40 °С.

Электрододержатели серии ЭП (рис. 4.9) пассатижного типа предназначены для использования при сварочных токах 250 и 50 А. Усилием цилиндрической пружины электрод зажимается между нижней губкой, по которой к нему подводится электрический ток, и рычагом. Канавки в зажиме, распо-

Таблица 4.20. **Основные параметры электрододержателей**

Тип	Сварочный ток, А	Продолжительность цикла сварки, с	ПВ, %	Максимальный сварочный ток, А, при ПВ, %		Диаметр электрода, см		Масса, кг, не более
				100	35	нижний предел	верхний предел	
ЭД-12	125	300	60	100	160	1,6	3,0	0,35
ЭД-20	200	300	60	160	250	2,5	4,0	0,40
ЭД-25	250	300	60	200	315	3,0	5,0	0,45
ЭД-31	315	300	60	250	400	4,0	6,0	0,50
ЭД-40	400	300	60	315	500	5,0	8,0	0,65
ЭД-50	500	300	60	400	630	6,0	10,0	0,75

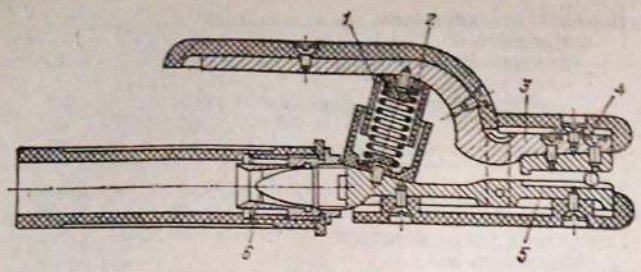


Рис. 4.9. Электрододержатель ЭП:

1 — защитный пружинный колпачок; *2* — пружина; *3* — рычаг с верхней губкой; *4* — теплоизоляция; *5* — нижняя губка; *6* — конус резьбовой втулки крепления сварочного кабеля.

ложенные под различными углами, позволяют закреплять электрод под двумя углами к продольной оси электрододержателя. Огарок освобождается нажатием на рычаг. Сварочный кабель подсоединяется к электрододержателю путем механического зажатия кабеля с расклиниванием конца его между корпусом нижней губки и конусом втулки. Электрододержатель изолируется теплостойкими полимерными деталями.

Электрододержатели серии ЭД рассчитаны на токи до 500 А, позволяют закреплять электрод нажатием рычага в положениях, удобных сварщику для производства работ. Огарок удаляется аналогично описанному выше, сварочный кабель присоединяется через кабельный наконечник, изоляционные детали изготовлены из термостойких полимерных материалов.

Электрододержатели серии ЭДС защелочного типа предназначены для работы на токах 125, 300 и 500 А.

Электрододержатели серии ЭУ («Луч») также защелочного типа. Модель ЭУ-300 рассчитана на токи до 315 А, а модель ЭУ-500 — на токи до 500 А. В электрододержателях этой серии электрод вставляется в отверстие и поворотом на требуемый угол (три положения) фиксируется в держателе. Усилие прижатия создает размещенная в изолированном корпусе цилиндрическая пружина, расположенная по оси рукоятки и корпуса держателя.

Технические характеристики электрододержателей для ручной сварки плавящимся электродом приведены ниже:

	ЭП-2	ЭП-3	ЭД-125-1	ЭД-300-1	ЭД-500-1	ЭУ-300	ЭУ-500
Номинальный сварочный ток, А	250	500	125	300	500	315	500
Диаметр металлического стержня электрода, мм	До 5	6—8	1,6—3	2—6	4—10	3—6	5—8
Сечение сварочного кабеля, подводимого к держателю, мм²	50	70	25	50	70	50	70
Габаритные размеры (длина × × ширина × высота), мм	250×40×80	325×37×95	250×32×74	266×36×84	293×40×92	198×42×80	198×42×80
Масса, кг	0,43	0,8	0,32	0,48	0,67	0,4	0,42

4.2.3. Сварочные кабели. Муфты соединительные и клеммы заземления

В сварочном производстве при строительно-монтажных работах применяют кабели марок КРПТ, КРПГ, КРПГН, КРПТН, а также марок РГД, РГДО и РГДВ (ГОСТ 6731—77 Е). Это гибкие кабели с медными жилами, заключенными в резиновую изоляцию и оболочку. Они предназначены для подключения к электрическим сетям на номинальное напряжение до 660 В частотой 400 Гц или к источникам постоянного напряжения до 1000 В (ГОСТ 13497—77 Е) либо к сетям до 220 В при частоте 50 Гц или к источникам постоянного напряжения (ГОСТ 6731—77 Е). Длительно допускаемая температура жил не должна превышать 65 °С.

Сечение сварочного кабеля определяется значением сварочного тока. Рекомендуемые площади сечений сварочных кабелей для наиболее распространенных при ручной электродуговой сварке токов (по данным Международного института сварки) приведены ниже:

$I_{св}$, А	240	300	400	500
Площадь сечения кабеля, мм²	25	35	50	70

Для разъемного соединения сварочных проводов между собой применяются соединительные муфты, а для неразъемного — соединители, заменившие существующие «скрутки» проводов. Работать с соединительными муфтами и соединителями можно при температуре окружающей среды от —40 до +50 °С. Соединение сварочного провода с муфтой (полумуфтой), а также полумуфт между собой должно выполняться быстро и без больших усилий. Муфты и соединители должны иметь надежную электро- и теплоизоляцию, а также высокую механическую прочность. Соединительная быстроразъемная муфта МС-2 состоит из двух полумуфт, соединение которых осуществляется вручную поворотом одной из полумуфт относительно другой; при этом создается возможность прохода сварочного тока с одного токоподвода на другой. Место контакта надежно защищено теплостойким электроизоляционным материалом.

Кроме этой муфты широко применяется аналогичная по назначению и действию муфта МСБ-2, а для неразъемных соединений — соединитель ССП-2. К источнику питания сварочной дуги кабель может присоединяться с помощью присоединительных муфт, например МС-3, одна из полумуфт которой аналогична по конструкции полумуфте марки МС-2 или МСБ-2, а другая вместо конца кабеля имеет выходную деталь с отверстием, надеваемую на контактный болт источника питания. Клеммы заземления предназначены для присоединения сварочного кабеля к заземляемому предмету. Из клемм этого вида наибольший интерес представляет поворотная муфта (клемма) заземления КЗП-12, позволяющая проводить сварку поворотных стыков труб. Ее конструктивная схема представлена на рис. 4.10.

4.2.4. Щитки защитные для электросварщиков

В соответствии с ГОСТ 12.4.035—78 «Средства индивидуальной защиты. Щитки защитные электросварщиков» промышленностью выпускается несколько моделей защитных щитков из специальной пластмассы — поликарбонатной смолы «Дифлов». Эта смола устойчива к высокой температуре и повышенной влажности, практически не подвергается деформации, не портится от брызг расплавленного металла. В конструкции щитков отсутствуют металлические выступающие детали, что предохраняет сварщика от поражения электрическим током. Новые защитные щитки имеют литой бесшовный корпус. Он надежен, долговечен и эстетичен, сохраняет механическую прочность при температуре окружающей среды от 50 °С до —100 °С. Конструкция последних моделей щитков на 10—15 % уменьшает вероятность попадания вредных аэрозолей в зону дыхания сварщика.

Новые наголовные и ручные щитки с увеличенными светофильтрами (размером 90 × 102 мм), наголовные щитки, монтируемые на защитной каске (рис. 4.11), и щитки с подвижными откидывающимися светофильтрами обеспечивают надежную защиту сварщика при различных условиях строительно-монтажного производства.

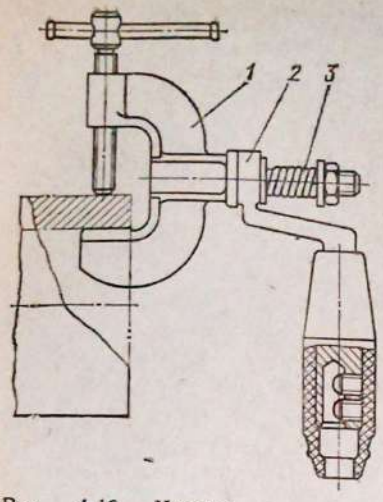


Рис. 4.10. Клемма заземления КЗП-12:

1 — скоба; *2* — муфта соединительная концевая МК-500; *3* — пружина.

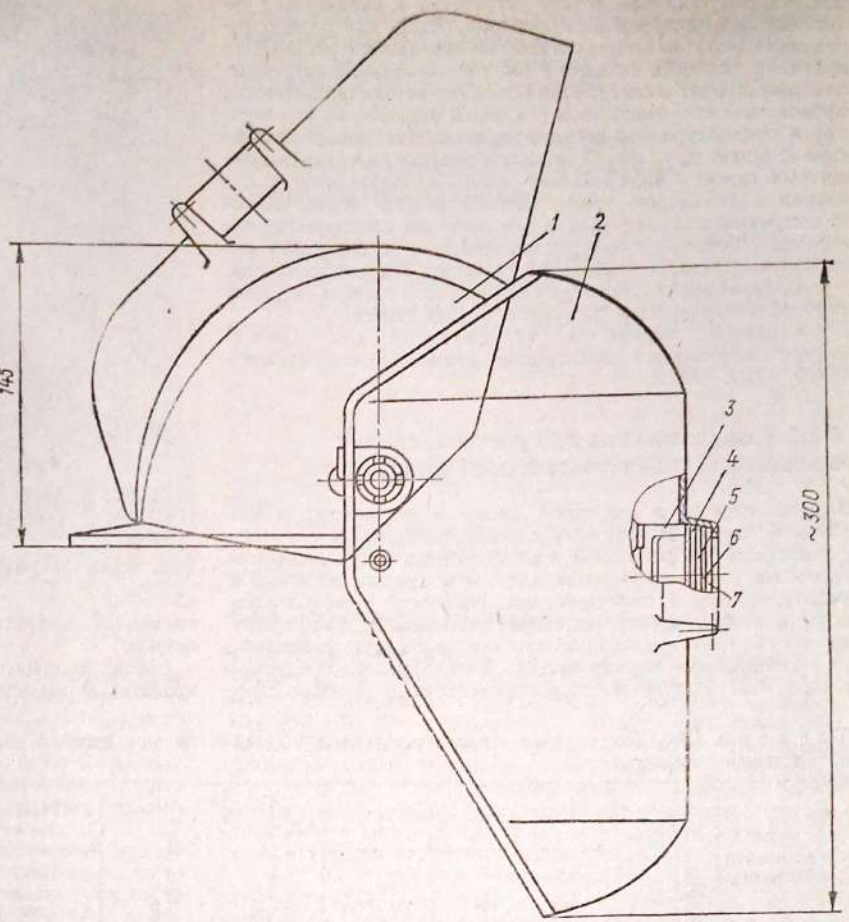


Рис. 4.11. Щиток сварщика с креплением на защитной каске:

1 — защитная каска; *2* — корпус щитка; *3* — прижим; *4* — подложка; *5* — светофильтр; *6* — прокладка; *7* — покровное стекло.

4.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

4.3.1. Общие сведения и классификация

Механизированной сваркой (наплавкой) называют сварку (наплавку) с механизированной подачей сварочных материалов и ручным перемещением дуги вдоль линии сварного соединения. В качестве основного оборудования для механизированной дуговой сварки (наплавки) применяются шланговые полуавтоматы с различными горелками (держателями), а также специальные типы полуавтоматов, в которых используются дополнительные устройства, например ручные механизмы передвижения дуги, прижимные механизмы в случае сварки электрозаклепками и т. п.

Полуавтоматы применяют для сварки как плавящимся, так и неплавящимся электродами.

Наибольшее распространение получили шланговые полуавтоматы для сварки плавящимся электродом. Поэтому ниже рассматриваются главным образом эти полуавтоматы.

Шланговые полуавтоматы для сварки (наплавки) плавящимся электродом классифицируются по следующим признакам (ГОСТ 18130—79 Е): а) способу защиты зоны дуги (Г — для сварки в активных защитных газах; И — для сварки в инертных газах; У — для сварки в активных и инертных газах; Ф — для сварки под флюсом; О — для сварки открытой дугой); б) виду электродной проволоки (для сварки сплошной стальной проволокой, сплошной проволокой из алюминия и его сплавов, стальной порошковой проволокой); в) способу охлаждения горелки (с естественным охлаждением, принудительным водяным или газовым охлаждением); г) способу регулирования скорости подачи электродной проволоки (с плавным регулированием, ступенчатым и с плавно-ступенчатым регулированием); д) способу подачи электродной проволоки (толкающего, тянущего и тянуще-толкающего типов); е) конструктивному исполнению (с стационарным, передвижным или переносным подающим устройством).

Все исполнения, кроме исполнений по способу защиты зоны дуги, в обозначения полуавтоматов не входят.

4.3.2. Основные составные части и параметры полуавтоматов

В состав наиболее распространенных — шланговых — полуавтоматов входят (рис. 4.12) горелка *1* или комплект горелок со шлангом *2*; механизм *3* подачи электродной проволоки;

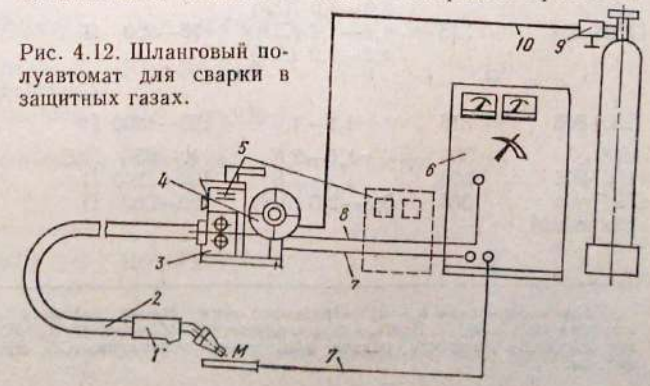


Рис. 4.12. Шланговый полуавтомат для сварки в защитных газах.

кассета, катушка или другие устройства *4*, являющиеся емкостями для электродной проволоки; шкаф или блок *5* управления (если он конструктивно не объединен с источником питания); источник питания *6* (по согласованию с потребителем полуавтомат может поставляться без источника питания); провода для сварочной цепи *7* и цепей управления *8*; редуктор и аппаратура для регулирования и измерения расхода газа *9*; шланг для газа *10* (в полуавтоматах для сварки в защитных газах); подогреватель газа (в полуавтоматах для сварки в углекислом газе); устройства для подачи флюса (в полуавтоматах для сварки под флюсом); специальный инструмент, запасные и быстроизнашивающиеся составные части полуавтомата, а также эксплуатационная документация.

Полуавтоматы для сварки без внешней защиты не имеют газовой аппаратуры и устройств подачи флюса.

Основные параметры полуавтоматов для дуговой сварки плавящимся электродом должны соответствовать ГОСТ 18130—79 Е.

Рис. 4.13. Полуавтомат А547УМ (ПДГ-309).

4.3.3. Полуавтоматы для дуговой сварки в защитных газах плавящимся электродом

Защита зоны дуги сварочной ванны в полуавтоматах для дуговой сварки в защитных газах плавящимся электродом осуществляется активными или инертными газами, а также газовыми смесями. Полуавтоматы этой группы надежны в работе, просты в обслуживании, позволяют выполнять работы в любых пространственных положениях и наблюдать за дугой. Они имеют сравнительно невысокую стоимость.

Технические характеристики полуавтоматов приведены в табл. 4.21. В этой же таблице представлен серийно изготовляемый полуавтомат ПДИ-304 для импульсно-дуговой сварки.

Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом применяется в подавляющем большинстве случаев при непре-

Таблица 4.21. **Технические характеристики полуавтоматов для дуговой сварки и наплавки в защитных газах плавящимся электродом**

Тип полуавтомата	Номинальный сварочный ток при ПВ = 60 %, А	Электродная проволока		Способ регулирования скорости подачи	Тип источника питания	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм		Масса, кг	
		диаметр, мм	скорость подачи, м/ч			механизма подачи	шкафа управления	механизма подачи	шкафа управления
Общего применения									
А547УМ (ПДГ-309)	315	0,8—1,4	160—780	П/С	ВС-300Б	350×118×245	392×255×187	6,25	8,5
А825Х	315	0,8—1,4	140—650	П/С	ВСЖ-303	517×395×195	408×280×185	14,3	28,5
А1230М	315	0,8—1,2	145—680	П/С	ВДГ-303	364×290×130	—	10	—
ПДГ-312	315	1,0—1,4	75—960	П	ВДГ-303	340×472×244	—	13,9	—
ПДГ-508М	500	1,6—2,0	108—932	С	ВДУ-505	445×316×370	455×290×230	26	19
А1197Г (ПДГ-513)	500	1,2—2,0	118—782	С	ВС-600М	960×660×560 (на тележке)	194×360×330	35	25
ПДГ-515	500	1,2—2,0	75—960	П	ВДУ-506	340×472×244	—	13,9	—
ПДГ-516	500	1,2—2,0 (СП) 2,0—3,0 (ПР)	120—960	П	ВДУ-506	464×430×365	—	16	—
ПДГ-603	630	1,2—2,0 (СП) 2,0—3,0 (ПР)	120—960	П	ВДГ-601	473×430×365	—	16	—
ПДИ-304	315	1,0—1,4 (СП) 1,2—2,0 (АЛ)	75—960	П	ВДГИ-302	340×472×244	—	13,9	—
Специализированные									
ПДГ-308	315	1,2—1,6	120—1200	П	ВДГ-302	765×525×865	—	65	—
А929	350	1,0—2,0	140—650	П/С	ПСГ-500	517×395×195	550×350×250	14,3	21
ПДГ-502	500	1,2—2,0	120—1200	П	ВДУ-504-1	904×660×434	500×460×700	13	74
ПРМ-4М (ранцевый)	350	0,8—2,0 (АЛ)	120—960	П	ПСГ-500 или ВДГ-302	372×282×130	200×250×320	5,4	11,5

Примечания. 1. Предполагается замена автомата А547УМ двухрежимным полуавтоматом ПШ-132 с источником питания ВС-300М. 2. Здесь и в последующих таблицах П, С, П/С — соответственно плавное, ступенчатое и плавно-ступенчатое регулирование скорости подачи электродной проволоки, СП, ПР, АЛ — сплошная, порошковая и алюминиевая электродные проволоки.

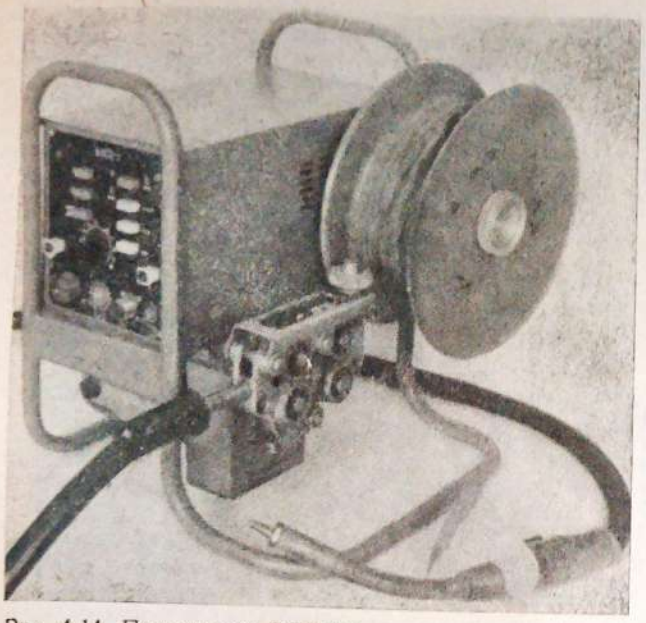


Рис. 4.14. Полуавтомат ПДГ-516.

рывном горении дуги, поэтому в качестве защитной среды вместо обычно применяемого углекислого газа или его смеси с кислородом в данном случае используются аргон и аргоно-окислительные смеси. В среде углекислого газа указанный вид сварки не нашел применения. При сварке на постоянный (базовый) ток, который может быть очень небольшим, периодически накладываются импульсы тока с частотой в несколько десятков герц, что вызывает отделение капли.

По сравнению со сваркой неплавящимся электродом импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом позволяет в 3—8 раз повысить производительность труда и значительно снизить сварочные деформации при практически одинаковом качестве сварных соединений. Она может применяться для конструкций ответственного назначения из различных марок сталей, алюминиевых, медных, никелевых сплавов и титана толщиной 1 мм и более при выполнении швов во всех пространственных положениях.

На рис. 4.13 изображен полуавтомат А547УМ (ПДГ-309), а на рис. 4.14 — полуавтомат ПДГ-516.

4.3.4. Полуавтоматы для сварки без внешней защиты и под флюсом плавящимся электродом

В этой группе полуавтоматов применяется порошковая самозащитная проволока или внешняя защита зоны дуги и сварочной ванны с помощью флюса. В зону сварки флюс поступает из укрепленной на горелке небольшой воронки либо из отдельно расположенного бункера по гибкому резиновому шлангу с помощью сжатого воздуха. Процесс ведется с применением электродной проволоки диаметром 1,6—2,0 мм при высоких плотностях тока. Это обеспечивает глубокое проплавление и сварку металла большой толщины за один проход. При сварке самозащитной порошковой проволокой процесс ведется в любом пространственном положении, а при сварке под флюсом — преимущественно в нижнем положении.

Технические характеристики полуавтоматов приведены в табл. 4.22. На рис. 4.15 показан полуавтомат А765 (ПДО-517).

4.3.5. Тренажеры сварщика

Институтом электросварки им. Е. О. Патона совместно с Институтом проблем моделирования в энергетике АН Украины разработаны многофункциональные тренажеры сварщика: искровой ИТС-01 и электронный ЭТС-01. Эти тренажеры можно использовать для многих целей обучения: для оценки профессиональной пригодности кандидатов на обучение; для улучшения индивидуальных навыков и периодической проверки обучающихся; для оценки квалификации опытных сварщиков и при подборе кандидатов на особо точные работы; для исправления ошибочных действий и т. п.

Тренажеры позволяют обучающемуся сварщику усвоить необходимые психомоторные навыки правильного ведения сварочного процесса при работе с различного рода трубными и пространственными металлоконструкциями из проката, сокращают по сравнению с обучением на реальном процессе время обучения, повышают качество последнего, предохра-

Таблица 4.22. **Технические характеристики полуавтоматов для сварки и наплавки без внешней защиты и под флюсом плавящимся электродом**

Тип полуавтомата	Номинальный сварочный ток при ПВ = 60 %, А	Электродная проволока: диаметр, мм	Электродная проволока: скорость подачи, м/ч	Способ регулирования скорости подачи	Тип источника питания	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм: механизма подачи	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм: шкафа управления	Масса, кг: механизма подачи	Масса, кг: шкафа управления
Общего применения									
А765 (ПДО-517)	500	1,6—2,0 (СП) 1,6—3,0 (ПР)	120—720	С	ВДУ-506	760×500×550	190×350×360	52	23
ПШ-107 (ПДО)	400	1,8—3,2 (ПР)	80—320	П	ВС-400Д	520×500×170	—	12	—
ПШ-107В (ПДО)	400	1,8—3,2 (ПР)	50—410	П	ВС-300Б	520×500×170	—	18	—
А1197Ф (ПДФ-501)	500	1,6—2,0	118—782	С	ВС-600М	960×660×560	194×360×330	35	25
Специализированные									
А1530 (ПДФ-502)	500	1,6—2,5 (СП) 2,0—3,0 (ПР)	150—1000	П	ВДУ-506	490×430×365	—	20	

Примечания. 1. Габаритные размеры и масса полуавтоматов ПШ-107 и ПШ-107В указаны для переносного узла. 2. ПДО — полуавтомат для сварки без внешней защиты (открытой дугой) порошковой самозащитной проволокой; ПДФ — полуавтомат для сварки под флюсом.

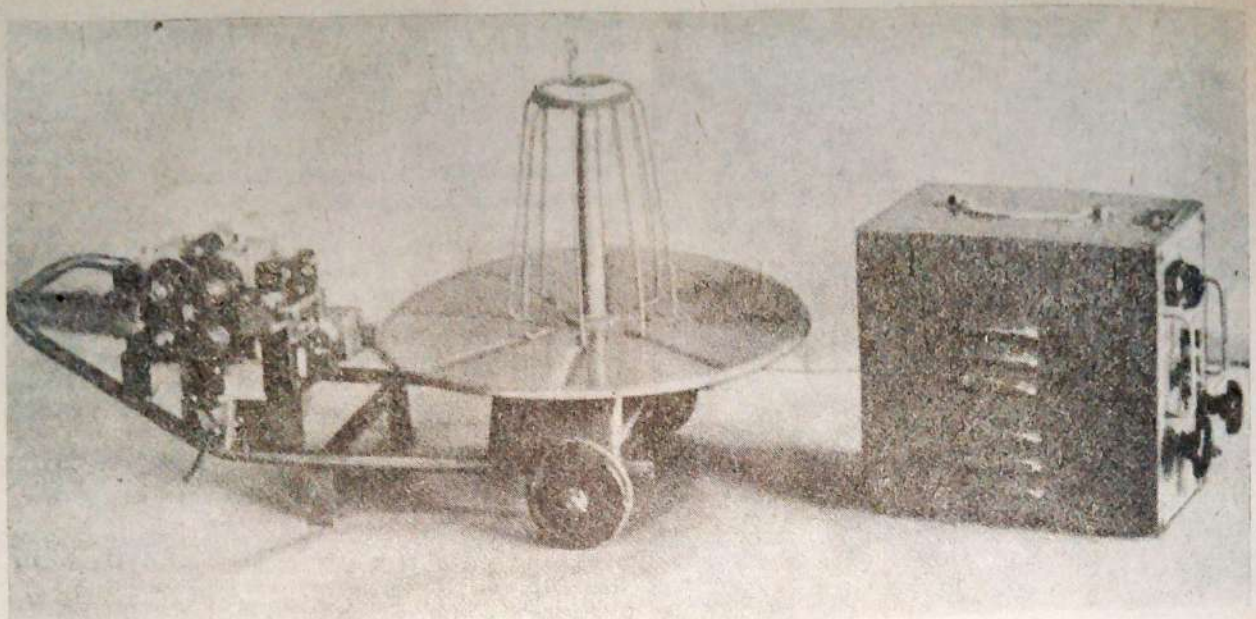


Рис. 4.15. Полуавтомат А765 (ГДО-517).

няют начинающего сварщика от опасности ослепления и ожогов. Кроме того, тренажеры обеспечивают значительную экономию металла, электродов, защитного газа и электроэнергии.

Тренажеры позволяют производить обучение следующим видам сварки: ручная штучная плавящимся и неплавящимся электродами; механизированная электродной проволокой в защитных газах.

При работе на тренажерах обучающийся приобретает навыки возбуждения и поддержания заданной длины дугового промежутка, перемещения электрода вдоль разделки кромок, поддержания угла наклона электрода, скорости ведения сварочного процесса и теплового режима сварочной ванны, техники сварки, а также регистрации числа ошибок, рабочего и штрафного времени по контролируемым параметрам.

При имитации сварки осуществляется контроль следующих параметров: длины дугового промежутка, угла наклона электрода, скорости сварки (визуально), степени нагрева сварочной ванны.

Тренажер дает возможность объективно оценивать качество выполнения имитируемых сварочных работ.

Наличие искрового разряда в тренажере ИТС-01 позволяет имитировать сварочную дугу. Искровой разряд прожигает термочувствительную бумагу в месте его возникновения. На бумаге документально регистрируются все движения сварщика при осуществлении им сварочного процесса. По сформированной на бумаге траектории, а также по показаниям индикаторов контроля правильности поддержания основных параметров сварочного процесса можно оценить точность действий обучаемого.

В тренажере ЭТС-01 предусмотрено два режима работы: программный и самообучения. В программном режиме в задачу обучаемого входит слежение концом имитатора электрода за движением имитатора ванны с соблюдением ограничений по длине дуги, углу наклона и т. п. В режиме самообучения сварщик формирует конфигурацию шва по собственной инициативе, имитатор ванны в этом случае отслеживает движение конца имитатора электрода. Первый режим предпочтительнее для начального обучения, второй — при повышении квалификации и профотборе. Техническая характеристика тренажера:

Контролируемые и задаваемые режимы:	
скорость сварки, м/ч	15—60
длина дугового промежутка, мм	1—8
скорость плавления электрода, см/мин	15—45
угол наклона имитатора электрода относительно нормали к изделию, °	15
диаметр изображения имитируемой сварочной ванны, мм	6—15
диаметр имитатора электрода, мм	8
потребляемая мощность, В · А:	
ИТС-01	100
ЭТС-01	300
габаритные размеры электронного программатора (блока), мм:	
ИТС-01	360×160×480
ЭТС-01	310×300×550
Масса электронного программатора (блока), кг:	
ИТС-01	15
ЭТС-01	20

Пространственные положения шва — нижнее (горизонтальное), вертикальное, потолочное, наклонное, горизонтальное на вертикальной плоскости сварки. Источник питания — переменный ток частотой 50 Гц, напряжением 220 В.

4.4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДУГОВОЙ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

4.4.1. Общие сведения и классификация

В качестве основного оборудования для автоматической дуговой и электрошлаковой сварки (наплавки) используют сварочные автоматы, станки и установки.

Автоматы для дуговой сварки применяются как с плавящимся, так и с неплавящимся электродами. В промышленности наибольшее распространение получили сварочные автоматы для сварки плавящимся электродом. Поэтому ниже рассматриваются главным образом эти автоматы.

Автоматы для дуговой сварки (наплавки) плавящимся электродом обеспечивают выполнение механизмами без не-

посредственного участия человека, в том числе и по заданной программе, следующих операций: возбуждение дуги в начале сварки; поддержание дугового процесса; подачу сварочных материалов (электрода и присадочного материала) в зону дуги по мере их оплавления; относительное перемещение дуги вдоль линии сварного соединения путем перемещения сварочного автомата или изделия; прекращение процесса сварки.

Автоматы тракторного типа для дуговой сварки (наплавки) плавящимся электродом классифицируются по следующим признакам (ГОСТ 8213—75 Е): а) способу защиты зоны дуги (Ф — для сварки под флюсом, Г — для сварки в защитных газах, ФГ — для сварки как в защитных газах, так и под флюсом); б) роду применяемого сварочного тока (для сварки постоянным, переменным, переменным и постоянным током); в) способу охлаждения (с естественным охлаждением токопроводящей части сварочной головки и сопла, с принудительным охлаждением — водяным или газовым); г) способу регулирования скорости подачи электродной проволоки (с плавным регулированием, плавно-ступенчатым и ступенчатым); д) способу регулирования скорости сварки (с плавным регулированием, плавно-ступенчатым и ступенчатым); е) способу подачи электродной проволоки (с независимой от напряжения на дуге подачей и зависимой от напряжения на дуге подачей); ж) расположению автомата относительно свариваемого шва (для сварки внутри колеи, для сварки внутри и вне колеи).

Аналогично можно классифицировать автоматы подвесные, самоходные и не самоходные.

Автоматы для электрошлаковой сварки с помощью механизмов выполняют следующие операции: нагрев шлаковой ванной свариваемых кромок и присадочного материала до температуры их плавления; подачу в зазор между кромками электродного и дополнительного металла; подвод к электроду сварочного тока; удержание сварочной ванны в зазоре до затвердевания ее поверхностей; перемещение источника нагрева и формирующих устройств по мере образования шва; возвратно-поступательное перемещение источника нагрева в зазоре для равномерного проплавления кромок толстого металла и др.

Автоматы для электрошлаковой сварки (наплавки) классифицируются по следующим признакам: способу перемещения аппарата (самоходные — рельсовые и безрельсовые — и подвесные); виду электрода (сварка проволочным электродом, пластинчатым электродом и плавящимся мундштуком).

4.4.2. Основные составные части и параметры автоматов

В состав сварочных (наплавочных) дуговых и электрошлаковых автоматов входят: сварочный инструмент (сварочные мундштуки или горелки); механизм подачи электродного или присадочного материала; механизм перемещения вдоль линии соединения; механизм настроечных, вспомогательных и корректировочных перемещений; устройства для размещения электродного или присадочного материала; флюсовая аппаратура; газовая аппаратура (только для дуговых автоматов); системы управления; источники сварочного тока; средства техники безопасности.

Основные параметры автоматов тракторного типа для дуговой сварки плавящимся электродом должны соответствовать ГОСТ 8213—75 Е. Аналогично этому подвесные самоходные и не самоходные автоматы для дуговой сварки плавящимся электродом имеют примерно такие же основные параметры.

Параметры автоматов для электрошлаковой сварки не регламентированы ГОСТом.

4.4.3. Автоматы для дуговой сварки и наплавки в защитных газах плавящимся электродом

Автоматы этой группы предназначены для сварки (наплавки) ответственных металлоконструкций — различных пространственных металлоконструкций, деталей и узлов трубопроводов, котлов, сосудов и др. Технические характеристики автоматов для сварки и наплавки в защитных газах плавящимся электродом приведены в табл. 4.23.

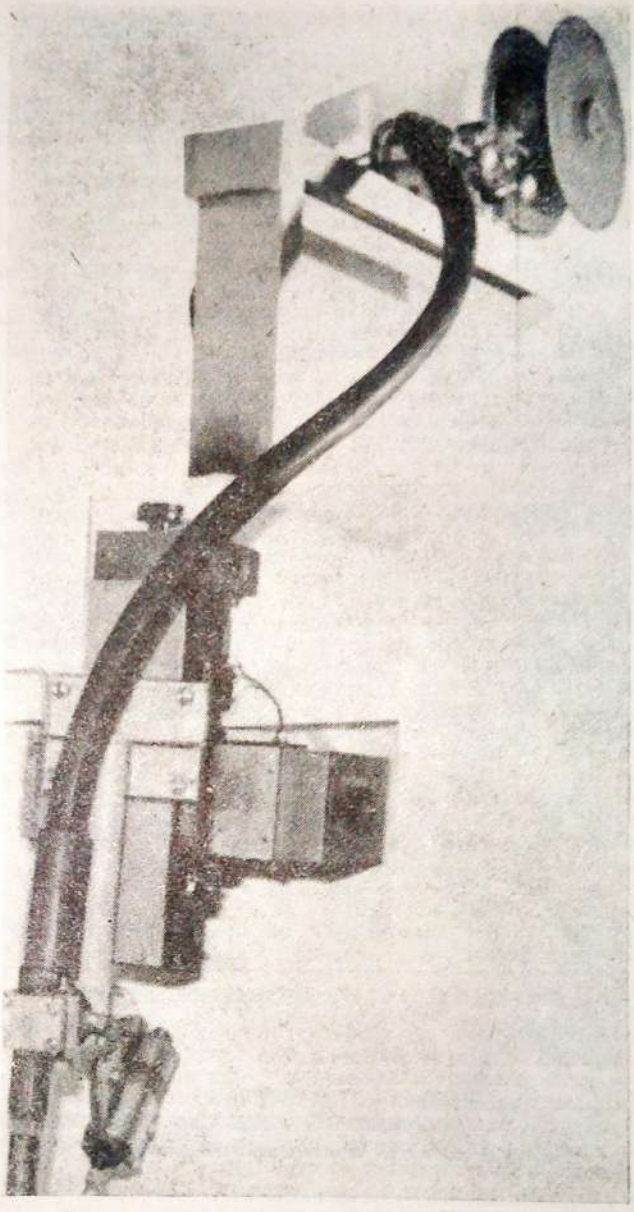


Рис. 4.16. Автомат АД200.

На рис. 4.16 представлен подвесной автомат АД200 для сварки плавящимся электродом на постоянном токе изделий из углеродистой стали, снабженный системой поиска и слежения с электромеханическим датчиком, позволяющим автоматически корректировать положение электрода как по вертикали, так и поперек свариваемого стыка.

Для дуговой наплавки порошковой проволокой или сплошной проволокой в углекислом газе поверхностей цилиндрических изделий служит установка УД209. Установка может быть использована также для наплавки плоских поверхностей деталей длиной до 800 мм. Цилиндрические изделия могут наплавляться по окружности, спирали или с колебаниями электрода на ширину наплавляемой поверхности.

Установка состоит из наплавочного станка и источника сварочного тока ВДУ-504. Наплавочный станок включает

Таблица 4.23. Технические характеристики автоматов для дуговой сварки и наплавки в защитных газах плавящимся

Тип	Номинальный сварочный ток при ПВ = 100 %, А	Исполнение	Защита зоны сварки или наплавки	Число дуг	Электродная проволока		Способ регулирования скорости подачи	Скорость сварки (наплавки), м/ч
					Диаметр (ширина ленты), мм	Скорость подачи, м/ч		
Автоматы общего назначения для сварки плавящимся электродом								
А1417	1000	Самоходный	Углекислый газ	1	2,0—5,0	47—508	П	1—120
Автоматы общего назначения для сварки плавящимся электродом с автоматической системой поис								
АД200	630	Подвесной. Шланговая подача	Углекислый газ	1	1,0—2,5	120—960	П	—
АД201	630	Подвесной	» »	1	1,2—3,2	72—720	П	—
Автоматы специализированные для сварки плавящимся и неплавящимся								
А1402	1000	Самоходный	Углекислый газ	1	2,0—5,0	53—530	П	12—120
АРК-3-11АВ	315	Радиально-консольного типа	Углекислый газ или аргон	1	1,0—5,0 *	—	—	5—80
					0,8—2,0 **	8—120	П	
Автоматы специализированные для сварки плавящимся электродом с автоматической системой								
А1411М	1000	Самоходный	Углекислый газ	1	2,0—3,0	53—530	П	12—120
АД233.01.01	630	Подвесной	» »	1	1,4—3,0	120—1200	П	10—200
АД238.01.10	630	Самоходный	» »	1	1,4—3,0	120—1200	П	10—200
АД238.01.30	630	Самоходный двухкоординатный	» »	1	1,4—3,0	120—1200	П	10—200
АД238.01.32	630	То же	Аргон	1	1,2—3,0	120—1200	П	10—200
Тракторы общего назначения для сварки плавящимся и неплавящимся элект								
АДГ-602	630	—	Углекислый газ	1	1,2—3,0	120—720	П	12—120
АДСВ-6	315	—	Аргон	1	1,0—5,0 *	—	—	5—80
					0,8—2,0 **	8—120	П	
Тракторы специализированные для сварки плавящимся								
А1698	315	—	Углекислый газ	1	1,2—1,6	150—500	П/С	15—45

Примечание. * — вольфрамовый электрод, ** — присадочная проволока.

в себя вращатель, заднюю бабку, сварочную головку и пульт управления, смонтированные на общей станине. В зависимости от вида наплавки кинематика станка позволяет вращать изделие при неподвижной сварочной головке, перемещать сварочную головку относительно неподвижного изделия или совмещать вращение изделия с линейным перемещением сварочной головки. В станке предусматривается ручная загрузка и выгрузка наплавляемых деталей. Техническая характеристика станка:

Размеры наплавляемого изделия, мм:	
наружный диаметр	25—360
длина	Не более 900
толщина стенки	Не менее 5
диаметр электродной проволоки, мм	1,2—3,2
Скорость подачи электродной проволоки (настраивается ступенчато), м/ч	100—350
Число электродов, шт.	1
Скорость наплавки, м/ч:	
по спирали	12—30
с колебательным движением электрода	6—12
Расход углекислого газа, л/мин	15—18
Масса установки, кг	1100

Для автоматической дуговой точечной сварки нахлесточных соединений плавящимся электродом в защитных газах в ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины создано следующее оборудование: манипулятор (робот) с одноэлектродной сварочной головкой УД-446; манипулятор (робот) с двухэлектродной сварочной головкой УД-424; подвесной аппарат с двухэлектродной сварочной головкой А-1731; многоточечный (шеститочечный) автомат широкого применения А-1781. Перечисленное оборудование предназначается для точечной приварки деталей толщиной от 1 до 6 мм в различных конструкциях. В месте сварки осуществляется прижим свариваемых элементов с усилием от 100 до 500 кг.

Сварочное оборудование работает в автоматическом режиме и может работать в установках или применяться в поточных линиях.

В настоящее время в сварочном производстве уделяется большое внимание применению промышленных роботов. В ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины создан робототехнологический комплекс дуговой сварки (РТК ДС) плавящимся электродом на базе серийно выпускаемого в НПО «Гранат» (г. Минск) промышленного робота РМ-01. Комплекс предназначен для сварки в защитном газе плавящимся электродом конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей с толщиной свариваемых элементов не менее 2 мм на токах до 500 А.

В состав РТК ДС входят робот промышленный универсальный РМ-01 (с системой управления «Сфера-36»), комплект сварочного оборудования разработки ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины, колонна для потолочной установки робота, вращатель изделия, основание.

Важной особенностью РТК ДС является возможность автоматической коррекции программы перемещения горелки

электродом

Способ регулирования скорости сварки (наплавки)	Тип источника питания	Габаритные размеры автомата (длина × × ширина × высота), мм	Масса, кг
П	ВДГ-1001	1070×770×1650	240
ка и слежения			
	ВДУ-601	410×410×700	60
—	ВДУ-601	610×1410×850	80
электродами			
С	ВДГ-1001	800×900×1960	325
П	ВСВУ-315	4600×2700×4400	2200
поиска и слежения			
П	ВДГ-1001	960×890×1650	350
П	ВДУ-601	440×500×1070	62
П	ВДУ-601	3700×1280×1355	1650
П	ВДУ-601	4060×4315×1810	3011
П	ВДУ-601	4060×4315×1810	3011
родами			
П	ВДУ-601	770×450×600	60
П	ВСВУ-315	450×470×400	27
электродом			
П/С	ВСЖ-303	420×220×285	13

(установочная адаптация) при сварке неточно изготовленных и собранных конструкций путем касания соплом горелки изделия перед сваркой. Техническая характеристика РТК ДС:

Робот РМ-01:	
число степеней подвижности	6
грузоподъемность, кг	2,5
погрешность воспроизведения программы перемещения, мм	±0,1
Сварочное оборудование:	
диапазон регулирования сварочного тока, А	60—500
диапазон диаметров стальной сплошной сварочной проволоки, мм	1,0—1,6
защитный газ	CO_2 или смесь газов Ar + CO_2

4.4.4. Автоматы для сварки в инертных газах неплавящимся электродом

Хотя наибольшее распространение в промышленности получили сварочные автоматы для сварки плавящимся электродом, при изготовлении сварных строительных конструкций применяются также автоматы для сварки в любом пространственном положении неплавящимся электродом с присадкой или без присадки неповоротных стыков труб. Наибольшее

2СИ и ОДА-3М, а также типа АСТ (АСТ-I и АСТ-II).

Автоматы типа ОДА предназначены для сварки без присадки неповоротных стыков труб диаметром 8—76 мм, толщиной стенки до 3,5 мм. Они снабжены механизмом стабилизации дуги. Механизмы головки размещены на скобе, приводимой в движение от приводного двигателя с помощью раздаточного шестеренчатого механизма. Переносные головки имеют небольшую массу (до 6 кг), малую установочную длину (до 100 мм) и малый радиус вращающихся частей (до 90 мм), позволяющие широко применять их в условиях монтажа.

Автоматы АСТ предназначены для сварки неповоротных стыков труб в монтажных (тип АСТ-II) и цеховых (тип АСТ-I) условиях. В зависимости от материала изделия они комплектуются источниками постоянного (АСТ-IC, АСТ-IT — для стали и титана) и переменного (АСТ-IA) тока. Автоматы позволяют сваривать трубы диаметром до 220 мм, толщиной стенки до 20 мм. Они снабжены механизмами подачи присадки, автоматическими регуляторами напряжения дуги и поперечных колебаний электрода. Для установки на трубу корпус автомата выполнен разъемным.

Для монтажной сварки неплавящимся электродом трубопроводов атомных электростанций разработан ряд малогабаритных автоматов, например АДГ-201 и АДГ-301. Автомат АДГ-201 предназначен для сварки труб диаметром 57—160 мм. В его состав входят источник питания — установка УДГ-201, аппаратура управления и четыре сменные сварочные головки. Головки имеют малую установочную длину (до 90 мм) и малый радиус вращающихся частей (93 мм в головке для сварки труб диаметром до 76 мм и 135 мм в головке для сварки труб диаметром до 160 мм), что позволяет вести сварку в затесненных условиях АЭС. Автомат АДГ-301 — тракторного типа. Трактор перемещается по направляющему зубчатому колесу, установленному на трубу. Автомат снабжен кольцами пяти типоразмеров, что позволяет вести сварку труб диаметром 219 — 1020 мм. На тракторе размещены механизм подачи присадочной проволоки, колебатель и механизм дистанционного управления присадкой. Автомат АДГ-301 снабжен специальной аппаратурой управления типа АУК-03 на базе микроЭВМ, позволяющей управлять сваркой с пульта управления либо вести сварку по программе, записанной перед сваркой, или по одной из программ, имеющихся в постоянном запоминающем устройстве.

Известны специализированные радиально-консольные автоматы АРК-3-11АВ и тракторы общего назначения АДСВ-6 (см. табл. 4.23).

4.4.5. Автоматы для дуговой сварки и наплавки без внешней защиты дуги и под флюсом плавящимся электродом

Автоматы этой группы нашли широкое применение при сварке листовых металлоконструкций, балок, резервуаров и др. Автоматы для дуговой сварки под флюсом используются в основном для сварки в нижнем положении прямолинейных и круговых стыков швов. Некоторые автоматы могут сваривать стыковые и угловые соединения. Достигается это путем установки сменных мундштуков и копирных устройств.

Технические характеристики автоматов для дуговой сварки без внешней защиты дуги и под флюсом плавящимся электродом приведены в табл. 4.24.

Сварочный трактор ТС-17МУ (АДФ-1002) для сварки плавящимся электродом изображен на рис. 4.17.

4.4.6. Автоматы для дуговой сварки с принудительным формированием плавящимся электродом

Отличительной особенностью данной группы автоматов является наличие формирующих приспособлений, которые удерживают на вертикальной, наклонной, горизонтальной

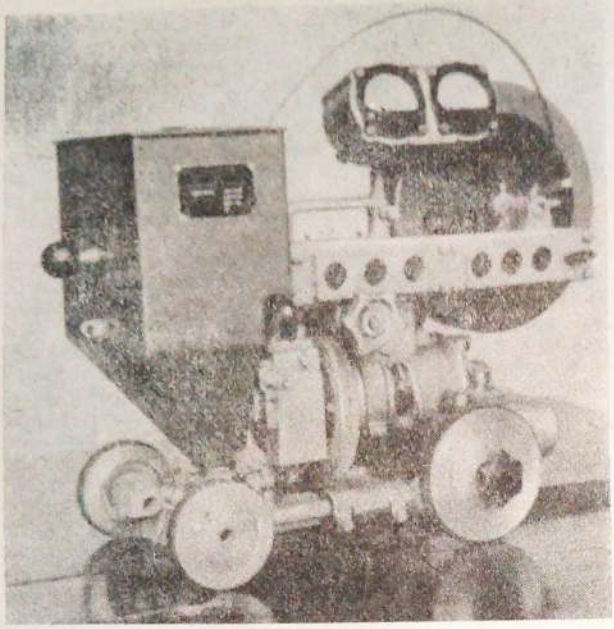


Рис. 4.17. Сварочный трактор ТС-17МУ (АДФ-1002).

плоскостях, а также на горизонтальном шве на вертикальной плоскости ванну расплавленного металла до ее затвердения. Автоматами для дуговой сварки с принудительным формированием обычно сваривают металл толщиной менее 20 мм. Технические характеристики автоматов для дуговой сварки с принудительным формированием приведены в табл. 4.25.

На рис. 4.18 показан трактор ТС-32 для дуговой сварки в нижнем положении с принудительным формированием плавящимся электродом.

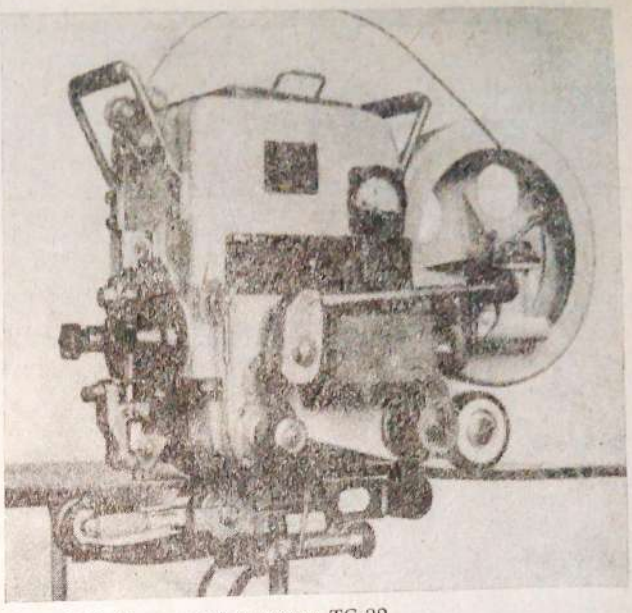


Рис. 4.18. Сварочный трактор ТС-32.

4.4.7. Автоматы для электрошлаковой сварки

Автоматы для электрошлаковой сварки применяют при соединении деталей практически неограниченной толщины начиная с 20 мм.

Технические характеристики автоматов для электрошлаковой сварки даны в табл. 4.26.

Таблица 4.24. **Технические характеристики автоматов для дуговой сварки и наплавки без внешней защиты дуги и под**

Тип	Номинальный сварочный ток при ПВ = 100 %, А	Исполнение	Защита зоны сварки (наплавки)	Число дуг	Электродная проволока		Способ регулирования скорости подачи	Скорость сварки (наплавки), м/ч
					Диаметр (ширина ленты), мм	Скорость подачи, м/ч		
				Автоматы общего назначения для сварки				
А1412	2×1600	Самоходный	Флюс	2	2,0—5,0	17—558	П	25—250
А1416	1000	»	»	1	2,0—5,0	47—508	С	12—120
	500	»	»		2,0—3,0			
				Автоматы общего назначения для сварки с автоматической системой				
АД202	1250	Подвесной	Флюс	1	2,0—6,0	41—410	П	—
АД203	1000		»	1	2,0—6,0	41—410	П	—
АД205	2×1600	Самоходный	»	2	2,0—6,0	41—410	П	25—250
АД206	2×1250		»	2	2,0—6,0	41—410	П	25—250
АД207	1250—1600	»	»	2	2,0—6,0	41—410	П	25—250
АД208	1250	»	»	1	2,0—6,0	41—410	П	12—120
АД209	1000	»	»	1	2,0—6,0	41—410	П	12—120
				Автоматы специализированные для сварки				
ГДФ-1001	1000	Подвесной	Флюс	1	3,0—5,0	53—532	П	—
УДФ-1001	1000	Самоходный	»	3 (2 электрода)	2,5—3	200—530	П	18—50
АДФ-2001	2000	Установка	»	1	3	—	—	200 сварок/ч
А1425	1000	Самоходный	»	1 (2 электрода)	4,0—5,0	50—500	П	12—120

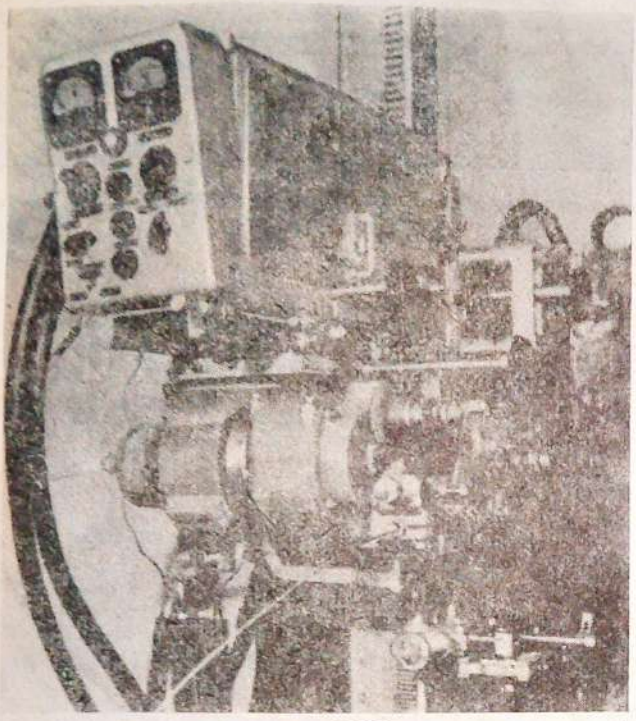


Рис. 4.19. Рельсовый автомат А1170 для электрошлаковой сварки проволочным электродом.

На рис. 4.19 представлен рельсовый автомат А1170 для электрошлаковой сварки проволочным электродом, а на рис. 4.20 — подвесной автомат А1304 для электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком.

флюсом плавящимся электродом

Способ регулирования скорости сварки (наплавки)	Тип источника питания	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
П	ТДФЖ-2002	1405×890×1920 (2 шт.)	390
С	ВДУ-1201 ВДУ-506	1070×845×1820	320
поиска и слежения			
—	ВДУ-1201	820×510×850	105
—	ТДФЖ-1002	820×510×850	105
П	ТДФЖ-2002	1500×700×2000 (2 шт.)	420
П	ВДУ-1201	1500×700×2000 (2 шт.)	420
П	ВДУ-1201 ТДФЖ-2002	1500×700×2000	420
П	ВДУ-1201	1500×700×2000	380
П	ТДФЖ-1002	1500×700×2000	380
—	ВДУ-1201	1050×1680×2000	298
П	ТШС-1000-3	1370×1270×2270	420
—	ТДФЖ-2002	950×1150×1850	430
П	ТДФ-1601	900×600×1650	500

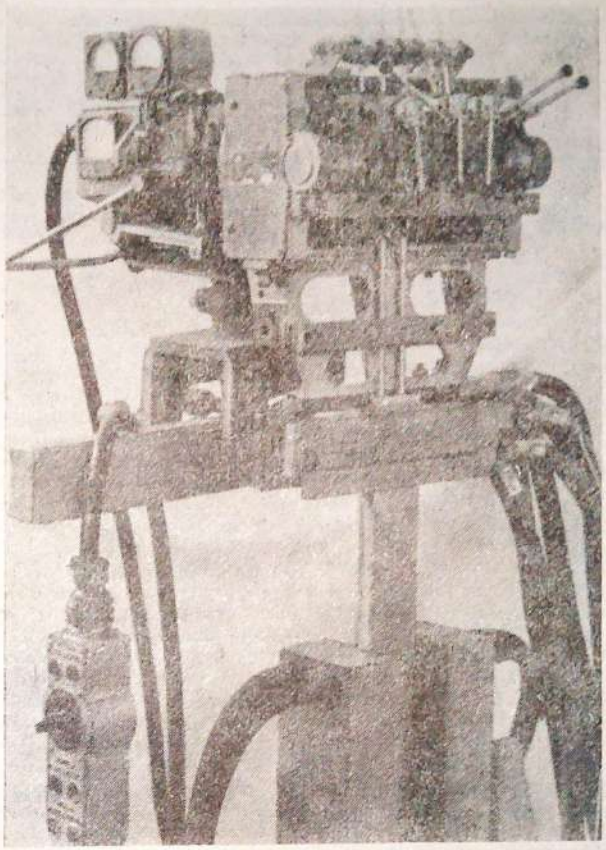


Рис. 4.20. Подвесной автомат А1304 для электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком.

4.5. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ, ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ И СВАРКИ ТРЕНИЕМ

Оборудование для контактной электрической сварки включает в себя машины, выполняющие соответствующее сварное соединение, и аппаратуру управления этими машинами. На контактные машины, включая системы управления общего назначения, предназначенные для сварки металлов и сплавов, распространяется ГОСТ 297—80 Е, полностью соответствующий СТ СЭВ 4439—83, а также международному стандарту ИСО 669—81 по ряду параметров, указанных в ГОСТ 297—80 Е.

4.5.1. Машины для контактной сварки

ГОСТом установлена классификация машин: а) по виду получаемых при сварке соединений — точечные, шовные, рельефные, стыковые; б) по конструктивному исполнению — стационарные радиального типа, стационарные прессового типа, подвесные с встроенным трансформатором, подвесные с отдельным трансформатором; в) по типу источника сварочного тока — переменного тока, низкочастотные, постоянного тока, конденсаторные; г) по типу усилия сжатия — с постоянным усилием, с переменным усилием; д) по нормируемым техническим требованиям — группы А (с повышенной

Тип	Номинальный сварочный ток при ПВ = 100 %, А	Исполнение	Защита зоны сварки (наплавки)	Число дуг	Электродная проволока		Способ регулирования скорости подачи	Скорость сварки (наплавки), м/ч
					Диаметр (ширина ленты), мм	Скорость подачи, м/ч		
Автоматы специализированные для сварки с автоматической системой поиска								
АД238Ф	2×1000	Самоходный двухкоординатный	Флюс	2	3,0—4,0	60—600	П	4—400
Автоматы общего назначения для наплавки								
А580М	400	Подвесной	»	1	1,0—3,0	48—408	С	—
А1231	1250	Самоходный	Флюс или без внешней защиты	1	4,0—6,0 (СП) 3,6—4,6 (ПР) 20—60 (лента)	5—50 23—230	П/С	6—58
Автоматы специализированные для наплавки								
А1406	1000	Подвесной	Флюс без внешней защиты или газ	1	2,0—5,0 2,0—3,0 (ПР) 20	13—133 53—532	П/С	—
А1409	315	»	Флюс или без внешней защиты	1	1,6—3,0	53—532	П	—
Тракторы общего назначения для сварки								
ТС-17МУ(АДФ-1002)	1000	»	Флюс	1	3,0—5,0	60—360	С	12—120
АДФ-1202	1250	—	»	1	2,0—6,0	60—360	П	12—120
Тракторы специализированные для сварки								
ТС-58	2×1250	—	»	2	3,0—6,0	60—360	С	10—100
ТС-33	800	—	По флюсу	1	1,2—3,0 (АЛ)	86—668	С	7,7—59,5

стабильностью параметров), группы Б (с нормальной стабильностью параметров).

В соответствии с ГОСТ 297—80 Е принято буквенное и цифровое обозначение машин для контактной сварки: первая буква всегда М — машина; вторая буква (при стыковой сварке — две буквы) обозначает способ сварки (и его разновидности): Т — точечная сварка, СО — стыковая оплавлением: третья буква (если она есть) определяет род сварочного тока (кроме переменного): В — машина постоянного тока (с выпрямлением тока во вторичном контуре), К — конденсаторная машина, Н — низкочастотная; либо эта третья буква свидетельствует о значительном числе одновременно свариваемых точек: М — многоэлектродная. Например: МТ — машина для точечной сварки, МРН — машина для рельеф-

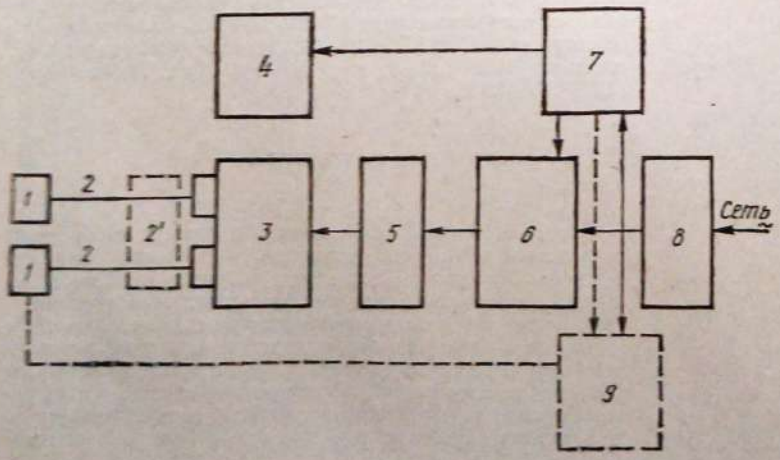


Рис. 4.21. Структурная схема электрического устройства машин для контактной сварки.

Продолжение табл. 4.24

Способ регулирования скорости сварки (наплавки)	Тип источника питания	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
слежения			
П	ТДФЖ-1002	4060×4315×1810	3100
—	ПСО-500	425×1200×1250	84
П	ВДУ-1201	1500×1000×2000	350
—	ВДУ-1001	920×980×1690	215
—	ВДУ-504	700×1395×1720	230
С	ТДФЖ-1002	715×345×540	45
П	ВДУ-1201	1100×450×770	78
П	ВДУ-1201 (2 шт.)	965×400×965	90
С	ПСГ-500	800×400×465	45

ной сварки низкочастотным током, МШК — машина для шовной сварки конденсаторная, МШВ — машина для шовной сварки постоянным током, МСС — машина для стыковой сварки сопротивлением, МТМ — машина для точечной сварки многоэлектродная.

В обозначение машины может дополнительно вводиться еще одна буква, определяющая специальное назначение машины или ее конструктивное исполнение. Например: МТВР — машина для точечной сварки постоянным током, радиального исполнения (т. е. с возможностью движения верхнего электрода не только по вертикали, но и по дуге в горизонтальной плоскости).

Кроме букв в обозначение машин входят цифры, показывающие наибольший вторичный ток в килоамперах (при замыкании электродов без свариваемого изделия между ними) и модель или исполнение машины (две последние цифры). Для машин стыковой сварки оплавлением вместо тока указывается усилие осадки в тысячах деканьютонов (даН). Например: МТ-4218 — машина для точечной сварки с наибольшим вторичным током 42 кА, модель 18; МШВ-7501 — машина для шовной сварки постоянным током с наибольшим вторичным током 75 кА, модель 1; МСО-402 — машина для стыковой сварки оплавлением с усилием осадки 4000 даН, модель 2.

По ранее действовавшим ГОСТ 297 цифровые обозначения были иными: по ГОСТ 297—61 цифра указывала номинальную мощность машины в киловольт-амперах, а по ГОСТ 297—80 Е цифры определяли номинальный сварочный ток в килоамперах при сварке изделий из низкоуглеродистой стали максимальной для данной машины толщины.

Общий вид одной из машин переменного тока для точечной сварки показан на рис. 4.23.

Типичная структурная схема электрического устройства машин для контактной сварки приведена на рис. 4.21. Электрический контур машины образует сварочный трансформатор *3*, от которого по токоподводам *2* сварочный ток попадает на электроды *1* разного типа в зависимости от вида машины (точечная, шовная, рельефная, стыковая). В машинах постоянного тока между трансформатором и токоподводами помещены блоки диодов *2'*. Напряжение питающей машину электрической сети поступает на контактор *6* через автоматический выключатель *8*. От контактора импульсы напряжения через переключатель ступеней вторичного напряжения (переключатель числа витков первичной обмотки трансформатора) *5* передаются на сварочный трансформатор *3*. Электрическое устройство привода движения и усилия *4* стыковой машины, состоящее из обмоток электромагнитов, пневматических, гидравлических клапанов и контакторов, электродвигателей движения (дополнительного хода) подвижных частей машины, в том числе электродных устройств, а также контактор *6* получают команды от блока управления циклом сварки *7* (регулятора цикла сварки), работа которого синхронизирована с частотой питающей электросети, что обеспечивает выполнение всех команд на исполнительные устройства *6* и *4* в строго определенные моменты времени синусоидального напряжения сети (периоды). Блок *7* управляет также работой привода роликов *9* в шовных машинах.

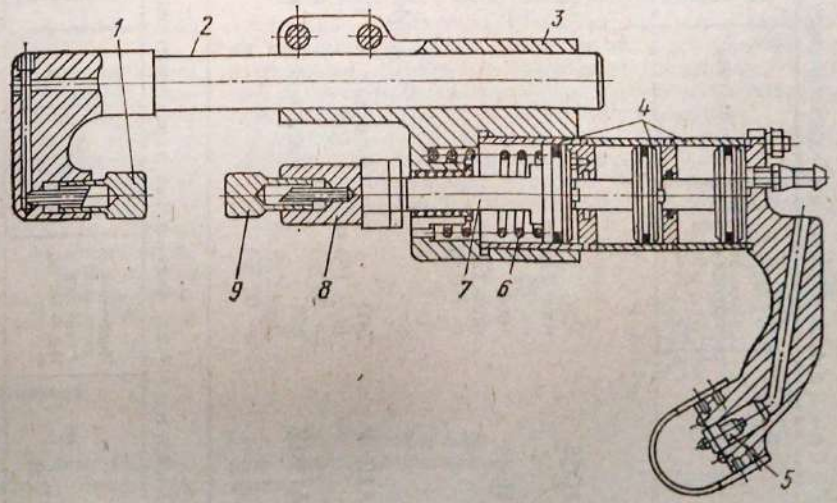


Рис. 4.22. Сварочные клещи с прямолинейным ходом электрода (прессового типа):
1, 9 — электроды; *2* — электрододержатель неподвижный; *3* — корпус; *4* — цилиндры пневматические; *5* — кнопка включения; *6* — пружина возврата штока и электрода; *7* — щиток; *8* — электрододержатель подвижный.

Таблица 4.25. **Технические характеристики автоматов для дуговой сварки плавящимся электродом с принудительным формированием**

Тип	Номинальный сварочный ток, А	Исполнение	Защита зоны сварки	Число дуг	Толщина свариваемого металла, мм	Электродная проволока: Диаметр, мм	Электродная проволока: Скорость подачи, м/ч	Способ регулирования скорости подачи	Скорость сварки, м/ч	Способ регулирования скорости сварки	Тип источника питания	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
Тракторы для сварки в нижнем положении													
ТС-32	1000 (при ПВ = = 100 %)	—	Флюс	1	3—12	2,0—5,0	137—284	С	24—50	С	ТДФ-1001	805×495×440	45
ТС-44	1600 (при ПВ = = 100 %)	—	»	1	10—20	3,0—6,0	60—360	П	8—45	П	ВДУ-1601	940×610×390	115
Автоматы для сварки вертикальных и наклонных стыковых швов													
А1150У	500 (при ПВ = = 60 %)	Безрельсовый	Газ	1	8—30	2,5—3,5 (ПР)	180—220	П	3—10	П	ВДУ-504	470×280×875	31,6
А1381М	450 (при ПВ = = 60 %)	Рельсовый	»	1	10—25	2,6—3,0 (ПР)	150—300	П	4—12	П	ПСГ-500	800×445×440	42,5

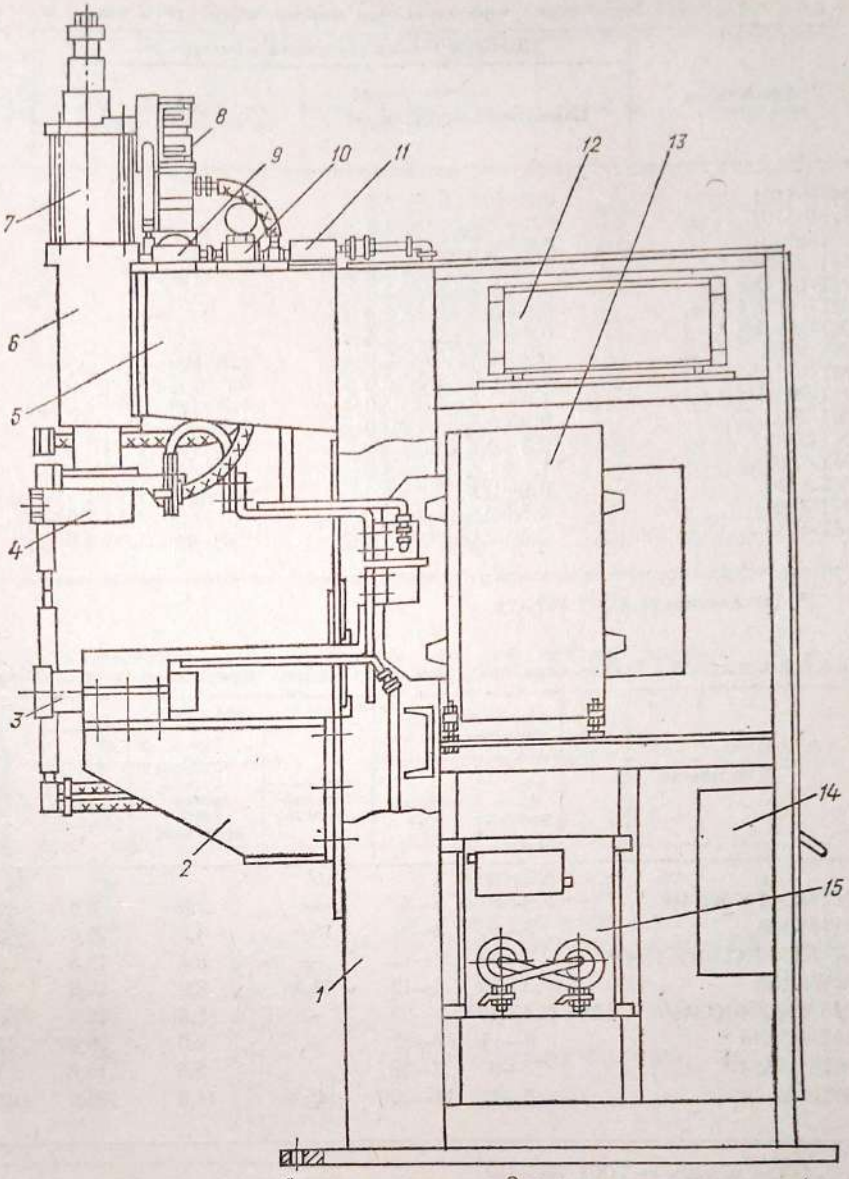
Таблица 4.26. **Технические характеристики автоматов для электрошлаковой сварки**

Тип	Номинальный сварочный ток при ПВ = 100 %, А	Исполнение	Число проволок	Толщина свариваемого металла, мм	Диаметр электрода, размеры пластины (ширина × толщина), мм	Скорость подачи электрода (пластины), м/ч	Способ регулирования скорости подачи	Скорость сварки, м/ч	Способ регулирования скорости сварки	Тип источника питания	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
Автоматы для сварки проволочным электродом												
А820МК *	700	Рельсовый	1	20—70	2,5—3,0	58—580	П	4,0—15,0	П	ВДУ-1001	350×250×650	20
А535	1000	»	3	30—450 300—800	3,0 ((80...200) × × 10) **	60—450 (0,4—9,0)	П	0,4—9,0	П	ТШС-1000-3	1600×820×1070	380
А1170	1000 1500	»	2 1	30—300	3,0—5,0	14—140	П	0,4—2,1	П	ТШС-1000-3	780×510×820	350
Автоматы для сварки плавящимся мундштуком												
А1304	3000 (сталь 9000) (алюминий)	Подвесной	1—4	До 400, До 140	3,0—6,0 (размеры пластины по изделию)	14—306	П/С	—	—	ПРМК-3000-1	500×400×800	45

* Автомат А820 МК может быть налажен для дуговой сварки.
** Для сварки пластинчатым электродом необходима переналадка автомата.

Рис. 4.23. Сварочная стационарная машина переменного тока для точечной сварки МТ-1818:

1 — корпус; *2* — кронштейн; *3* — нижняя консоль; *4* — верхняя консоль; *5* — верхний кронштейн; *6* — направляющее устройство; *7* — пневмопривод; *8* — пневмораспределитель; *9* — маслораспылитель; *10* — редуктор; *11* — фильтр; *12* — регулятор цикла сварки; *13* — сварочный трансформатор; *14* — автоматический выключатель; *15* — контактор.



Общий вид клещей подвесной машины переменного тока для точечной сварки приведен на рис. 4.22.

Технические характеристики машин переменного тока для точечной сварки приведены в табл. 4.27; машин переменного тока для многоэлектродной точечной сварки — в табл. 4.28; подвесных машин переменного тока — в табл. 4.29; сварочных клещей к подвесным машинам — в табл. 4.30; машин переменного тока для шовной сварки — в табл. 4.31; машин переменного тока для рельефной сварки — в табл. 4.32; машин постоянного тока для точечной сварки (в том числе подвесных) — в табл. 4.33; машин постоянного тока для шовной сварки — в табл. 4.34; машин для стыковой сварки — в табл. 4.35; сварочных трансформаторов, применяемых в машинах для контактной электрической сварки,— в табл. 4.36.

4.5.2. Аппаратура управления машинами для контактной сварки

Для включения (выключения) сварочных трансформаторов в машинах для контактной сварки имеются специальные устройства — контакторы. Значительная часть машин (кроме стыковых) снабжена контакторами с игнитронами или тиристорами. Игнитрон — газоразрядный прибор, способный пропускать большие токи при подаче соответствующей электрической команды на управляющий электрод.

Основные технические характеристики некоторых игнитронных контакторов приведены в табл. 4.37.

Более современными являются тиристорные контакторы. Тиристор — полупроводниковый прибор, проводящий

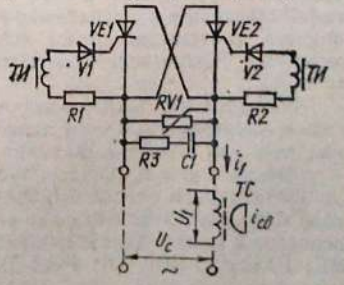


Рис. 4.24. Схема синхронного тиристорного контактора.

Таблица 4.27. Технические характеристики машин переменного тока для точечной сварки

Тип машины	Диапазон толщин свариваемого металла, мм		Ток, кА		
	Низкоуглеродистых сталей	Легированных сталей и титановых сплавов	наибольший вторичный	номинальный	
				длительный вторичный	сварочный
МТР-1201	0,2+0,2...2,5+2,5	—	—	—	6,6
МТР-1701	0,5+0,5...2,0+2,0	—	—	3,6	8
МТР-2401	0,5+0,5...2,5+2,5	—	24,0	—	16
МТ-1222У4 *	0,5+0,5...5,0+5,0	1,0+1,0	—	7,0	12,5
МТ-1614У4 *	0,5+0,5...5,0+5,0	—	—	7,0	16
МТ-1617У4 *	0,8+0,8...2,3+2,3	—	—	9,0	16
МТ-1618У4 *	0,8+0,8...2,5+2,5	—	—	9,0	16
МТ-1818	0,5+0,5...3,0+3,0	0,5+0,5...2,0+2,0	18,2	9,0	16
МТ-1927	0,5+0,5...4,0+4,0	0,5+0,5...1,5+1,5	19,3	9,0	16
МТ-2002У4 *	1,0+1,0...4,0+4,0	1,0+1,0...4,0+4,0	21,0	9,0	20,0
МТ-2023	0,8+0,8...3,0+3,0	0,5+0,5...3,0+3,0	20,0	6,3	12,5
МТ-2102	0,8+0,8...5,0+5,0	1,0+1,0...4,0+4,0	21,0	9,0	20,0
МТ-2827	1,0+1,0...6,0+6,0	1,0+1,0...2,5+2,5	27,8	14,0	—
МТ-4019	0,5+0,5...5,0+5,0	0,5+0,5...1,5+1,5	—	—	32
МТ-4021	0,5+0,5...8,0+8,0	0,5+0,5...5,0+5,0	40,0	12,5	—
МТ-4218	2,0+2,0...10,0+10,0	2,0+2,0...4,0+4,0	42,0	18,0	—

* Тип машины по ГОСТ 297—73.

Таблица 4.28. Технические характеристики машин переменного тока для многоэлектродной точечной сварки

Тип машины	Диаметр свариваемых прутков, мм		Ток, кА			Номинальная мощность, кВ · А	Усилие сжатия, даН	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
	поперечных	продольных	наибольший вторичный	номинальный					
				длительный вторичный	сварочный				
МТМС-10×35У4 *	3—6	3—8	—	2,8	8,0	255	200	2700×2440×1600	3200
МТМ-166	3—6	3—8	15,0	3,2	10,0	300	200	4762×2835×1670	6300
АТМС-14×75×7-1У4 *	3—10	3—12	—	3,6	12,5	500	500	4400×3442×1720	7500
МТМ-160	3—10	3—12	30,0	3,6	12,5	475	500	8970×3432×1714	8900
МТМК-3×100-4У4 *	4—12	5—25	—	5,6	12,5	300	1250	2000×3500×1500	3000
МТМ-32У4 *	8—14	12—32	—	9,0	20,0	1000	1000	2740×3580×1960	6000
МТМ-33У4 *	3—8	3—18	—	5,6	15,0	100	630	1600×1800×1750	1000
МТМ-35	6—12	14—40	45,0	14,0	25,0	1000	1000	1310×2460×1480	5000

* Тип машины по ГОСТ 297—73.

ток при подаче кратковременных импульсов небольшого тока на управляющий электрод. В синхронном тиристорном контакторе, схема которого приведена на рис. 4.24, применяется фазовое управление током, протекающим через обмотку трансформатора *ТС*. Контактор осуществляет включение трансформаторов в строго определенный момент времени, связанный с напряжением питающей сети U_c. Тиристорные контакторы имеют воздушное или водяное охлаждение. Технические характеристики их приведены в табл. 4.38.

В контактных электросварочных машинах применяют также электромагнитные контакторы (преимущественно в машинах для стыковой сварки).

Вместе с контакторами в системах управления машинами для стыковой сварки используются электронные регуляторы времени, обеспечивающие регулирование длительности периодов в цикле сварки, следующих типов: РКС-501; РКС-601; РКС-901; РВИ-501; РВИ-703; РВИ-801.

Таблица 4.30. Технические характеристики сварочных

Тип клещей	Диапазон толщин свариваемого металла, мм	
	Жесткий режим	Мягкий режим
КТГ-8-1	0,5+0,5...1,2+1,2	0,5+0,5...2,0+2,0
КТГ-8-2	0,5+0,5...1,2+1,2	0,5+0,5...2,0+2,0
КТГ-8-3	0,5+0,5...1,2+1,2	0,5+0,5...2,0+2,0
КТГ-8-4	0,5+0,5...1,5+1,5	0,5+0,5...1,5+1,5
КТГ-75-8	—	1,5+1,5
КТП-8-1	0,5+0,5...1,2+1,2	0,5+0,5...2,0+2,0
КТП-8-2	0,5+0,5...1,2+1,2	0,5+0,5...2,0+2,0
КТП-8-6	0,5+0,5...1,2+1,2	0,5+0,5...1,5+1,5
КТП-8-7	0,5+0,5...1,2+1,2	0,5+0,5...1,5+1,5

Номинальная мощность, кВ · А	Усилие сжатия, даН	Вылет электрода, мм	Раствор консолей, мм	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг	Аппаратура управления
15	200	250	—	—	165	—
35	500	400	270	410×410×1083	325	РЦС-403
82	630	500	150	—	410	—
60	630	500	150	1340×386×1900	445	РЦС-503
85	630	500	300	1340×430×1574	540	РЦС-403
100	630	370	50	1340×490×1810	800	РЦС-403
100	630	500	220	1470×450×2000	700	РЦС-403
105	630	500	320	1420×450×1960	600	РКС-601
110	630	500	320	1430×450×1800	730	РВИ-801
221	1200	1200	200	2500×600×2600	1880	БУ-625
100	1600	500	300	1620×474×2550	1120	РВИ-801
193	2000	1200	300	2370×570×2556	1690	РВИ-801
210	1250	500	540	1720×550×2290	1100	РВИ-801
350	1600	500	220	—	1300	—
260	1600	500	—	1600×550×2480	1150	РКМ-1201
400	2500	500	280	1650×590×2740	1450	РВИ-801

Таблица 4.29. **Технические характеристики подвесных машин переменного тока для точечной сварки**

Тип машины	Ток, кА			Мощность, кВ·А	Тип		Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг	Аппаратура управления
	наибольший вторичный	номинальный			привода **	клещей			
		длительный вторичный	сварочный						
МТП-1401 (803) У4 *	—	2,8	8,0	30	П	—	920×500×503	27	—
МТП-1210 *	—	—	6,3	25	Нет	Нет	410×355×125	230	—
МТП-2401 *	—	2,2	16,0	110	П	—	895×265×360	500	—
МТПГ-75—6 *	—	3,6	8,0	75	ПГ	КТГ-751, КТГ-75-3, КТТГ-75-5, КТГ-75-8	1274×600×2050	433	РВЭ-7-1А-2
МТП-1110	11,0	3,6	8,0	85	П	КТП-8-1, КТП-8-2, КТП-8-6, КТП-8-7	720×650×970	300	РКС-601
МТП-1111	11,0	3,6	8,0	85	Г	КТГ-8-1, КТГ-8-2, КТГ-8-3, КТГ-8-4	720×650×970	340	РКС-601
МТП-1409	14	5,6	12,5	170	Г	КТГ-12-3-1, КТГ-12-3-2	750×850×1160	440	РВИ-701

* Тип машины по ГОСТ 297—80 Е.
** Г — гидравлический, П — пневматический, ПГ — пневмогидравлический.

клещей к подвесным точечным машинам

Диапазон диаметров свариваемых стержней, мм		Вылет электрода, мм	Усилие сжатия, даН	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
Жесткий режим	Мягкий режим				
5,0+5,0...6,0+6,0	5,0+5,0...6,0+6,0	205	250	510×350×302	16
5,0+5,0...6,0+6,0	5,0+5,0...6,0+6,0	104	250	560×380×235	15
5,0+5,0...6,0+6,0	5,0+5,0...16+16	39	320	560×380×235	15
5,0+5,0...6,0+6,0	5,0+5,0...16+16	37	320	640×380×265	16
—	16+16	41	250	530×404×150	12,0
0,5+0,5...6,0+6,0	5,0+5,0...10+10	205	250	510×350×302	16
0,5+0,5...6,0+6,0	5,0+5,0...10+10	50	320	595×380×208	16
0,5+0,5...6,0+6,0	5,0+5,0...16+16	30	400	600×300×320	11,5
0,5+0,5...6,0+6,0	5,0+5,0...16+16	35	320	420×150×280	6

Таблица 4.31. Технические характеристики машин переменного тока для шовной сварки

Тип машины	Диапазон толщин свариваемого металла, мм	Ток, кА			Номинальная мощность, кВ · А	Усилие сжатия, даН	Вылет электрода, мм	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
		наибольший вторичный	номинальный						
			длительный вторичный	сварочный					
МШ-2201	0,5+0,5...1,5+1,5	22	—	—	105	500	400	—	—
МШ-2001	0,5+0,5...1,8+1,8	—	14,0	20	130	800	800	2395×720×2295	1350
МШ-3201	0,8+0,8...3,0+3,0	—	22,0	32	320	1250	800	2395×720×2360	1700
МШ-3207	0,5+0,5...3,0+3,0	—	22,0	32	270	1250	800	2130×650×2030	1550
МШ-3208	0,5+0,5...3,0+3,0	—	22,0	32	270	1250	800	2095×1025×2030	1550
МШ-3401	0,8+0,8...3,0+3,0	—	—	32	350	1250	400	—	—

Таблица 4.32. Технические характеристики машин переменного тока для рельефной сварки

Тип машины	Диапазон толщин свариваемого металла, мм	Ток, кА			Номинальная мощность, кВ · А	Усилие сжатия, даН	Вылет электрода, мм	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
		наибольший вторичный	номинальный						
			длительный вторичный	сварочный					
МР-3818	0,5+0,5...4,0+4,0	37,7	11,0	25	160	1600	300	1170×495×2560	1000
МР-2517У4 *	0,5+0,5...4,0+4,0	—	11,2	25	160	1600	300	2300×1650×550	1300
МР-6918	0,5+0,5...4,0...4,0	68,8	18	40	400	2500	300	1600×590×2740	1430
МР-6303У4 *	1,0+1,0...4,0+4,0	—	28	63	600	3200	300	1550×1030×3300	3000
МР-800 *	1,0+1,0...4,0+4,0	—	36	80	800	3200	300	1550×1030×3100	3000

* Тип машины по ГОСТ 297—80 Е.

Комплекс контактора и регулятора времени интервалов цикла сварки составляет прерыватель тока. Наибольшее распространение имеют прерыватели марок ПИТ, ПИШ, ПТИМ, ПСЛ, ПК и ПКТ, технические характеристики которых приведены в табл. 4.39. Для управления циклами сварки и регулирования тока электроконтактных машин постоянного тока промышленностью в настоящее время выпускаются комплектные шкафы: ШУ-341-1 и ШУ-342 — для шовных машин; ШУ-347 — для точечных машин. Этот шкаф имеет два исполнения: с блоком ампер-секундной защиты, предназначенным для ограничения максимальной длительности протекания сварочного тока, и без такого блока; ШУ-349 — для точечных и рельефных низкочастотных машин контактной сварки с переменным усилием.

Все названные шкафы выполнены на интегральных элементах. Основные технические характеристики этих шкафов приведены в табл. 4.40.

4.5.3. Установки для высокочастотной сварки

В числе рассматриваемого оборудования можно отметить разработанные ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины установки С-165, С-460 и СЛ-500 для изготовления тонкостенных спирально-шовных труб. Диаметры изготавливаемых труб 75—165, 100—450 и 450—3200 мм, толщина стенки от 0,4 до 3—4 мм, материал — сталь низкоуглеродистая и низколегированная, скорость сварки 20—60 м/мин.

Таблица 4.33. Технические характеристики машин постоянного тока для точечной сварки

Тип машины	Диапазон толщин свариваемого металла, мм			
	Низкоуглеродистых сталей	Нержавеющих легированных сталей	Жаропрочных легированных сталей и титановых сплавов	Алюминиевых сплавов
МТВ-4801	0,5+0,5...5+5	0,5+0.5...2,5+2,5	0,5+0,5...2,5+2,5	0,5+0,5...1,5+1,5
МТВР-6001	0,3+0,3...3,0+3,0	0,3+0,3...2,5+2,5	0,3+0,3...2,5+2,5	0,3+0,3...2,5+2,5
МТВР-4001У4 *	0,3+0,3...3+3	0,3+0,3...2,5+2,5	0,3+0,3...2,5+2,5	0,3+0,3...2+2
МТВ-5002 *	4+4...12+12	3+3...8+8	3+3...8+8	—
МТВ-6302 *	4+4...12+12	3+3...8+8	3+3...8+8	—
МТВ-8002	—	0,8+0,8...6+6	0,8+0,8...6+6	0,5+0,5...4,5+4,5
				Подвесные
МТПВ-808У4 *	0,5+0,5...1,5+1,5	0,5+0,5	0,5+0,5...0,8+0,8	—
МТПВ-1207У4 *	0,5+0,5...1,5+1,5	0,5+0,5	0,5+0,5...1,2+1,2	—

* Тип машины по ГОСТ 297—80 Е.
** Вторичный.

Таблица 4.34. Технические характеристики машин постоянного тока для шовной сварки

Тип машины	Диапазон толщин свариваемого металла, мм	Ток, кА			Номинальная мощность, кВ · А	Усилие сжатия, даН	Вылет электрода, мм	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
		наибольший вторичный	номинальный						
			длительный вторичный	сварочный					
МШВ-1601У4 *	0,3+0,3...3,0+3,0	—	11,2	16	133	2500	1500	2680×3320×960	3700
МШВ-7501	0,5+0,5...3,0+3,0	75	36	63	630	2500	1200	3415×1185×2955	4450
МШВ-6301-2У4 *	0,5+0,5...3,0+3,0	—	36	63	600	2500	1200	3510×2955×1165	7000
МШВ-8001	1,5+1,5...6,0+6,0	84	32	80	600	3200	1500	—	—

* Тип машины по ГОСТ 297—80 Е.

Установки могут быть применены при изготовлении различных трубопроводов, цилиндрических корпусов, емкостей, баллонов, заготовок под профильные трубы или изделия (например, квадратные, прямоугольные, треугольные), заготовок тонкостенных кольцевых деталей, Г-образного сечения каркасов уплотнительных воротниковых манжет и т. д.

Установки С-165, С-450 и СЛ-500 несложны по конструкции, что позволяет изготовлять их по чертежам института даже в ремонтных мастерских, просты в наладке и обслуживании, укомплектованы устройством для резки труб на мерные длины с применением аппарата воздушно-плазменной резки «Киев-4М» или аналогичного ему. Источником сварочного нагрева служит ламповый высокочастотный генератор ВЧС-4-160/0,44 или ВЧС-3-250/ 0,44, частота тока 440 кГц, мощность 160 или 250 кВт (в последнем случае скорость сварки может достигать 120 м/мин и более).

4.5.4. Оборудование для сварки трением

В зависимости от способа сварки трением машины можно разделить на конвекционные, осуществляющие конвекционную (обычную) сварку трением, и инерционные, осуществляющие инерционную сварку трением.

Основные конструктивные схемы машин обычного исполнения и инерционных подобны. Общими конструктивными узлами и системами в них являются передняя бабка с вращающимся зажимом, суппорт с невращающимся зажимом, привод усилий нагрева и проковки, привод вращения шпинделя, система управления.

По степени механизации и автоматизации машины для сварки трением можно разделить на автоматы и полуавтоматы. Собственно процесс сварки (нагрев, проковка) во всех машинах для сварки трением осуществляется автоматически. Но в полуавтоматах вспомогательные операции — загрузка заготовок и съем сваренных деталей — выполняются вручную (иногда в крупных машинах с применением средств малой механизации), тогда как в автоматах весь цикл сварки полностью автоматизирован.

По назначению машины для сварки трением делятся на машины общего применения (универсальные) и специализированные. Машины общего применения обычно являются полуавтоматами. Специализированные машины предназначены для сварки заготовок одного наименования (например, клапанов двигателей внутреннего сгорания, автомобильных карданных валов, заготовок режущего инструмента) или групп однотипных заготовок, близких по размерам. Такие машины могут быть как полуавтоматами, так и автоматами.

Машины для сварки трением разделяются также по конструктивным признакам. По расположению оси шпинделя в пространстве различают машины с горизонтальным и с вертикальным расположением оси; по подвижности — стационарные и переносные машины.

Большая часть машин для сварки трением — стационарные машины с горизонтальным расположением шпинделя и неподвижной передней бабкой. Благодаря горизонтальному расположению оси шпинделя они удобны для сварки длинных заготовок.

Машины с вертикальным расположением оси шпинделя занимают меньшую производственную площадь, однако они непригодны для сварки длинных заготовок из-за неудобства их закладки в машину и съема сваренных деталей.

Технические характеристики машин общего применения и специальных, разработанных и выпускаемых серийно, приведены в табл. 4.41 и 4.42.

Ток, кА			Номинальная мощность, кВ · А	Усилие сжатия, даН	Вылет электрода, мм	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
наибольший вторичный	номинальный						
	длительный **	сварочный					
48	14	48	250	1600	500	1825×750×2560	1550
48	14	40	350	1250	1200	3020×935×1641	2750
—	12,5	40	350	1250	1200	1640×3040×900	2640
—	22,4	50	300	6000	900	3610×1250×3525	6500
—	22,4	63	550	1000	1200	3070×1370×3525	7200
—	36	80	650	7200	1500	3750×1150×3455	7000
машины							
—	3,6	8	165	250	205	1750×1350×650	900
—	5,6	12,5	280	250	300	1750×1350×650	1000

Таблица 4.35. Технические характеристики машин для стыковой сварки

Тип машины	Сечение свариваемых изделий, мм²		Ток, кА			Мощность при сварке стали (наибольшая), кВ·А
	Сталь	Алюминий	наибольший вторичный	номинальный		
				длительный вторичный	сварочный	
К-584	Трубы 114—325	—	—	16,0	16,0	183
МС-502 У4 *	12—110	12—110	—	1,4	5,0	7,2
МСС-1401 (К802)	7—80	13—64	14	1,4	5,0	12,5
МСС-1901	7—80	12—63	19	—	—	12,2
МС-1602 У4 *	150—1400	—	—	7,2	16,0	100
МС-2008 М У4 *	До 2000	—	—	9,0	20,0	150
К190 П *	До 18 000	—	—	16,0	20,0	150
К617 У4 *	1000—4000	—	—	9,0	20,0	150
МСО-201	120—1400	—	—	—	45,0	—
МСО-202 (МС-802 У4 *)	38—110	—	21,4	2,8	8,0	24,5
МСО-402	До 1000	—	50	—	16,0	96,5
МСО-1603	До 4000	—	—	12,5	20,0	152
К724А	До 4000	—	—	9,0	20,0	112
К774А **	До 630	—	—	18	40	220
К747МВ ***	78	28	—	—	7	2
Н-149 4*	До 314	—	—	—	2	80

* Тип машины по ГОСТ 297—80 Е.
** Для сварки тавровых соединений.
*** Для ударной конденсаторной приварки шпилек.
4* Для дуговой приварки шпилек.
5* РП — ручной пружинный; РЭ — ручной эксцентриковый; РР — ручной рычажный; П — пневматический; ПП — пружинно-электромеханический.

Таблица 4.36. Технические характеристики сварочных трансформаторов для контактных машин

Тип	Ток во вторичной обмотке, кА	Напряжение холостого хода, В	Номинальная мощность, кВ·А	Номинальный режим работы ПВ, %	Число ступеней регулирования	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
ТК-301	5,6	3—5	40	50	4	470×235×184	80
ТК-302	6,4	5—7	63	50	4	560×235×184	100
ТК-401	7,1	7—10	100	50	4	695×235×184	135
ТК-3208-2эп	32	—	—	—	6	680×395×528	520
ТКА-16.05-2	16	—	—	20	8	476×260×448	117
ОВСК-25/75	25	6,3	75	50	8	436×168×595	110
ТПС-2000	0,25	0,8—7,8	—	40	8	240×182×335	42

Таблица 4.37. Технические характеристики игнитронных контакторов при ПВ=20 %

Тип		Номинальный ток, А	Мощность, кВ·А	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
контактора	игнитрона				
КИА-50-6	И-70/0,8	500	180	440×380×535	23
КИА-50-9	И-70/0,8	500	180	325×220×425	11
КИА-100	И-140/0,8	1050	380	420×286×500	24
КИА-100-9	И-140/0,8	1000	380	425×250×560	16
КИА-200	И-350/0,8	1800	650	465×330×615	38

Усилие, даН		Привод **		Производительность, сварок/ч	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
зажатия	осадки	зажатия	осадки			
125 000	49 000	Г	Г	10—15	1810×1050×1170	2900
500	70	РП	РП	200	930×755×1180	185
2500	1000	П	ПП	120	600×1070×1300	490
300	—	РЭ	РП	20	—	—
7500	500	РП	РП	60	1000×775×1700	750
10 000	6300	П	ЭМ	80	2040×1170×1350	2050
180 000	80 000	Г	Г	12	3240×1060×2200	7000
32 000	16 000	Г	Г	30	1450×1600×1850	3660
—	20 000	—	—	140	—	730
2500	2000	РЭ	РП	150	1175×1030×2070	340
6300	4000	РЭ	РР	60	—	750
—	16 000	—	—	120	—	3790
32 000	16 000	Г	Г	30	2080×1375×2281	4700
2×10 000	10 000	Г	Г	80	2400×950×1525	2700
0,02	5	Ц	ПЭ	600	725×600×950 (источника) 235×80×220 (пистолета)	120 1,2
150	3	РП	ПЭ	608	1000×600×800 (источника) 270×160×230 (пистолета)	190 2,3

ный (отвод пневматический); ПЭ — пружинный (отвод электромагнитный); Г — гидравлический; Ц — цанговый с пружиной; ЭМ —

Таблица 4.38. Технические характеристики тиристорных контакторов

Наименование показателей	КТ-1	КТ-03	КТ-04	КТ-07	КТ-11	КТ-12
Номинальный ток, А:						
при длительности импульса тока 0,5 с:						
ПВ = 20 %	280	850	1400	480	1000	1750
ПВ = 50 %	230	800	1300	260	800	1500
при длительности импульса тока 2 с, ПВ = 50 %	200	700	1200	250	800	1300
Тип тиристора	ТВ-200	ТВ-500	ТВ-500	Т171-320	ТВ-500	ТВ-800

Таблица 4.39. Технические характеристики прерывателей тока

Тип прерывателя	Номинальный коммутируемый ток, А		Тип вентильного контактора	Пределы плавной регулировки сварочного тока, %	Стабилизация сварочного тока при колебаниях напряжения сети, %	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
	Точечная сварка	Шовная сварка					
ПИШ-50-4	—	200; 400; 800	Игнитронный	50—100	+5...—8	450×600×1610	135
ПИШ-100-4	—	200; 400; 800	»	50—100	+5...—8	450×600×1610	135
ПИШ-200-4	—	200; 400; 800	»	50—100	+5...—8	450×600×1610	135
ПИТ-50-4	500; 1000	—	»	50—100	+5...—8	450×600×1610	135
ПИТ-100-4	500; 1000	—	»	50—100	+5...—8	450×600×1610	135
ПИТМ-50-5	500; 1000; 2000	—	»	50—100	+5...—8	450×600×1610	135
ПИТМ-100-5	500; 1000; 2000	—	»	50—100	+5...—8	450×600×1610	135
ПИТМ-200-5	500; 1000; 2000	—	»	50—100	+5...—8	450×600×1610	135
ПСЛ-200	250	200	Тиристорный	30—100	±5	350×660×1250	95
ПСЛ-300	750	300	Игнитронный	30—100	±5	350×660×1250	105
ПСЛ-600	1500	600	»	30—100	±5	350×660×1250	112
ПСЛ-700	750	700	Тиристорный	30—100	±5	350×660×1250	110

Тип прерывателя	Номинальный коммутируемый ток, А		Тип вентильного контактора	Пределы плавной регулировки сварочного тока, %	Стабилизация сварочного тока при колебаниях напряжения сети, %	Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
	Точечная сварка	Шовная сварка					
ПСЛ-1200	1300	1200	Игнитронный	30—100	±5	350×660×1250	110
ПК-200	370	210	Тиристорный	30—100	±3	350×690×1250	85
ПК-1200	1300	—	»	30—100	±3	350×690×1250	125
ПКТ-1200	1300	—	»	30—100	±3	430×690×1650	125

Таблица 4.40. **Технические характеристики шкафов управления**

Тип шкафа	Регулирование сварочного цикла		Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	Масса, кг
	Позиция	Длительность позиции, период сети (0,02 с)		
ШУ-341-1	Диапазон:			
	I	0—99	1250×660×360	100
	II	0—198		
ШУ-342	«Предварительное сжатие»	1—99	430×700×1645	120
	«Сжатие»	1—99		
	«Проковка»	1—99		
	«Начало ковки»	0—99		
ШУ-347	«Предварительное сжатие»	1—99 через 1 период	430×700×1645	125
	«Сжатие»	2—198 через 2 периода		
	«Проковка»	4—396 через 4 периода		
		0—98 через 1 период		
	«Начало ковки»	0—198 через 2 периода		
		0—396 через 4 периода		
ШУ-349	«Предварительное сжатие»	1—99	430×700×1645	125
	«Сжатие»	1—99		
	«Проковка»	1—99		
	«Начало ковки»	0—99		

Примечание. Пределы регулирования сварочного тока: I диапазон — 50—75 %; II диапазон — 75—100 %.

Таблица 4.41. **Технические характеристики серийных машин общего применения для сварки трением [22]**

Наименование показателей	МСТ-23	МСТ-35	МСТ-41	МСТ-51	СТ-102	МСТ-20-01-1	МСТ-20-01	СТ-107	МСТ-120-01	ПСТ-1,6
Номинальная мощность, кВт	10	22	40	75	37	22	40	55	160	20
Максимальное осевое усилие, кН:										
при проковке	50	100	200	400	200	200	200	500	1200	15
при нагреве	25	50	100	200	100	100	100	300	450	—
Частота вращения шпинделя, $с^{-1}$	25	16,6	12,5	8,3	12,5; 16,5 (сменные шкивы)	16,6	12,5	11,2; 18 (сменные шкивы)	5	41,6; 52,5; 66,6; 83,3 (сменные шкивы)
Диаметр стержневых свариваемых заготовок, мм:										
из легированных сталей										
минимальный	10	16	22	32	16	16	16	25	45	8
максимальный	20	30	40	56	40	32	40	60	90	15
из низкоуглеродистых сталей										
минимальный	10	16	22	32	16	16	16	25	45	8
максимальный	25	36	50	70	50	36	50	70	100	16

Продолжение табл. 4.41

Наименование показателей	МСТ-23	МСТ-35	МСТ-41	МСТ-51	СТ-102	МСТ-20-01-1	МСТ-20-01	СТ-107	МСТ-120-01	ПСТ-1,5
Максимальный диаметр, мм:										
трубчатых свариваемых заготовок	32	39	52	75	100	100	100	120	200	25
дисков при сварке Т-образных соединений	110	180	180	320	180	180	180	—	360	—
Длина свариваемых заготовок, мм:										
вращающейся										
минимальная	45	50	60	65	95	70	70	100	160	50
максимальная	600	500	900	1200	900	900	900	900	1500	900
невращающейся										
минимальная	50	60	70	80	100	80	80	120	300	—
максимальная					Не ограничена					
Установочный ход зажима, мм	30	40	50	70	400	400	400	550	800	—
Тип привода осевого усилия	Пневмогидравлический				Гидравлический					Пневмогидравлический
Габаритные размеры машины (без шкафа управления), мм:										
длина	1875	1800	2150	2910	3330	3240	3240	3380	7800	1750
ширина	580	720	770	1110	1240	1260	1260	2170	1880	1400
Масса машины (без шкафа управления), кг	2000	2700	3600	5500	4650	6600	6100	8130	39 000	2000
Условная производительность, сварок/ч	До 150	До 120	До 100	До 70	До 120	До 120	До 120	До 150	До 50	140—200

Таблица 4.42. **Технические характеристики специального оборудования для сварки трением, выпускаемого серийно [22]**

Наименование показателей	МФ-327	МФ-362	МСТ-120-02	МСТ-120-03
Номинальная мощность, кВт	10	10	200	160
Максимальное осевое усилие, кН:				
при проковке	50	50	1200	1200
при нагреве	50	50	450	450
Частота вращения шпинделя, $с^{-1}$	25	25	5	6
Диаметр свариваемых заготовок, мм:				
минимальный	10	10	—	73
максимальный	22	22	—	168
Тип осевого усилия	Пневмогидравлический		Гидравлический	
Габаритные размеры:				
длина	2570	2570	7800	7800
ширина	900	900	1880	1800
Масса машины (без шкафа управления), кг	1900	1900	39 000	39 000
Производительность, сварок/ч	160	140	До 50	До 50
Назначение	Полуавтоматическая сварка заготовок режущего инструмента	Полуавтоматическая сварка режущего инструмента (установлен узел для удаления грата)	Полуавтоматическая сварка заготовок электродов из алюминия со стальными стержнями	Полуавтоматическая сварка бурильных труб с наконечниками

Примечание. Расположение оси шпинделя у этих типов машин горизонтальное.

4.6. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГАЗОВОЙ, ЛАЗЕРНОЙ, ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ И СВАРКИ, МЕТАЛЛИЗАЦИИ И ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

4.6.1. Машины для кислородной, плазменной и лазерной резки

В строительстве достаточно широко используется кислородная и плазменная резка, а сейчас начинает внедряться и лазерная резка. На заводах металлоконструкций, в заготовительных цехах строительно-монтажных организаций устанавливаются стационарные машины для термической резки. Машинная резка может исключить операцию разметки листа, исключить или уменьшить припуски на рез, кромка которого в ряде случаев не требует последующей обработки. Кроме этого машинная резка обеспечивает экономию металла и существенное повышение производительности труда, в том числе за счет снижения трудоемкости заготовительных работ и возможности проведения одновременно многорезаковой резки по заданным контурам.

Машины для кислородной резки могут резать углеродистые стали толщиной до 300 мм несколькими резаками, в том числе и с V- или X-образной подготовкой кромок под сварку одновременно с резкой. Они дешевле плазменных и лазерных и более просты в обслуживании, зато машины плазменной и лазерной резки обеспечивают наивысшую производительность при резке практически любых металлов.

Плазменная резка — это термическая резка электрической дугой, столб которой сжат с помощью сопла горелки, потока газа или внешним электромагнитным полем. За счет высокой концентрации тепловой энергии при плазменной резке обеспечивается более высокое качество вырезаемых заготовок и большая производительность, чем при других способах резки.

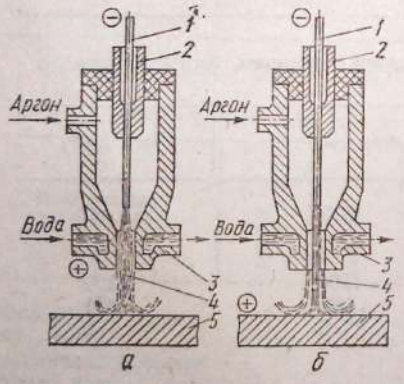


Рис. 4.25. Получение дуговой плазменной струи косвенного (*а*) и прямого (*б*) действия:

1 — электрод вольфрамовый; *2* — токоподвод; *3* — сопло; *4* — столб дуги; *5* — изделие.

Плазменную резку классифицируют по способу перемещения плазмотрона на ручную и механизированную, по способу получения плазмы — на плазменную резку дугой прямого действия и плазменную резку дугой косвенного действия (рис. 4.25); по способу сжатия дуги — с аксиальной подачей плазмообразующего газа, с тангенциальной и с дополнительной фокусировкой сжатой дуги; по роду тока — постоянным, переменным, трехфазным током, импульсным и др.

Оборудование для плазменной резки состоит из плазмотрона (режущий инструмент), источника питания электрической дуги, блока управления процессом, газового хозяйства, системы охлаждения, механизма перемещения плазмотрона вдоль линии реза. Плазмотрон имеет два основных узла: электродный и сопловой. Эти узлы снабжены устройствами для подачи рабочей среды и подвода тока, а также системами охлаждения, регулирования электрода, крепления плазмотрона и т. д.

Источники питания для плазменной резки имеют повышенное напряжение холостого хода — от 170 до 500 В при крутопадающей внешней статистической характеристике.

Блок управления процессом резки содержит приборы для включения тока и его регулирования, для управления подачей газа, для контроля водоохлаждения, для измерения параметров резки и т. д. Газовое хозяйство состоит из баллона с плазмообразующим газом, редукторов, ротаметров, газовых коммуникаций. Система охлаждения содержит водозаборную, водоразборную арматуру, коммуникации и др.

Наиболее широко распространены портальные машины кислородной и плазменной резки: а) линейные портальные кислородные типа ПКЛ для раскроя листов на заготовки прямоугольной формы, без применения копирующих устройств; б) портально-консольные с системой фотокопирования по кипер-чертежу в масштабе 1 : 1 (кислородные типа ПкК, плазменные типа ПкПл) — для использования в производствах с объемом обработки металла от 5 до 10 тыс.т в год; в) портальные масштабные с ситемой фотокопирования по кипер-чертежу в масштабах 5 : 1 или 10 : 1 (кислородные типа ПКФ, плазменные типа ППлФ) — для любых объемов металлообработки; г) снабженные установкой для числового программного управления (УЧПУ), используемые обычно в поточно-механизированных линиях обработки металла (кислородные типа ПКЦ, плазменные типа ППлЦ); д) машины-роботы (условное название), наиболее удобные для использования в гибких автоматизированных производствах (кислородные типа ПКЦ, плазменные типа ППлЦ). Кроме портальных имеются стационарные шарнирные и переносные машины. Шарнирные машины (кислородные типа АСШ, плазменные типа ШПл) занимают минимальную рабочую площадь, наиболее просты в обслуживании, требуют минимальных затрат на приобретение и установку и в то же время обеспечивают достаточно высокую точность реза при работе по стальному магнитному копиру.

Переносные машины незаменимы в условиях любой строительно-монтажной площадки для резки листов на заготовки прямолинейной или круговой формы, а также для резки

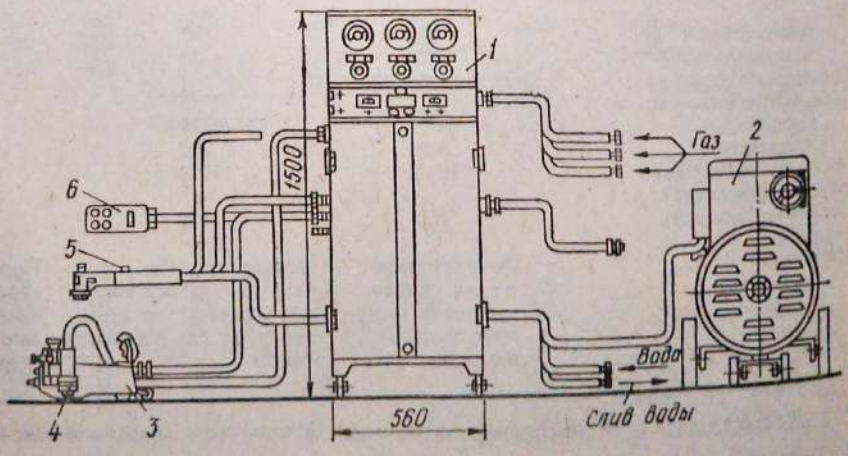


Рис. 4.26. Переносной общего назначения полуавтомат для резки ПВП-1:

1 — однорезаковая переносная машина; *2* — машинный резак; *3* — ручной резак; *4* — переносный пульт дистанционного управления; *5* — пульт управления; *6* — источник питания.

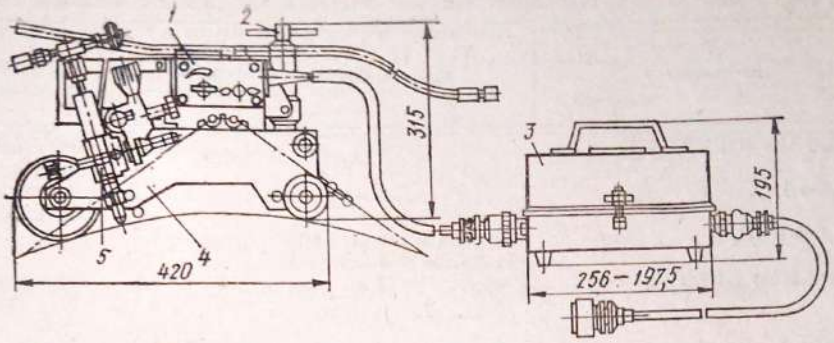


Рис. 4.27. Переносной полуавтомат для резки труб «Спутник-3»:
1 — ведущий механизм; 2 — натяжное устройство; 3 — блок электропитания; 4 — тележка; 5 — державка.

труб. При этом резке подвергается достаточно много марок сталей и цветных металлов.

Машины для кислородной, лазерной и плазменной резки согласно ГОСТ 5614—74 подразделяются по следующим признакам: способу установки (стационарные и переносные); конструктивной схеме (П — портальные, Пк — портально-консольные, Ш — шарнирные); способу резки (К — кислородные, Кф — кислородно-флюсовые, Пл — плазменные, Гл — газолазерные); системе контурного управления или способу движения (Л — линейные, М — магнитные для фигурной резки; Ф — фотокопировальные для фигурной резки, Ц — цифровые программные для фигурной резки); способу движения переносных установок (Р — по разметке, П — по циркулю, Н — по направляющим, Г — по гибкому копиру).

Условные обозначения всех перечисленных признаков, кроме способа установки, приводятся в обозначении типа (марки) машины, например ПКЦ 3,5-6-1-ВДК означает, что это портальная машина для резки кислородом с цифровой программной системой управления; ПкПл-2-6Ф-2 обозначает портально-консольную машину для плазменной резки с фотокопировальным устройством и т. п.

Класс точности машин определяется также по ГОСТ 5614—74, качество реза — по ГОСТ 14782—80.

Схема устройства переносной машины общего назначения ПВП-1 показана на рис. 4.26, переносной машины для резки труб — на рис. 4.27. Основные технические характеристики стационарных машин приведены в табл. 4.43—4.45, переносных машин — в табл. 4.46 и 4.47.

Ниже даны основные технические характеристики портальной линейной (раскройной) машины «Днепр-2,5-К2»:

Класс точности	2
Размер листа, мм, не более,	8×2,5
Толщина металла, мм, не более:	
вертикальная резка	160
со скосом кромок	80
Скорость резки, м/мин	0,05—2
Число резаков	6
Потребляемая мощность, кВт	1,2
Габаритные размеры (с рельсовым путем), мм	4400×10 000×2000
Масса, кг:	
комплекта	2785
ходовой части	1500

4.6.2. Установки для плазменной резки

В условиях строительно-монтажных площадок использование стационарных машин исключается, поэтому кроме названных выше переносных машин здесь можно использовать мобильные установки для плазменной резки листового металла и труб, основные технические характеристики которых приведены в табл. 4.48.

Следует отметить также аппарат «Киев-4М», предназначенный для автоматической и полуавтоматической воздушно-плазменной резки металлов толщиной до 90 мм. Он представляет собой мобильную установку, состоящую из источника питания, пульта дистанционного управления, водоохлаждаемых машинного и ручного резаков, соединительных и питающих коммуникаций, комплекта запасных деталей, в том числе сменных электродов.

Схема питания аппарата построена на трехфазном индуктивно-емкостном преобразователе и имеет три фиксированные ступени рабочего тока (100, 200 и 315 А) со ступенчатым автоматическим наращиванием до установленного значения. Резонансный режим работы обеспечивает стабилизацию установленного тока резки в рабочем диапазоне напряжения на дуге (130—200 В). Техническая характеристика аппарата:

Номинальная потребляемая мощность, кВ · А	77
Напряжение холостого хода, В	220±10
Рабочее напряжение на дуге, В	130—200
Ток резки (переключаемые ступени), А	100, 200, 315
Коэффициент мощности	0,9
Коэффициент полезного действия	0,9
Максимальная толщина разрезаемого листового металла, мм:	
стали	90
алюминия	80
меди	60
Расход плазмообразующего воздуха (при избыточном давлении 0,4—0,6 МПа), м³/ч	2,5—3
Расход охлаждающей воды (при избыточном давлении 0,3—0,4 МПа), м³/ч	0,3—0,5
Габаритные размеры, мм:	
аппаратного шкафа	700×840×1550
пульта управления	500×400×230
резака ВПР-15	диаметр 65, h = = 8150 с коммуникациями
Масса, кг:	
аппаратного шкафа, не более	830
пульта управления	20
ВПР-15 с коммуникациями, не более	14,2

Малогабаритный переносной пульт управления может быть установлен вблизи рабочего места. В пульте размещены блок поджига дуги (осциллятор), системы газо- и водоснабжения плазмотрона и панель подключения его питающих коммуникаций, приборы контроля параметров режима сварки.

Плазмотрон ВПР-15 (для машинной и ручной резки) надежен в работе, возможна быстрая замена отработавших электрода и сопла, продолжительность службы которых в среднем составляет рабочую смену.

Скорость воздушно-плазменной резки сталей толщиной 6—20 мм в 3—4 раза выше скорости газокислородной резки, и, кроме того, при воздушно-плазменной резке нет необходимости в дорогостоящем кислороде.

Аппарат «Киев-4М» разработан ИЭС им. Е. О. Патона совместно с ИЭД АН Украины. Серийный выпуск аппаратов

Таблица 4.43. Технические характеристики стационарных машин с числовым программным управлением

Тип машины	Класс точности	Размеры листа м, не более	Толщина металла, мм не более	Скорость резки, м/мин
«Искра-2,5К» (ПКЦ2,5-6-1)	1	8×2,5	Вертикальная резка — 100, со скосом кромок — 80	0,05—6
ПКЦ3,5-6-1	1	8×3,5	Вертикальная резка — 100, со скосом кромок — 80	0,05—6, маршевая До 10
ПКЦ3,5-6-1-ВДК	При скорости до 4 м/мин — 1, свыше 4 м/мин — 2	8×3,5	100	0,05—6, маршевая до 10
«Искра-2,5Пл» (ППлЦ-2,5-6-1)	1	8×2,5	При резке с края листа — 100, при резке с пробивкой — 40	0,05—6
ППлЦ-3,5-6	1	8×3,5	100	0,05—6
«Бирюза-2» (ПГл-1,8-5Ц)	При скорости 2 м/мин — 1, свыше 2 м/мин — 2	6×1,8	5	0,2—5
«Севан» (ПГлЦ-2-4-1)	1	2×2	Углеродистая сталь — 3	0,05—4

• Длина × ширина × высота.

Таблица 4.44. Технические характеристики стационарных машин с фотокопировальным устройством

Тип машины	Класс точности	Масштаб копирования	Размеры листа, м, не более	Толщина металла, мм, не более	Скорость резки, м/мин
«Аист» (ПкПл2-6Ф-2)	2	1 : 1	8×2	Сталь — 60, алюминий — 70, медь — 40	0,1—6
«Лори» (ПкК2-4Ф-2)	2	1 : 1	8×2	100	До 1,6
ПКФ2,5-2-2	2	—	8×2,5	Сталь — 100	0,07—2
ПКФ2,5-2-2-10	2	10 : 1 5 : 1	8×2,5	Вертикальная резка — 100, со скосом кромок — 80	2
ПКФ3,5-2-2-10	2	10 : 1 5 : 1	8×3,5	Вертикальная резка — 100, со скосом кромок — 80	0,07—2
ППлФ2,5-6	2	10 : 1 5 : 1	8×2,5	Сталь, алюминий — 100	0,05—6

Таблица 4.45. Технические характеристики шарнирных машин с магнитокопировальным устройством

Тип машины	Класс точности	Число резаков	Наибольшие размеры вырезаемых изделий, мм	Толщина металла, мм, не более
ШПл1-4М-1	1	—	1,5×0,75 или 1×1	Сталь аустенитная — 100, алюминий — 100, медь — 80
«Огонек» (ШКМ1-1,6-1)	1	1—3	1×1 или диаметром сечения	Сталь углеродистая: 1 резак — 200 3 резака — 100
АСШ-В	1 резак — 1 3 резака — 3	1—3	1,5×0,75 или 1×1 1,3×0,4 или диаметром сечения 0,4	Сталь углеродистая: 1 резак — 150 3 резака — 100

Таблица 4.46. Технические характеристики переносных машин общего назначения

Тип машины	Способ резки	Наибольшая толщина металла, мм			Скорость резки, м/мин	Максимальный рабочий ток, А, при ПВ, %	
		углеродистая и легированная сталь	алюминий	медь		60	100
ПРП-2	Пл	—	80—120	—	0,04—4	500	400
ПВП-1	Пл	—	25—50	—	0,04—4	250	315
«Микрон-2-02»	Пл	40	40	20	0,05—4	250	200
ПВП-В	Пл	20—25	—	—	0,04—4	200	160
«Гугарк»	К	300	—	—	0,05—1,6	—	—

Число резаков	Наибольшая мощность, кВ·А	Номинальный рабочий ток, А	Габаритные размеры (с рельсовым путем) *, мм	Масса, кг	
				комплекта	ходовой части
—	3,5	—	4500×11 800×2000	3300 без УЧПУ	1500
1—3	2,0	—	5600×1000×2200	3300	2000
—	3,5	—	5600×11 500×2200	3500	2000
2	243,5	400	5500×11 760×2200	4200 без источников питания	—
—	123	400	5500×12 120×2100	5100	2420
—	25,0	—	3100×16 000×3100	—	1350
—	19,5	—	3500×3500×1500	1850	—

Число резаков	Потребляемая мощность, кВт	Номинальный рабочий ток, А	Габаритные размеры с рельсовым путем, мм	Масса, кг	
				комплекта	ходовой части
2	155	300	5650×10 400×2000	3900	670
1—4	1,0	—	Площадь 58 м²	2500	900
2	2,5	—	4400×11 500×1800	3450	2300
2	2,5	—	4400×11 500×1800	3650	2450
1—3	2,5	—	5600×11 500×1800	3850	2650
—	123	400	5650×10 400×2000	5000	2500

Скорость резки, м/мин	Диаметр магнитного пальца, мм	Потребляемая мощность, кВт	Габаритные размеры при раздвижных рамах, мм	Масса, кг, не более
0,1—1,6	14	120	1910×9504×1800	Машины — 332, установки «АПР-402» — 1000
0,05—1,6	—	0,1	1500×1500×1700	С циркулярным устройством — 130, без устройства — 121
0,1—1,6	12	0,1	1910×950×1800	350

Габаритные размеры, мм		Масса, кг		Источники питания
машины	пульта управления	машины	пульта управления	
445×180×254	560×500×1500	23	130	1635 (ПД-502, 3 шт.)
445×180×254	560×500×1500	23	130	1635 (ПД-502, 3 шт.) 400 (УПР-201)
200×450×185	350×400×350	20	30	500
445×180×254	560×500×1500	23	130	840 (ПД-305 или ПСО-315) 400 (УПР-20Т)
Ходовой части 420×420×220	Блока питания 260×200×180	Комплекта 44		—

Таблица 4.47. Технические характеристики переносных машин для резки труб

Тип машины	Способ резки	Размеры разрезаемых труб, мм: диаметр	Размеры разрезаемых труб, мм: толщина стенки	Скорость резки, м/мин	Число резаков (плазмотронов)	Потребляемая мощность, кВт	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
«Спутник-БМ»	К	194—1620	5—75	0,1—1,2	1	0,11	Ходовой части с блоком резки 344×518×447	Комплекта 33
«Орбита-БМ»	К	530; 720; 820; 1020; 1220; 1420	5—75	0,1—1,2	2	0,11	Ходовой части с блоком резки 344×518×447	Комплекта 105
«Спутник-3»	К	194—1620	5—75	0,15—0,75	1	0,11	Самоходной тележки 420×470×315	Самоходной тележки (без рукавов) 20,8, блока питания (без кабелей) 5,7
«Орбита-2»	К	530; 729; 820; 1020; 1220; 1420	5—75	0,18—0,48	2	0,055	Ходовой части 670×450×270	Ходовой части с электроприводом 21, с ручным приводом 25; блока питания 18,5
«Орбита Пл1-НУ2»	Пл	1020; 1220; 1420	16—40	0,18—1	1	44,5	Контейнера не более 300×1500×1800	1824
«Орбита-Пл»	Пл	До 1420	16—40	До 1	1	—	—	—

Таблица 4.48. Технические характеристики установок для воздушно-плазменной резки

Наименование показателей	Для ручной резки листов: УПР-202УХЛ4	Для ручной резки листов: УПР-203УХЛ4	Для механизированной резки листов: УПРП-201У3	Для механизированной резки листов: УПО-201УХЛ4	Для резки труб ПЛ1-Н
Номинальный сварочный ток, А, при ПВ = 60 %	200	200	200	200	200
Потребляемая мощность, кВ · А	105	63	44	60	—
Толщина листового металла, мм, не более:					
стали	40	40	50	40	—
алюминия	50	50	50	40	—
меди	—	—	—	20	—
Размеры труб, мм:					
диаметр	—	—	—	—	1020; 1220; 1420
толщина стенки	—	—	—	—	16—40
Габаритные размеры, мм	640×735×1200	640×735×1200	930×620×1110	950×690×1170	3000×1500×1800
Масса, кг	480	420	500	535	1824

Таблица 4.49. Технические характеристики комплектов и установок для сварки, пайки и резки

Наименование показателей	Тип комплекта: КГС-1-02	Тип комплекта: КГС-2-02	Тип комплекта: КГС-2А	Тип установки: ПГУ-3	Тип установки: ПГУ-3-02	Тип установки: УГПР
Толщина, мм:						
стали при сварке	0,5—7	2—17	0,5—30	4	0,5—4	—
стали при резке	3—50	3—100	3—70	12	3—30	250
чугуна при резке	—	—	—	—	—	200
Давление кислорода, МПа:						
при сварке	0,15—0,25	0,2—0,35	0,15—0,35	0,05—0,4	0,24—0,4	1
при резке	0,25—0,42	0,25—0,5	0,3—0,6	0,3—0,4	—	—
Давление ацетилена, МПа:						
при сварке	0,001—0,1	0,001—0,1	0,001—0,1	—	—	—
при резке	0,001—0,1	0,01	0,001	—	—	0,03

Наименование показателей	Тип комплекта			Тип установки		
	КГС-1-02	КГС-2-02	КГС-2А	ПГУ-3	ПГУ-3-02	УГПР
Давление пропан-бутана, МПа	—	—	—	0,003	0,003	—
Расход кислорода, м³/ч:						
при сварке	0,065—0,65	0,026—1,8	0,65—2,65	0,05—0,84	0,11—0,7	—
при резке	1,9—7	1,9—9	3—10	2—3	1,8—4,8	40
Расход ацетилена, м³/ч:						
при сварке	0,06—0,62	0,25—1,75	0,065—2,5	—	—	—
при резке	0,35—0,7	0,35—0,7	0,4—0,6	—	—	1,3
Расход пропан-бутана, м³/ч:						
при сварке	—	—	—	0,025—0,2	0,03; 0,195	—
при резке	—	—	—	0,025—0,2	0,2—0,4	—
Расход флюса, кг/ч	—	—	—	—	—	6—24
Габаритные размеры, мм	380×305×80	380×305×80	426×276×75	420×280×560	430×292×586	500×400×1150
Масса, кг	3,45	4,8	4,85	22	27,5	20

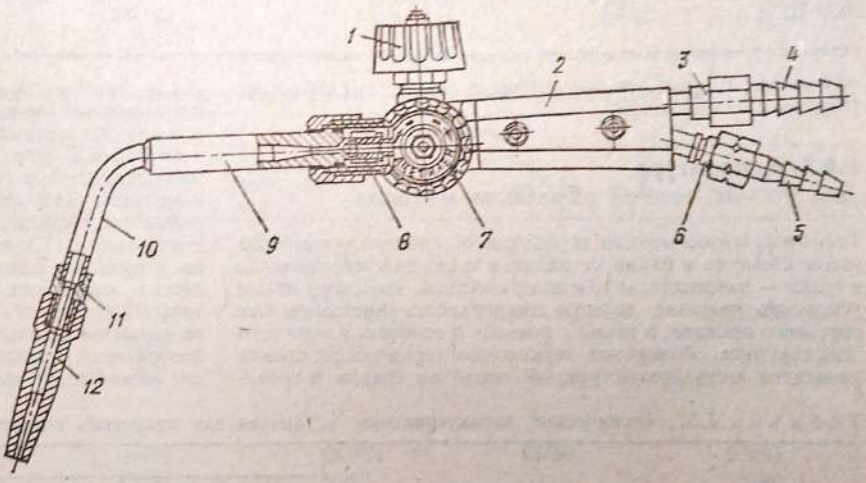


Рис. 4.28. Горелки Г2-04 и Г3-03:

1 — вентиль кислорода; *2* — корпус; *3* — трубка со штуцером; *4, 5* — ниппели с накидными гайками; *6* — трубка со штуцером для подачи ацетилена; *7* — вентиль ацетилена; *8* — инжектор; *9* — камера смесительная; *10* — трубка; *11* — ниппель; *12* — мундштук.

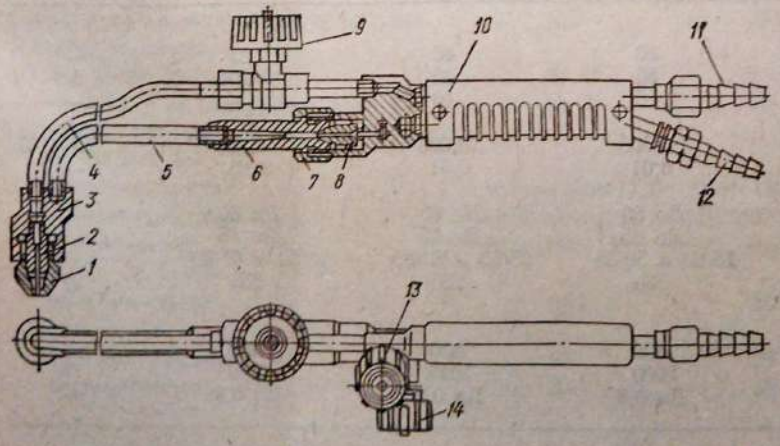


Рис. 4.29. Резаки Р2А-01 и Р3П-01:

1, 2 — мундштуки; *3* — головка; *4* — трубка для подачи режущего кислорода; *5* — трубка для подачи горючей смеси; *6* — смесительная камера; *7* — накидная гайка; *8* — инжектор; *9* — вентиль; *10* — ствол; *11* — ниппель кислорода; *12* — ниппель горючего газа; *13* — вентиль кислорода; *14* — вентиль горючего газа.

Таблица 4.50. **Технические характеристики горелок и резаков**

Тип горелки и резака	Назначение	Толщина металла, мм	Давление, кислорода	Давление, ацетилена
				Горелки
Г2-04	Сварка, пайка и подогрев	0,2—0,7	0,15—0,25	0,001—0,1
Г3-03	» »	0,5—30	0,15—0,35	0,001—0,1
ГЗУ-2-0,2	Сварка, пайка и наплавка	0,5—7	0,2—0,3	—
ГЗУ-4	Подогрев для правки, наплавки и пайки	—	0,2—0,4	—
ГВ-1	Нагрев до 300 °С металлов и пластмасс	—	—	—
ГАО-2-72	Очистка поверхности на ширине 110 мм (за один проход)	—	0,4	0,01
ГЗУ-3	Сварка, пайка и наплавка	0,5—7	0,1—0,4	—
ГН-2	Газопорошковая наплавка	Слой 0,3—2	0,2—0,35	0,01
ГН-4	То же	—	0,4—0,6	0,01—0,07
				Резаки
РПК-2-72	Поверхностная резка углеродистой и низколегированной стали	—	0,6—1	—
РПА-2-72	То же	—	0,6—1	0,01
РВ1А-0,2	Резка низколегированных сталей	3—100	0,25—0,5	0,001—0,1
РВ2Л-0,2	Резка низкоуглеродистых сталей	3—200	0,25—0,75	0,001—0,1
РЗР-2	То же	300—800	0,5—0,75	—
РК-0,2	»	10—200	0,35—0,75	—
РГС-70	»	3—70	0,3—0,6	0,001
РГМ-70	»	3—50	0,3—0,6	0,001

«Киев-4М», плазмотронов и сменных деталей к ним освоен Опытным заводом ИЭС.

4.6.3. Аппаратура для газопламенной обработки металла

Термином «газообменная обработка» обозначают технологию газовой сварки и пайки металлов, а также газовой наплавки и резки — разделительной и поверхностной, имеющую целью устранить внешние дефекты с поверхности листового или сортового проката, а также с поковок и отливок. Кроме того этим термином обозначают технологию термической правки элементов металлоконструкций после их сварки и проведения низко- или высокотемпературного нагрева изделий перед сваркой, во время ее проведения или после окончания, а также технологию кислородно-флюсовой резки аустенитных сталей и чугуна (установка типа УГПР). Для достижения поставленных задач применяется различная аппаратура: комплекты газосварочной аппаратуры для ручной сварки и пайки металлов, а также резки углеродистых сталей (комплекты типа КГС); специальные установки для сварки, пайки и ручной разделительной резки углеродистых сталей в местах, удаленных от источников газопитания (установки типа ПГУ); горелки для сварки, пайки, наплавки и подогрева черных и цветных металлов, а также пламенной очистки поверхности металлов от ржавчины, окалины и старой краски; резаки для ручной резки (разделительной и поверхност-

Таблица 4.51. **Технические характеристики установок для получения ацетилена**

Наименование показателей	Тип установки			
	ОКП-364561 3401	ОКП 364561 3301	УСН-20-3	УАС-5
Производительность по ацетилену, м³/ч:				
растворенному	80	40	20	—
газообразному	80	40	20	5
смеси растворенного и газообразного	80	40	—	—
Давление ацетилена, МПа:				
рабочее	0,008	0,008	0,008	0,02—0,07
наибольшее	0,01	0,01	0,01	—
Температура, °С:				
воды в газообразователе	До 80	До 80	До 80	—
ацетилена на выходе	До 35	До 35	До 35	До 35
Размер кусков карбида кальция, мм	25/50 и 50/80	25/50 и 50/80	25/50 и 50/80	25/80
Количество одновременно загружаемого карбида кальция, кг	500	250	250	22
Расход воды в газообразователе, л/ч:				
с использованием осветленной воды	1600	800	400	—
без использования осветленной воды	2000	1000	500	75
Содержание влаги после сушки, г/м³	До 0,8	До 0,8	До 0,8	—

МПа			Расход		Длина горелки, резака, мм	Масса, кг, не более
пропан-бутана	природного газа	керосина	кислорода, м³/ч	горючего газа или керосина, кг/ч		
—	—	—	0,35—0,65	0,03—0,62	455	0,49
—	—	—	0,065—2,65	0,06—2,5	601	0,95
—	0,001	—	0,09—1,26	0,025—0,83	456	0,55
—	0,02	—	1,4—6,4	0,35—4,27	605	1
0,1—0,15	—	—	—	0,67—1,7	855	1,4
—	—	—	2,2	2	1290	2
0,001	—	—	0,105—1,35	0,025—0,9	545	1,26
—	—	—	0,35—0,6	0,35—0,6	510	1
—	—	—	1—1,4	0,8—1,1	470	1,3
—	0,2	—	72	4—5	1350	2,5
—	—	—	72	1,2	1350	2,5
—	—	—	1,8—8,5	0,4—0,7	290	0,52
—	—	—	1,8—17	0,4—1,1	290	0,55
0,05	—	—	43,7—114,5	2,5—7	1000	5,3
—	—	0,15—0,3	3—25	0,5—1,5	615	1,53
—	—	—	3—10	0,4—0,6	282	0,61
—	—	—	3—8	0,3—0,6	262	0,54

Таблица 4.52. **Технические характеристики стационарных ацетиленовых генераторов среднего давления**

Наименование показателей	Тип генератора			
	АСК-3-74	АСК-4-74	АСК-5	АСП-1,25-7
Номинальная производительность, м³/ч	10	10	5	1,25
Давление ацетилена, МПа:				
рабочее	До 0,07	0,015—0,04	0,02—0,07	0,01—0,15
наибольшее	0,15	0,07	—	—
Количество карбида кальция, загружаемого в реторты, кг	50	50	11	3,7
Размеры кусков карбида кальция, мм:				
основные	25/80	25/80	25/80	25/80
допустимые (50 %)	15/25	15/25	—	2/25
Расход воды на одну загрузку карбида кальция, л	200	200	75	—
Расход воды на охлаждение реторт, л/ч	370	370	—	—
Температура ацетилена, °С:				
на выходе из реторты	До 90	До 90	—	—
на выходе из газообразователя	До 35	До 35	—	До 35
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм:				
газообразователя	1850×1350×1715	2350×1350×1715	—	—
водяного раствора	920×490×330	766×535×242	1770×900×1540	465×390×1000
влагосборника	900×240×152	900×240×152	—	—
Масса, кг, не более:				
газообразователя	485	505	Без воды и карбида	—
водяного раствора	58	35	То же	18,3
влагосборника	27	27	180	—

Таблица 4.53. **Технические характеристики установок для осушки ацетилена**

Наименование показателей	Тип установки	
	УО-20	УО-60М
Пропускная способность (по ацетилену в режиме осушки), м³/ч	20	60
Расход воздуха на регенерацию, м³/ч, не менее	20	60
Давление, МПа:		
ацетилена рабочее	—	До 2,5
ацетилена расчетное	—	2,5
воздуха на регенерацию	—	0,6
азота на продувку	—	0,6
Содержание водяных паров (при нормальных условиях), г/м³	—	0,5
Температура регенерируемого воздуха на входе, °С	—	250
Количество ацетилена, осушаемого адсорбером за один цикл, м³, не менее	7500	15 000
Габаритные размеры, мм, не более	1500×1000×1920	1500×1000×2800
Масса, кг, не более	1080	1400

ной) низкоуглеродистых и легированных сталей и других металлов.

Основные технические характеристики упомянутых комплектов и установок приведены в табл. 4.49.

Схема общего вида горелок Г2-04 и Г3-03 показана на рис. 4.28, а резаков Р2А-01 и Р3П-01 — на рис. 4.29.

Основные технические характеристики горелок и резаков приведены в табл. 4.50.

4.6.4. Оборудование газопитания

Для получения из карбида кальция и воды газообразного или растворенного, а подчас — и того и другого одновременно — ацетилена, предназначенного для газопламенной обработки металлов, используют либо стационарные, либо небольшие переносные высокопроизводительные установки или генераторы, основные технические характеристики которых приведены в табл. 4.51 и 4.52.

Получаемый таким образом ацетилен часто нуждается в осушке, так как его влажность выше допустимой при газопламенных работах. В таких случаях ацетилен высокого давления, поступающий из компрессорных установок, подвергается осушке в специальных стационарных установках, например типа УО-20 или УО-60М, технические характеристики которых приводятся в табл. 4.53.

В целях подачи из распределительной сети (коммуникаций) кислорода и ацетилена используют специальные газоразборные рампы, или посты, основные технические характеристики которых приведены в табл. 4.54.

Кислородные посты ПТК предназначены для подачи из сети кислорода на один пост газопламенной обработки металлов, ацетиленовый пост ПГА-3,2-70 обеспечивает питание одного рабочего места газопламенной обработки, а посты ПГ-3,2 и ПГУ-5 имеют дополнительные назначения: ПГ-3,2 обеспечивает защиту ацетиленопроводов и аппаратов от проникновения в них кислорода и воздуха и ударной волны ацетилено-кислородного пламени; ПГУ-5 защищает газопровод от обратных ударов пламени.

Основные технические характеристики ацетиленовой разрядной рампы РАР-15 с защитным устройством, предназначенной для подачи ацетилена в сеть потребления, приводятся ниже:

Наибольшая пропускная способность (при максимальном рабочем давлении), м³/ч	15
Рабочее давление ацетилена в трубопроводе, МПа:	
до редуктора	3
после редуктора	0,02—0,1
Расчетное давление, МПа:	
до редуктора	30
предохранительного затвора	2,5
Число присоединяемых баллонов	12
Габаритные размеры, мм	4500×430×2200
Масса, кг, не более	80

Для хранения и транспортировки сжатых, сжиженных и растворенных газов под давлением при температуре от —50 до +60 °С применяют стальные баллоны. Основные размеры газовых стальных баллонов по ГОСТ 949—73 приведены в

Таблица 4.54. **Технические характеристики газоразборных постов**

Наименование показателей	Тип кислородного поста		Тип ацетиленового поста		
	ПГК-10-73	ПГК-40-73	ПГА-3,2-70	ПГ-2,2	ПГУ-5
Пропускная способность, м³	10	50	3,2	3,2	5
Рабочее давление, МПа					
кислорода					
на входе	0,2—1,6	0,3—15	—	—	—
на выходе	0,01—0,5	0,1—1,2	—	—	—
ацетилена	—	—	До 0,07	0,03—0,15	0,03—0,15
Сопротивление потоку (при номинальной пропускной способности), МПа	—	—	0,006	0,025	0,025
Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм	335×400×220	335×400×220	800×282×185	410×190×150	425×182×150
Масса, кг	6,8	6,8	14,2	4,5	6,4

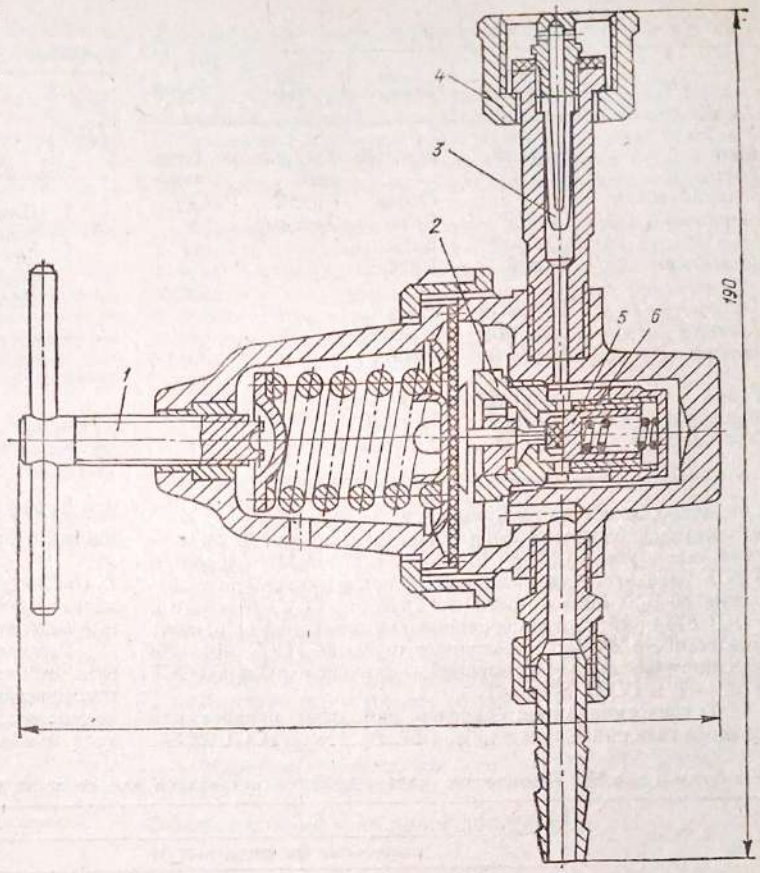


Рис. 4.30. Редуктор баллонный одноступенчатый БКО-25-1:
1 — регулирующий винт; *2* — седло; *3*, *6* — фильтры; *4* — гайка накидная; *5* — редуцирующий клапан.

табл. 4.55. Условия хранения баллонов должны соответствовать требованиям ГОСТ 15150—69 (группа Ж2).

Окраска баллонов, определяющая их по заполняющему газу, регламентируется ГОСТ 949—73 (табл. 4.56).

Баллоны для ацетилена изготовляются по ГОСТ 949—73. Давление газа в баллоне должно быть не более 1,9 МПа при температуре 20 °С. Места клеймения на баллонах обводятся красной краской.

Баллоны для пропан-бутана изготовляются по ГОСТ 15860—84 сварными из спокойной или полуспокойной стали. Вместимость баллонов от 2,5 до 80 л.

Маркировка баллонов содержит товарный знак изготовителя, номер баллона, дату изготовления, дату следующего испытания, вид термообработки, давление (Р — рабочее, П — пробное), емкость в литрах, массу баллона, клеймо ОТК, индексы климатического исполнения.

Коммуникационные трубопроводы для подачи горючих газов на рабочие места сварочных участков проектируются с учетом рабочего давления, расхода и вида газа, а также расстояния от ввода до потребителя.

В соответствии с ГОСТ 12.2.008—75 для газовых коммуникаций должны применяться следующие материалы:

Таблица 4.55. **Основные размеры стальных газовых баллонов**

Вместимость баллона, л	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки баллонов, мм					Длина корпуса баллона, мм				
		из углеродистой стали			из легированной стали		из углеродистой стали			из легированной стали	
		при давлении, МПа									
		10	15	20	15	20	10	15	20	15	20
5	140	3,1	4,4	5,7	3,1	3,9	460	475	495	460	470
8	140	3,1	4,4	5,7	3,1	3,9	680	710	740	680	700
10	140	3,1	4,4	5,7	3,1	3,9	830	865	900	830	850
12	140	3,1	4,4	5,7	3,1	3,9	975	1020	1060	975	1005
20	219	5,2	6,8	8,9	5,2	6,0	730	740	770	730	730
25	219	5,2	6,8	8,9	5,2	6,0	890	900	935	890	890
32	219	5,2	6,8	8,9	5,2	6,0	1105	1120	1165	1105	1105
40	219	5,2	6,8	8,9	5,2	6,0	1350	1370	1430	1350	1350
50	219	5,2	6,8	8,9	5,2	6,0	1660	1685	1755	1660	1660

Таблица 4.56. **Окраска газовых баллонов**

Газ	Цвет баллона	Цвет надписи	Цвет полосы	Резьба
Азот	Черный	Желтый	Коричневый	Правая
Аргон:				
технический	»	Синий	Синий	»
чистый	Серый	Зеленый	Зеленый	»
Ацетилен	Белый	Красный	—	Левая
Бутан	Красный	Белый	—	»
Водород	Зеленый	Красный	—	»
Воздух	Черный	Белый	—	Правая
Гелий	Коричневый	»	—	»
Кислород	Голубой	Черный	—	»
Углекислота	Черный	Желтый	—	»

для кислородных коммуникаций и коммуникаций газов — заменителей ацетилена при рабочем давлении до 2,45 МПа — стальные трубы по ГОСТ 10704—76 и резиновые рукава по ГОСТ 9356—75; для кислородных коммуникаций при давлении до 6,28 МПа — стальные трубы по ГОСТ 8732—78 и ГОСТ 8734—75; для кислородных коммуникаций при давлении свыше 6,28 МПа — латунные трубы по ГОСТ 494—76; для ацетиленовых коммуникаций — стальные трубы по ГОСТ 8732—78 и ГОСТ 8734—75.

Технические характеристики резиновых рукавов для подвода газа приведены в табл. 4.57. Рукава по ГОСТ 9356—75 предназначены для работы при наружной температуре от 50 до —85 °С.

Таблица 4.57. **Технические характеристики резиновых рукавов**

Тип рукава	Назначение	Рабочее давление, МПа	Цвет
I	Для ацетилена и городского газа	0,63	Красный
II	Для жидкого топлива (керосина, бензина)	0,63	Желтый
III	Для кислорода	0,20	Синий

Примечание. Внутренний диаметр рукавов всех типов — 6; 9; 12 и 16 мм.

4.6.5. Регулирующая и коммуникационная аппаратура

В состав регулирующей и коммуникационной аппаратуры входят разного рода редукторы, смесители газов и баллонные вентили.

Газовые редукторы служат для понижения давления газа, отбираемого из баллона или питающей системы, и автоматического поддержания рабочего давления постоянным. Редукторы классифицируются по принципу действия — прямого и обратного действия; по числу камер редуцирова-

Таблица 4.58. **Технические характеристики редукторов для горючих газов**

Тип редуктора	Давление, МПа									
	наибольшее (на входе)					рабочее				
	кислорода	ацетилена	пропан-бутана	водорода	метана	кислорода	ацетилена	пропан-бутана	водорода	метана
Баллонные газовые одноступенчатые										
БКО-25-1	20	—	—	—	—	0,1—0,8	—	—	—	—
БАО-5-1	—	2,5	—	—	—	—	0,01—0,12	—	—	—
БПО-5-1	—	—	2,5	—	—	—	—	0,01—0,3	—	—
ДВП-2-80	—	—	—	20	—	—	—	—	0,1—1,5	—
Баллонные газовые двухступенчатые										
ДКД-8-65	20	—	—	—	—	0,05—0,8	—	—	—	—
ДАД-1-65	—	2,5	—	—	—	—	0,01—0,12	—	—	—
Сетевые газовые										
ДКС-66	1,6	—	—	—	—	0,01—0,5	—	—	—	—
ДАС-66	—	0,12	—	—	—	—	0,01—0,1	—	—	—
ДМС-66	—	—	—	—	0,3	—	—	—	—	0,02—0,15
ДПС-66	—	—	0,3	—	—	—	—	0,02—0,15	—	—
Рамповые кислородные										
ДКР-250	20	—	—	—	—	0,3—1,6	—	—	—	—
ДКР-500	20	—	—	—	—	0,3—1,6	—	—	—	—
ДКР-6000У	20	—	—	—	—	0,3—2,5	—	—	—	—
Рамповые для горючих газов										
РАД-30-1	—	3	—	—	—	—	0,02—0,1	—	—	—
Газовые высокого давления										
ДК-40	20	—	—	—	—	1—4	—	—	—	—

ния — одно- и двухкамерные; по роду редуцируемого газа; по способу установки — баллонные, центральные, рамповые, сетевые.

Кислородные редукторы окрашиваются в голубой цвет, ацетиленовые — в белый, пропан-бутановые — в красный.

Смесители газов предназначены для получения смеси двух или трех газов и способны поддерживать заданный состав такой смеси независимо от изменений давления газов на входе в смеситель и расхода смеси.

Баллонные вентили являются запорными устройствами баллонов при их наполнении и хранении.

Схема устройства одноступенчатого баллона редуктора БКО-25-1 для понижения давления кислорода приведена на рис. 4.30. Постовой смеситель газов УКП-1-71 предназначен для смешения углекислого газа с кислородом и автоматического поддержания постоянным давления этой двойной смеси.

Основные технические характеристики редукторов для горючих газов приведены в табл. 4.58.

При электродуговой сварке в защитных газах сварочный пост включает в себя также редукторы, но уже для защитных газов, основные технические характеристики которых помещены в табл. 4.59.

Основные технические характеристики смесителей газов, широко используемых в разных видах сварки, приведены в табл. 4.60.

4.6.6. Оборудование для металлизации и газотермических покрытий

Это оборудование предназначено для нанесения разного рода защитных покрытий различного назначения из материалов, поставляемых в виде проволок или порошков.

Наибольшая пропускная способность (расход), м³/ч	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
25	172×190×160	2
5	265×175×160	2,2
5	190×175×172	1,8
80	190×172×160	2
25	230×190×180	3,6
5	230×250×180	3,5
10	165×160×150	1,85
10	165×160×150	1,85
35	165×160×150	1,85
6	165×160×150	1,85
250	320×240×235	15
500	320×240×235	15
6000	840×700×540	320
30	335×270×345	9,15
40	225×185×136	3,67

Оборудование для электродуговой металлизации

Комплект КДМ-2 для электродуговой металлизации предназначен для нанесения вручную противокоррозионных покрытий из цинка и алюминия в монтажных и цеховых условиях. Может быть также использован для нанесения покрытий из меди, бронзы и других металлов, поставляемых в виде проволоки.

Комплект состоит из ручного электродугового аппарата ЭМ-14М, источника питания «Тимез-500», кассетного блока для проволоки, пульта управления, а также кабелей, шлангов и пульта дистанционного управления, позволяющего работать в радиусе до 8 м. При наличии у потребителей дополнительных кабелей и шлангов можно вести работу в радиусе до 25 м. Техническая характеристика комплекта:

Наибольшая производительность распыления, кг/ч:	
алюминия	12,5
цинка	40
Коэффициент использования распыляемого материала, не менее	0,75
Диаметр распыляемой проволоки, мм	1,5—2,5
Рабочее давление сжатого воздуха, МПа	0,5—0,6
Потребляемая мощность, кВт	До 25
Напряжение, В	380
Ток питающей сети, А	До 58
Частота, Гц	50
Уровень шума в зоне работы оператора (на открытом воздухе с шумопоглощающими средствами), дБ, не более	85
Габаритные размеры, мм	1330×710×1390
Масса, кг, не более	440

Оборудование для газопламенного напыления

Газопламенная установка УГПЛ предназначена для ручного нанесения покрытий из порошков цинка, термопластичных пластмасс и других материалов (с температурой плавления до 800 °С) на металлические поверхности деталей с целью защиты их от коррозии, а также для исправления поверхностных дефектов. Установка состоит из аппарата газопламенного напыления, порошкового питателя, щита управления (на стояке), шлангов и двух редукторов. Регулировани производительности — плавное, со щита управления. Тех ническая характеристика установки:

Наибольшая производительность по напыленному материалу, кг/ч:	
цинковому порошку	7
полимерному порошку ПФН-12	11
Коэффициент использования материала при напылении, %:	
цинкового порошка	70
полимерного порошка ПФН-12	70
Равномерность подачи порошка (отклонение), %, не более	±10
Расход, м³/ч:	
сжатого воздуха	25—30
ацетилена	0,8—1
Рабочее давление, МПа	
сжатого воздуха	0,3—0,6
ацетилена	0,03—0,1
Полезный объем порошкового питателя, дм³	10
Габаритные размеры, мм:	
стояка с порошковым питателем, не более	395×460×1100
аппарата	200×60×200
Масса установки, кг:	
общая, не более	16
в том числе аппарата	1

Таблица 4.59. Технические характеристики редукторов для защитных газов

Тип	Давление, МПа									
	наибольшее (на входе)					рабочее				
	углекислого газа	аргона	азота	гелия	водорода	углекислого газа	аргона	азота	гелия	водорода
-30	10	—	—	—	—	0,1—0,4	—	—	—	—
Р-10	—	20	—	—	—	—	0,1—0,9	—	—	—
Р-40	—	20	—	—	—	—	0,1—0,46	—	—	—
Р-150	—	20	—	—	—	—	0,1—0,7	—	—	—
-30	—	—	20	—	—	—	—	0,1—1,5	—	—
А-90	—	—	20	—	—	—	—	0,1—0,39	—	—
Г-70	—	—	—	20	—	—	—	—	0,1—0,7	—
В-50	—	—	—	—	20	—	—	—	—	0,1—0,54

* Длина × ширина × высота.

Газопламенная установка УГПТ предназначена для ручного и механизированного нанесения газотермических покрытий из тугоплавких порошковых материалов широкой номенклатуры на металлические поверхности. Установка состоит из пульта управления, распылительной горелки, питателя для подачи оксида алюминия, питателя для подачи подслоя и самофлюсующего порошка и питателя для подачи порошка с наибольшей производительностью.

Горелка может работать в любом пространственном положении; она может быть закреплена неподвижно или в специальном приспособлении, которое перемещается вдоль вращающегося изделия.

Регулирование производительности аппарата — плавное, с пульта управления и ступенчатое, путем замены питателя и мундштука в горелке. Питание установки кислородом и ацетиленом — от баллонов или рампы.

Установка позволяет наносить покрытия из керамики с температурой плавления не более 205 °С, а также из самофлюсующихся порошков и композиционных материалов. Техническая характеристика установки:

Наибольшая производительность по напыленному материалу, кг/ч:	
оксиду алюминия	2,2
самофлюсующемуся порошку	12
Коэффициент использования материала при напылении:	
на вал диаметром 20 мм	0,8
на лист	0,9
Наибольшее давление газов, МПа:	
ацетилена	0,11
кислорода	0,6
Наибольший расход газов, м³/ч:	
ацетилена	1,5
кислорода	3
Полезный объем питателей, дм³	0,7 и 10
Габаритные размеры, мм:	
горелки	250×85×150
установки	600×660×300
Масса установки, кг:	
общая	24
в том числе горелки	0,9

Газопламенная установка Л5405 предназначена для газотермического напыления порошковыми материалами. Состоит из пистолета-распылителя и пульта управления. На пульте управления расположены щиток управления с манометрами и расходомерами, а также питатель порошка, фильтры и электрооборудование. Пульт управления снабжен пламегасителем (защиты от обратных ударов) и бытовой зажигалкой. Установка включает, кроме того, газовый пост с размещенными в нем баллонами с горючим газом (ацетилен или пропан-бутан) и кислородом, а также источник сжатого воздуха.

В пистолет-распылитель по отдельным каналам подаются горючий газ, кислород, порошковый материал с транспортирующим газом и охлаждающий сжатый воздух. Для перекрытия каналов подвода горючего газа и кислорода пистолет в исходном положении снабжен специальным клапаном с рукояткой. При открывании клапана сначала продувают газовые каналы кислородом, а затем, в среднем фиксированном положении, осуществляют зажигание пистолета, после чего плавным движением клапан открывают полностью. При этом горючий газ и кислород попадают в ка-

Таблица 4.60. Технические характеристики смесителей газов

Тип смесителя	Давление на входе в смеситель, МПа				Состав газовой смеси (по объему), %			Расход смеси (пропускная способность), л/мин	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
	углекислого газа	кислорода	аргона	смеси кислорода и аргона	углекислый газ	кислород	аргон			
УКП-1-71	0,02—0,1	0,15—1,5	—	—	70	30	—	20	165×84×160	1,65
УКП-1-72	0,5—0,8	0,5—1,5	—	—	70	30	—	102	980×490×290	37
АКУП-1	0,6	0,6	0,1—0,4	—	25	5	70	1-й диапазон 6—15, 2-й диапазон 15—37,5	390×200×275	8
УСГ-1А	0,2—0,6	—	—	0,2—0,6	25	—	75	102	1600×930×660	220
УСГ-1Б	0,2—0,6	—	—	0,3—0,6	25	—	75	102	1400×500×660	160

Расход газа, устанавливаемый по шкале, л/мин		Габаритные размеры *, мм	Масса, кг
черной (дюза № 1)	красной (дюза № 22)		
5—12	12—30	340×175×170	3,6
0,5—2,5	2,5—10	270×160×170	2,65
5—14	14—40	270×160×170	2,65
10—40	40—150	270×160×170	2,65
0,5—4	4—30	270×160×170	2,65
15—37	37—90	270×160×170	2,65
5—20	20—70	270×160×170	2,65
5—16	16—50	270×160×170	2,65

меру смешения и затем в виде рабочей смеси — в зону горения.

Порошковый материал транспортирующим газом подается через центральное отверстие пистолета-распылителя, что обеспечивает интенсивный нагрев частиц при прохождении газового факела. Расход порошкового материала регулируется плавно.

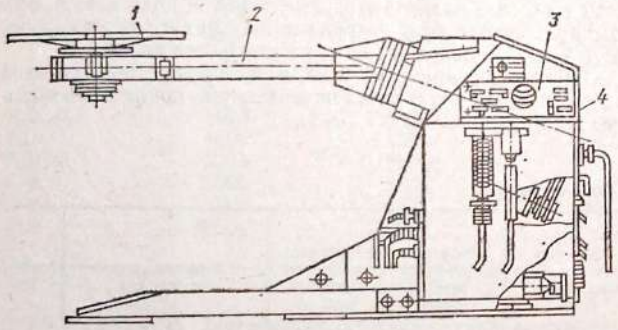


Рис. 4.31. Вращатель вертикальный:

1 — планшайба полноповоротная с приводом; *2* — консоль; *3* — привод наклона консоли; *4* — корпус вращателя.

Таблица 4.61. Нормативные документы на механическое оборудование для сварки

Вид оборудования	Нормативный документ
Вращатели сварочные горизонтальные двухстоечные	ГОСТ 19140—84
Вращатели сварочные вертикальные	ГОСТ 19141—84
Кантователи сварочные двухстоечные с подъемными центрами	ГОСТ 19142—84
Манипуляторы сварочные	ГОСТ 19143—84
Роликоопоры и секции сварочных роликовых вращателей	ОСТ 2 Н69-7—86
Приводы сварочных роликовых вращателей	ОСТ 2 Н69-8—86
Столы сварщиков неповоротные	ОСТ 2 П53-1—86

Расход горючего газа, кислорода, транспортирующего и охлаждающего сжатого воздуха выставляется по расходомерам, давление — по манометрам. Так как температура газового пламени составляет 2700 °С, то на установке можно получать газотермические покрытия, температура плавления которых не превышает 2000 °С.

Выпускается Опытным заводом ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины и ВНПО «Ремдеталь». Техническая характеристика установки:

Номинальное напряжение питающей сети переменного тока частотой 50 Гц, В	220
Грануляция порошковых материалов, мкм:	
металлических	50—160
керамических	5—50
органических	5—250
Расход горючих газов, л/мин:	
ацетилена	23—30
пропан-бутана	17—23
Расход кислорода, л/мин	30—40
Расход сжатого воздуха, л/мин:	
транспортирующего	40—70
охлаждающего	20—80
Расход порошкового материала, кг/ч	1,8—10
Масса, кг	75

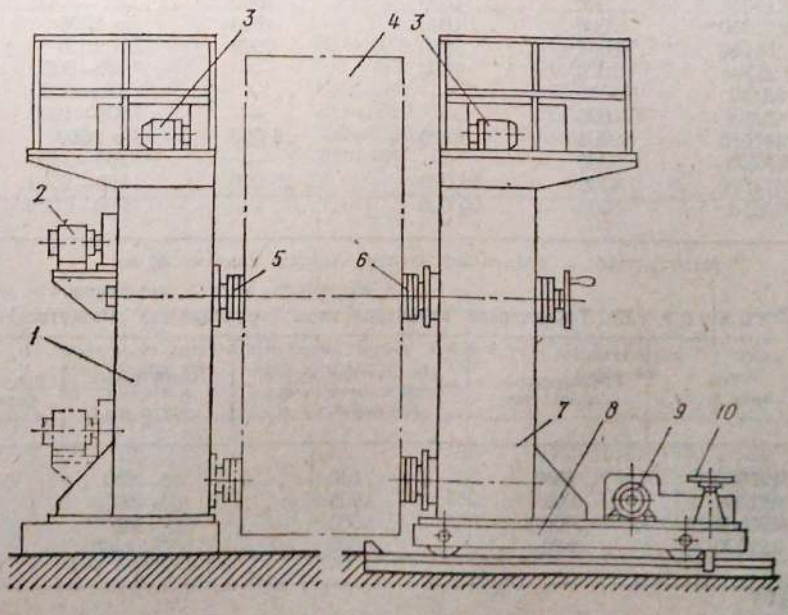


Рис. 4.32. Вращатель горизонтальный двухстоечный с подъемными центрами:

1 — стойка передняя (приводная); *2* — привод вращения; *3* — привод подъема центров; *4* — изделие; *5*, *6* — центры вращения; *7* — стойка задняя; *8* — тележка; *9* — привод тележки; *10* — стопор тележки.

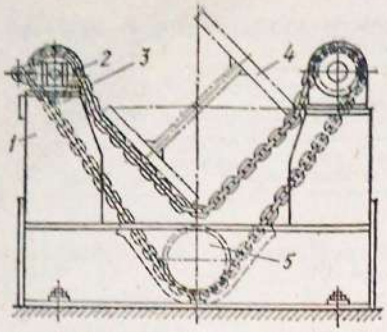


Рис. 4.33. Кантователь цепной:

1 — стойка; *2*, *5* — звездочки; *3* — цепь; *4* — изделие.

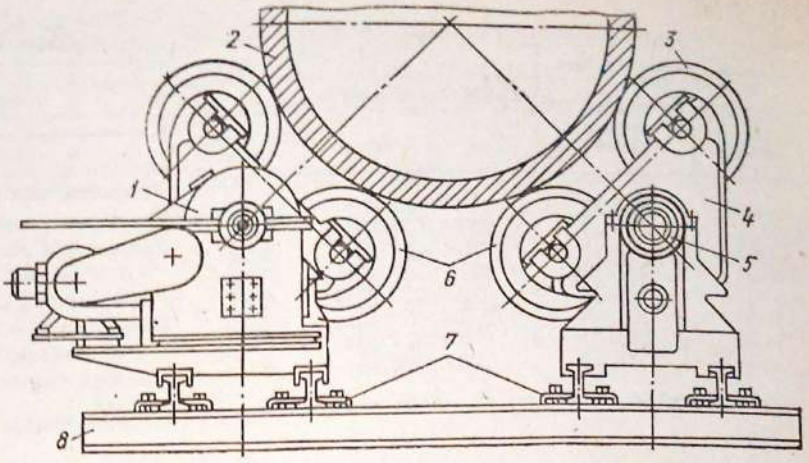


Рис. 4.34. Стенд-вращатель роликовый:

1 — привод; *2* — изделие; *3*, *6* — ролики; *4* — рама поворотная; *5* — шарнир; *7* — крепления передвижные; *8* — рама основания стенда.

Газопламенная установка УН-121 УХЛ4 предназначена для восстановления и упрочнения деталей, а также для нанесения антикоррозионных покрытий на поверхности деталей и металлоконструкций методом газопламенного напыления. Установка состоит из горелки, дозатора порошка и шкафа управления. В горелку по отдельным каналам подаются кислород, горючий газ, порошковый материал с транспортирующим газом и охлаждающий сжатый воздух. Для перекрытия каналов подвода кислорода и горючего газа горелка в исходном положении снабжена специальным клапаном и рукояткой. При открывании клапана сначала происходит продувка газовых каналов кислородом, а затем, в среднем фиксированном положении, осуществляется зажигание горелки, после чего плавным движением рукоятки клапан полностью открывается. При этом кислород и горючий газ попадают в камеру смешения и затем в виде рабочей смеси — в камеру горения.

Порошковый материал транспортирующим газом подается через центральное отверстие горелки, тем самым обеспечивая интенсивный нагрев частиц при прохождении газового факела. Расход порошка регулируется плавно.

Установка комплектуется водоохлаждаемой горелкой для напыления внутренних поверхностей, комплектом шлангов и электрозажигалкой ЭЗ-2.

Таблица 4.62. **Технические характеристики манипуляторов для сварки**

Тип манипулятора	Грузоподъемность, кг	Момент, Н·м		Диаметр свариваемых швов, мм	Угол наклона планшайбы, град	Допустимый сварочный ток, А	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
		наибольший крутящий на оси вращения планшайбы	центра тяжести изделия относительно плоскости планшайбы					
М11020	63	63	100	125—630	135	1000	700×882×630	192
М11030	125	160	250	160—800	135	1000	1000×815×755	450
М11050А	500	1000	1600	250—1500	135	1000	1310×1260×950	735
М11051	500	1000	1600	250—1500	135	1000	1310×1260×950	—
М21050 *	500	1000	1600	До 2100	135	1000	1395×1200×1390	1126
М11060	1000	2500	4000	До 1500	135	1600	1536×1500×1150	—
Т25М	1000	4000	—	250—900	90	—	1200×1200×860	1530
МАС-1	1000	—	—	250—900	120	—	1650×1500×1050	2450
МАС-2	1500	—	—	500—1200	120	—	1750×1650×1600	3855
М11070	2000	6300	10 000	До 2000	135	2000	1610×1500×1190	1985
МАС-3	3000	—	—	1200—3000	120	—	2350×2000×2160	7400
М11080	4000	16 000	25 000	500—2500	135	2000	2300×2025×1590	5050
МАС-4	5000	50 000	—	3000—7000	90	—	4220×3650×3200	26 000

* Манипулятор с подъемным столом, высота подъема 500 мм.

Таблица 4.63. **Технические характеристики вертикальных вращателей для сварки**

Тип вращателя	Грузоподъемность, кг	Наибольший крутящий момент на оси вращения, Н·м	Диаметр свариваемых швов, мм	Допустимый сварочный ток, А	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
М21030	250	160	60—800	1000	1000×1000×450	295
М21050	1000	1000	100—2000	1500	1000×1000×630	550
М21060	2000	2500	До 1500	1000	1612×1612×700	1190
М21070	4000	6300	500—2500	2000	1260×1260×1000	1225

Таблица 4.64. Технические характеристики горизонтальных вращателей для сварки

Тип вращателя	Грузоподъемность, кг	Наибольший крутящий момент на оси вращения, Н·м	Наибольшая длина свариваемых изделий, мм	Высота центров, мм	Диаметр свариваемых изделий, мм	Допустимый сварочный ток, А	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
М31030	250	160	2500	800	60—800	1000	3600×1250×1425	633
ВГМ-0,25	250	160	—	800	—	630	—	—
ВГМ-0,5	500	400	—	800	—	1000	—	—
ВГМ-1	1000	1000	5000	1000	До 1800	1000	—	—
М31051	1000	1000	4000	1000	100—1350	1500	6062×1600×1800	—
М31050	1000	1000	4000	1000	100—1350	1500	6062×1600×1800	1979
М31060	2000	2500	6300	1000	До 2000	1600	9100×1600×1800	2730
ВГМ-2	2000	2500	—	1000	—	1250	—	—
М31070	4000	6300	6300	1250	500—2500	2000	9100×2000×2250	3893
М31071	4000	6300	6300	1250	500—2500	2000	9100×2000×2250	—

Таблица 4.65. Технические характеристики кантователей для сварки

Тип кантователя	Грузоподъемность, кг	Наибольший крутящий момент, Н·м	Высота центров, мм	Номинальный сварочный ток, А	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
Кантователи с подъемными центрами						
КП-4	4000	6300	1250	—	580×1080×1400	950
КДП-4	4000	6300	630—2130	1250	—	—
КДП-8	8000	16 000	630—2430	1600	—	—
Кантователи со стационарными центрами						
КДС-0,5	500	1000	—	—	—	—
КДС-1	1000	2000	—	—	—	—
КДС-2	2000	2500	—	—	—	—
К-2	2000	2500	1000	—	850×750×1200	620
К-4	4000	6300	1000, 1250	—	850×750×1360	700
К-8	8000	16 000	1250	—	800×1060×1650	950

Таблица 4.66. Технические характеристики роликовых стендов

Тип стенда	Грузоподъемность, кг	Диаметр роликов наружный, мм	Частота вращения роликов, $мин^{-1}$	Диаметр свариваемых швов, мм	Габаритные размеры *, мм	Масса, кг
60СД	18400	400	0,6—3,0	500—4500	3460×730	2730
60СД-1	19400	400	0,06—3,9	500—4800	3460×1310	3197
70СД	12260	400	0,06—3,0	400—4000	3460×730	2230
70СД-1	11350	400	0,6—3,0	400—5000	3460×1310	2550
70СДА	13650	400	0,06—3,0	400—4000	Высота 800	1703
Т-30М	12000	410	—	300—4000	—	1780

* Ширина × высота.

Таблица 4.67. Технические характеристики неповоротных столов сварщика

Тип стола	Размеры рабочей части стола (длина × ширина), мм	Высота рабочей части стола над полом, мм	Допустимая масса свариваемых изделий, кг	Мощность двигателя вентилятора, кВт	Сварочный ток, А	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
С10020	800×800	750	63	1,5	500	940×1010×1550	239
С10021	800×800	750	63	—	500	940×1010×1550	185
С10040	1250×800	750	100	2,2	630	1357×1010×1750	305
М10041	1250×800	750	100	—	630	1357×1010×1750	250

Установка разработана ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины. Техническая характеристика установки:

Потребляемая электрическая мощность, кВт, не более	0,15
Удельное энергопотребление, кВ · А, не более	0,025
Коэффициент применяемости, %, не менее	60
Расход газов, м³/ч:	
ацетилен при давлении 98 кПа	0,2—1,0
пропан-бутан при давлении 392 кПа	0,2—3,0
кислород при давлении 490 кПа	0,2—5,0
сжатый воздух при давлении 588 кПа	0,1—4,0
Производительность установки по напыленному материалу, кг/ч:	
металлическому	8—12
керамическому	2—3
органическому	2—3
Коэффициент использования материалов	0,6—0,8
Вместимость бункера для порошка, л, не более	20,0
Габаритные размеры установки, мм, не более	1000×800×1700
Масса установки, кг, не более	150

4.7. МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В изготовлении строительных конструкций преобладает мелкосерийное, а подчас и единичное производство. Эффективность такого производства обычно повышается следующими путями: а) сосредоточением однотипных сварных конструкций (плоскостных, цилиндрических, балочных, решетчатых, сферических, рамочных и т. п.) с созданием для их изготовления специализированных участков, цехов, а подчас и заводов в зависимости от объема производства и экономической целесообразности сосредоточения; б) механизацией заготовительных операций; линии и участки холодной обработки листового и профильного проката, а также труб следует создавать на производствах по изготовлению металлоконструкций для строительства; в) применением в заготовительных подразделениях заводов металлоконструкций автоматизированных участков комплектации, на которых учет и выдача деталей, а также управление штабелерами и подъемно-транспортными устройствами осуществляются с помощью ЭВМ; такие участки позволяют существенно сократить число людей, занятых ручным трудом, и общее число работающих, а также гарантировать системную подачу нужных по технологическому процессу деталей в цеха сборосварки или на отгрузку заказчикам; г) заменой ручной сварки механизированной или автоматической; поскольку в производстве строительных металлоконструкций значительную долю (более 50 %) составляют короткие и угловые швы, активнее развивается механизированная сварка (в среде защитных газов, порошковой проволокой и меньше — под слоем флюса), однако достаточно велико применение также и автоматической сварки под слоем флюса и в защитных газах с использованием сварочных головок, самоходных автоматов (тракторов) и специальных приспособлений для перемещения конструкций или сварочных головок вдоль шва; д) расширением механизации вспомогательных операций в заготовительных и сборосварочных подразделениях путем интенсификации применения мостовых кранов, а также использованием специальных средств (консольных и полупортальных кранов, кран-балок, поворотных консолей с тельферами и т. п.), устанавливаемых на рабочих местах и управляемых рабочими основного производства (сборщиками или сварщиками), что позволяет сократить общую численность рабочих в цехе.

Это вызывает необходимость увеличения количества и видов различного механического оборудования, включаемого в общий технологический процесс изготовления сварных строительных металлоконструкций. В настоящее время значительная часть такого оборудования стандартизована (табл. 4.61).

Манипуляторы (табл. 4.62) предназначены для выполнения сборочных работ и сварочных работ в наиболее удобном положении сварного соединения. Они могут быть двух типов — консольные и карусельные. На рис. 4.31 приведена схема манипулятора консольного типа.

Вращатели (табл. 4.63 и 4.64) предназначены для вращения свариваемого изделия со скоростью, равной скорости сварки, либо для ступенчатого поворота изделия в нужное для сварки положение. В зависимости от положения оси вращения в пространстве различают вращатели вертикальные и горизонтальные, причем последние могут обладать подъемными центрами (рис. 4.32). Горизонтальные вращатели иногда называют кантователями (т. е. механизмами, позволяющими переворачивать изделие) (табл. 4.65). Существуют разные виды кантователей — так называемые книжные кантователи, предназначенные для плоских изделий, цепные кантователи (рис. 4.33), очень широко используемые в строительной индустрии при изготовлении сварных двутавровых балок, и др.

Для изготовления секций трубопроводов среднего (300—800 мм) и большого (до 1500 мм) диаметров, а также цилиндрических изделий (емкостей, сосудов и т. п.) диаметром до 5 м применяют специальные роликовые стенды-вращатели различной длины (табл. 4.66), которые можно набирать из отдельных секций. Схематически поперечное сечение такой секции показано на рис. 4.34. При стационарных условиях работы электросварщиков для удобства работы используют неповоротные столы сварщиков (табл. 4.67).

ГЛАВА 5

СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

5.1. ЭЛЕКТРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

5.1.1. Сварочные проволоки

Проволока стальная сварочная по ГОСТ 2246—70* предназначена для механизированной электродуговой и электрошлаковой сварки, газовой сварки и изготовления электродов.

Стандартом предусматривается изготовление 76 марок проволоки (табл. 5.1), в том числе: 6 марок низкоуглеродистой, 30 марок легированной и 40 марок высоколегированной. Кроме того, существуют десятки марок стальных сварочных проволок, которые выпускаются в небольших количествах по техническим условиям черной металлургии.

Для сварки строительных конструкций под флюсом применяют преимущественно низкоуглеродистые и низколегированные проволоки. В тех случаях, когда к наплавленному металлу предъявляются особые требования, например коррозионной стойкости, теплоустойчивости, применяются легированные и высоколегированные проволоки. Условные обозначения марок включают буквы Св (сварочная), а следующие после дефиса цифры показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Буквы указывают химический состав стали, из которой изготовлена проволока, а цифры после них — содержание элемента в процентах. Применяют те же буквенные символы, что и для элементов в сталях. Буква А в конце обозначения низкоуглеродистой и легированной проволок указывает на повышенную чистоту металла по содержанию серы и фосфора. В обозначении высоколегированной проволоки буква А в конце отсутствует. Перед условным обозначением ставится цифра, означающая диаметр проволоки.

Сварочные проволоки выпускаются диаметром от 0,3 до 12 мм. В обозначении проволоки, предназначенной для изготовления электродов, после названия марки ставят букву Э (через дефис). К такой проволоке предъявляются более высокие требования в соблюдении заданного диаметра, влияющего на равномерность нанесения покрытия на стержень электрода.

Проволока изготовляется из стали, выплавленной электрошлаковым (Ш) или вакуумно-дуговым (ВД) переплавом либо в вакуумно-индукционных (ВИ) печах. Дополнительные требования к металлу проволоки относительно содержания примесей, газов, неметаллических включений и т. д. устанавливаются соглашением потребителя и изготовителя. Соответствующие символы вносятся в условное обозначение проволоки.

По виду поверхности низкоуглеродистую и легированные проволоки подразделяют на неомедненную и омедненную (О). Омеднение предохраняет проволоку от коррозии и улучшает контакт с токоподводящими устройствами сварочных автоматов и полуавтоматов.

Пример условного обозначения легированной сварочной проволоки диаметром 3 мм, содержащей 0,08 % углерода, до 1 % хрома и кремния (каждого), до 2 % марганца, с омедненной поверхностью: 3,0 Св-08ХГ2С-О ГОСТ 2246—70*.

Названия проволок в определенной мере характеризуют их назначение. Они применяются для сварки сталей сходного состава.

Некоторые из предназначенных для сварки под флюсом проволок применяют для сварки в защитных газах или смесях (табл. 5.2). Они отличаются повышенным содержанием марганца и кремния, что компенсирует выгорание этих элементов в процессе сварки и подавляет образование пор.

Проволоки марок Св-15ГСТЮЦА и Св-20ГСТЮА применяют для дуговой сварки без дополнительной защиты, что делает их пригодными для использования в условиях монтажа на открытых площадках.

Проволоки сплошного сечения с алюминием предназначены для сварки в углекислом газе по мокрому, грязному, грунтованному или ржавому металлу, особенно в полевых условиях, а также низколегированных сталей, устойчивых против атмосферной коррозии. Предложены три марки проволок сплошного сечения для сварки различных по прочности сталей, обеспечивающие повышение стойкости металла шва против пор: Св-08ГСЮ, Св-08Г2СЮ, Св-08Г3СЮ. Эти проволоки обеспечивают хорошие механические свойства швов, в особенности значения ударной вязкости при низких температурах. Согласно ГОСТ 9467—75* по механическим свойствам металла шва их можно приравнять к типам электродов соответственно: Э46, Э50 и Э55.

Применение проволок с алюминием целесообразно, когда использование стандартных проволок Св-08Г2С и Св-08ГС не обеспечивает требований к качеству швов по стойкости против пор.

Проволока сплошного сечения с РЗМ предназначена для сварки углеродистых и низколегированных сталей в углекислом газе и смесях газов. Проволока с РЗМ может применяться наравне со стандартной марки Св-08Г2С, но имеет по сравнению с ней определенные преимущества.

При сварке в углекислом газе или смеси углекислого газа и кислорода на токах выше критического $I_{кр} \geqslant 280$ А возможно протекание струйного процесса. Легкоионизирующие добавки РЗМ повышают плотность тока в дуге, стабильность ее горения, при этом уменьшаются потери металла на разбрызгивание и брызги практически не привариваются к изделию. Дуга менее подвержена вредному воздействию магнитного дутья. Редкоземельные металлы активно связывают серу и водород, поэтому концентрация последних в шве снижается в 1,5—2 раза. Возможно применение более форсированных режимов сварки без ухудшения формирования швов и их механических свойств.

Для повышения производительности сварки рационально использовать проволоку диаметром 1,6—2 мм. Проволока с РЗМ может быть применена для сварки конструкций ответственного назначения.

Проволоки марок Св-03Х21Н10АГ5, ЭК-91 предназначены для дуговой сварки под флюсом высоколегированных, преимущественно коррозионно-стойких аустенитно-ферритных сталей типа 08Х22Н6Т, 12Х21Н5Т, 08Х18Г8Н2Т, 03Х23Н6, 04Х18Н10 и стабильно-аустенитных хладостой-

Таблица 5.1. Технические характеристики проволоки для сварки под флюсом

Марка проволоки	Состояние поверхности	Химический				
		C	Si	Mn	Cr	Ni
Св-08	Нетравленая, омеднение или шлифование — только по требованию заказчика	Не более 0,10	Не более 0,03	0,35—0,60	Не более 0,15	Не более 0,30
Св-08А	То же	То же	То же	0,35—0,60	Не более 0,12	Не более 0,25
Св-08АА	»	»	»	0,35—0,60	Не более 0,10	То же
Св-08ГА	»	»	»	0,80—1,10	То же	»
Св-10ГА	»	Не более 0,12	»	1,10—1,40	Не более 0,20	Не более 0,30
Св-10Г2	»	Не более 0,12	»	1,50—1,90	То же	То же
Св-08ГС	»	Не более 0,10	0,60—0,85	1,40—1,70	»	Не более 0,25
Св-12ГС	»	Не более 0,14	0,60—0,90	0,80—1,10	»	Не более 0,30
Св-08Г2С	»	0,05—0,11	0,70—0,95	1,80—2,10	»	Не более 0,25
Св-10ГН	»	Не более 0,12	0,15—0,35	0,90—1,20	»	0,90—1,20
Св-08ГСМТ	»	0,06—0,11	0,40—0,70	1,00—1,30	Не более 0,30	Не более 0,30
Св-15ГСТЮЦА	»	0,12—0,18	0,45—0,85	0,60—1,00	То же	Не более 0,40
Св-20ГСТЮА	»	0,17—0,23	0,60—0,90	0,90—1,20	»	То же
Св-18ХГС	»	0,15—0,22	0,90—1,20	0,80—1,10	0,80—1,10	Не более 0,30
Св-10НМА	»	0,07—0,12	0,12—0,35	0,40—0,70	Не более 0,20	1,00—1,50
Св-08МХ	»	0,06—0,10	0,12—0,30	0,35—0,60	0,45—0,65	Не более 0,30
Св-08ХМ	»	0,06—0,10	0,12—0,30	0,35—0,60	0,90—1,20	То же
Св-18ХМА	»	0,15—0,22	0,12—0,35	0,40—0,70	0,80—1,10	»
Св-08ХНМ	»	Не более 0,10	0,12—0,35	0,50—0,80	0,70—0,90	0,80—1,20
Св-08ХМФА	»	0,06—0,10	0,12—0,30	0,35—0,60	0,90—1,20	Не более 0,30
Св-10ХМФТ	»	0,07—0,12	Не более 0,35	0,40—0,70	1,40—1,80	То же
Св-08ХГ2С	»	0,05—0,11	0,70—0,95	1,70—2,10	0,70—1,00	Не более 0,25
Св-08ХГСМА	»	0,06—0,10	0,45—0,70	1,15—1,45	0,85—1,15	Не более 0,30
Св-10ХГ2СМА	»	0,07—0,12	0,60—0,90	1,70—2,10	0,80—1,10	То же
Св-08ХГСМФА	»	0,06—0,10	0,45—0,70	1,20—1,50	0,95—1,25	»
Св-04Х2МА	»	Не более 0,06	0,12—0,35	0,40—0,70	1,80—2,20	Не более 0,25
Св-13Х2МФТ	»	0,10—0,15	Не более 0,35	0,40—0,70	1,70—2,20	Не более 0,30
Св-08Х3Г2СМ	»	Не более 0,10	0,45—0,75	2,00—3,00	Не более 0,30	0,30—0,50
Св-08ХМНФБА	»	0,06—0,10	0,12—0,30	0,35—0,60	1,10—1,40	0,65—0,90
Св-08ХН2М	»	Не более 0,10	0,12—0,30	0,55—0,85	0,70—1,00	1,40—1,80
Св-10ХН2ГМТ	»	0,07—0,12	0,12—0,30	0,80—1,10	0,30—0,60	1,80—2,20
Св-08ХН2ГМТА	»	0,06—0,11	0,12—0,30	0,80—1,10	0,25—0,45	2,10—2,50
Св-08ХН2ГМЮ	»	0,06—0,11	0,25—0,55	1,00—1,40	0,70—1,10	2,00—2,50
Св-08ХН2Г2СМЮ	»	0,06—0,11	0,40—0,70	1,50—1,90	0,70—1,00	2,00—2,50
Св-06Н3	»	Не более 0,08	Не более 0,30	0,40—0,70	Не более 0,30	3,00—3,50
Св-10Х5М	»	Не более 0,12	0,12—0,35	0,40—0,70	4,00—5,50	Не более 0,30
Св-12Х11НМФ	Травленая, отбеленная или термообработанная в инертной атмосфере	0,08—0,15	0,25—0,55	0,35—0,65	10,50—12,00	0,60—0,90
Св-10Х11НВМФ	То же	0,08—0,13	0,30—0,60	0,35—0,65	10,50—12,00	0,80—1,10
Св-12Х13	»	0,09—0,14	0,30—0,70	0,30—0,70	12,00—14,00	Не более 0,60
Св-20Х13	»	0,16—0,24	Не более 0,60	0,60	12,00—14,00	—
Св-06Х14	»	Не более 0,08	0,30—0,70	0,30—0,70	13,00—15,00	Не более 0,60

состав, %						
Mo	Ti	S (не более)	P (не более)	Прочие элементы	Рекомендуемый флюс	Основное применение
—	—	0,040	0,040	Al не более 0,01	ОСЦ-45, ОСЦ-45М, АН-60, АН-348-А, АНК-35, АНК-18, АНЦ-1, АН-348-В, АН-8	Дуговая и электрошлаковая сварка и наплавка нелегированных конструкционных сталей общего назначения
—	—	0,030	0,030	То же	То же	То же
—	—	0,020	0,020	»	»	»
—	—	0,025	0,030	—	ОСЦ-45, ОСЦ-45М, АНЦ-1, АН-60, АН-348-А, АН-348-АМ, АНК-30, АНК-34, АНК-18, АН-65	»
—	—	0,025	0,030	—	АН-348-В, АН-348-ВМ, АН-22, АН-47	»
—	—	0,030	0,030	—	То же	»
—	—	0,025	0,030	—	»	Дуговая сварка и наплавка низколегированных конструкционных сталей
—	—	0,025	0,030	—	»	То же
—	—	0,025	0,030	—	»	»
—	—	0,025	0,030	—	»	»
0,20—0,40	0,05—0,12	0,025	0,030	—	»	»
—	0,05—0,20	0,025	0,025	Al 0,20—0,50 Zn 0,05—0,15 Ce 0,4	»	»
—	0,10—0,20	0,025	0,025	Al 0,20—0,50		»
				Ce 0,30—0,045	»	»
—	—	0,025	0,025	—	»	»
0,40—0,55	—	0,025	0,020	—	ОСЦ-45, АН-60, АН-22, АН-348-В, АН-8	»
0,40—0,60	—	0,025	0,030	—	АН-47	»
0,50—0,70	—	0,025	0,030	—	То же	»
0,15—0,30	—	0,025	0,025	—	АН-22, АН-17М, АН-43	»
0,25—0,45	—	0,025	0,030	—	То же	»
0,50—0,70	—	0,025	0,025	V до 0,15—0,30	АН-22, АН-17М, АН-43, АН-47	»
0,40—0,60	0,05—0,12	0,030	0,030	V до 0,20—0,035	То же	»
—	—	0,025	0,030	—	»	»
0,40—0,60	—	0,025	0,025	—	»	»
0,40—0,60	—	0,025	0,025	—	»	»
0,50—0,70	—	0,025	0,025	V до 0,20—0,35	»	»
0,50—0,70	—	0,020	0,025	—	»	»
0,40—0,60	0,05—0,12	0,030	0,030	V до 0,20—0,35	»	»
—	0,030	0,030	0,030	—	»	»
0,80—1,00	—	0,025	0,025	V до 0,20—0,35 Nb 0,10—0,23	»	»
0,20—0,40	—	0,025	0,030	—	»	»
0,40—0,60	0,05—0,12	0,025	0,030	—	»	»
0,25—0,45	0,05—0,12	0,020	0,025	—	»	»
0,40—0,65	—	0,030	0,030	Al 0,06—0,18	АН-22, АН-47	»
0,45—0,65	—	0,030	0,030	Al 0,06—0,16	АН-17М, АН-43	»
—	—	0,025	0,030	—	АН-26, АНФ-14	»
0,40—0,60	—	0,025	0,030	—	АН-22	»
0,60—0,90	—	0,025	0,030	V до 0,25—0,50	АН-17М	Дуговая и электрошлаковая сварка и наплавка легированных и высоколегированных сталей и сплавов
1,00—1,30	—	0,025	0,030	V до 0,25—0,50 W 1,00—1,4	АН-17М	То же
		0,025	0,030		АН-26, АН-45	»
—	—	0,025	0,030	—	То же	»
—	—	0,025	0,030	—	»	»

Марка проволоки	Состояние поверхности	Химический				
		C	Si	Mn	Cr	Ni
Св-08Х14ГНТ	»	Не более 0,10	0,25—0,65	0,90—1,30	12,50—14,50	0,40—0,90
Св-10Х17Т	»	Не более 0,12	Не более 0,80	Не более 0,70	16,00—18,00	Не более 0,60
Св-13Х25Т	»	Не более 0,15	Не более 1,00	Не более 0,80	23,00—27,00	0,60
Св-06Х24Н6ТАФМ	»	Не более 0,08	Не более 0,70	То же	23,00—25,00	5,50—6,50
Св-01Х19Н9	»	Не более 0,03	0,50—1,00	1,00—2,00	18,00—20,00	8,00—10,00
Св-04Х19Н9	»	Не более 0,06	0,50—1,00	1,00—2,00	18,00—20,00	8,00—10,00
Св-08Х16Н8М2	»	0,05—0,10	Не более 0,60	1,50—2,00	15,00—17,00	7,50—9,00
Св-08Х18Н8Г2Б	»	0,05—0,10	0,30—0,70	1,80—2,30	17,50—19,50	8,00—9,00
Св-07Х18Н9ТЮ	»	Не более 0,09	Не более 0,80	Не более 2,00	17,00—19,00	8,00—10,00
Св-06Х19Н9Т	»	Не более 0,08	0,40—1,00	1,00—2,00	18,00—20,00	8,00—10,00
Св-04Х19Н9С2	»	Не более 0,06	2,00—2,75	1,00—2,00	18,00—20,00	8,00—10,00
Св-08Х19Н9Ф2СА	»	Не более 0,10	1,30—1,80	1,00—2,00	18,00—20,00	8,00—10,00
Св-07Х19Н10Б	»	0,05—0,09	Не более 0,70	1,50—2,00	18,50—20,50	9,00—10,50
Св-08Х19Н10Г2Б	»	0,05—0,10	0,20—0,45	1,80—2,20	18,50—20,50	9,50—10,50
Св-06Х19Н10М3Т	»	Не более 0,08	0,30—0,80	1,00—2,00	18,00—20,00	9,00—11,00
Св-08Х19Н10М3Б	»	Не более 0,10	Не более 0,60	1,00—2,00	18,00—20,00	9,00—11,00
Св-04Х19Н11М3	»	Не более 0,06	То же	1,00—2,00	18,00—20,00	10,00—12,00
Св-05Х20Н9ФБС	»	Не более 0,07	0,90—1,50	1,00—2,00	19,00—21,00	8,00—10,00
Св-08Х20Н9С2БТЮ	»	Не более 0,10	2,00—2,50	1,00—2,00	19,00—21,00	8,00—10,00
Св-06Х20Н11М3ТБ	»	Не более 0,08	0,50—1,00	Не более 0,80	19,00—21,00	10,00—12,00
Св-10Х20Н15	»	Не более 0,12	Не более 0,80	1,00—2,00	19,00—22,0	14,00—16,00
Св-07Х25Н13	»	Не более 0,09	0,50—1,00	1,00—2,00	24,00—26,00	12,00—14,00
Св-07Х25Н12Г2Т	»	То же	0,30—1,00	1,50—2,50	24,00—26,50	11,00—13,00
Св-06Х25Н12ТЮ	»	Не более 0,08	0,60—1,00	Не более 0,80	24,00—26,50	11,50—13,50
Св-08Х25Н13БТЮ	»	Не более 0,10	0,60—1,00	Не более 0,55	24,00—26,00	12,00—14,00
Св-13Х25Н18	»	Не более 0,15	Не более 0,50	1,00—2,00	24,00—26,00	17,00—20,00
Св-08Х20Н9Г7Т	»	Не более 0,10	0,50—1,00	5,00—8,00	18,50—22,00	8,00—10,00
Св-08Х21Н10Г6	»	То же	0,20—0,70	5,00—7,00	20,00—22,00	9,00—11,00
Св-30Х25Н16Г7	»	0,25—0,33	Не более 0,30	6,00—8,00	24,50—27,00	15,00—17,00
Св-10Х16Н25АМ6	»	0,08—0,12	Не более 0,60	1,00—2,00	15,00—17,00	24,00—27,00
Св-09Х16Н25М6АФ	»	0,07—0,11	Не более 0,40	1,00—2,00	15,00—17,00	24,00—27,00
Св-01Х23Н28М3Д3Т	»	Не более 0,03	Не более 0,55	Не более 0,55	22,00—25,00	26,00—29,00
Св-30Х15Н35В3Б3Т	»	0,027—0,33	Не более 0,60	0,50—1,00	14,00—16,00	34,00—36,00
Св-08Н50	»	Не более 0,10	Не более 0,50	Не более 0,50	Не более 0,30	48,00—53,00
Св-06Х15Н60М15	»	Не более 0,08	То же	1,00—2,00	14,00—16,00	Основа

Таблица 5.2. Проволока для сварки в защитных газах и без дополнительной защиты (ГОСТ 2246—70 *)

Марка проволоки	Рекомендуемая защитная среда	Химический состав, %						
		C	Mn	Si	P (не более)	S (не более)	Cr	Mo
Св-08ГС	CO_2	Не более 0,10	1,00	0,60	0,020	0,020	0,10	—
Св-12ГС	CO_2	Не более 0,14	1,00	0,80	0,020	0,020	—	—
Св-08Г2С	CO_2	Не более 0,11	1,40	0,80	0,020	0,020	0,10	—
Св-08ГСМТ	CO_2	То же	1,00	0,60	0,020	0,020	0,10	0,20
Св-18ХГС	CO_2	Не более 0,10	1,00	1,00	0,020	0,020	0,80	—
Св-08ХГ2С	CO_2	То же	2,00	0,80	0,020	0,020	0,80	—
Св-08ХГСМА	CO_2	Не более 0,12	1,20	0,60	0,020	0,020	1,00	0,40
Св-10ХГ2СМА	CO_2	Не более 0,10	1,80	0,70	0,020	0,020	0,90	0,40
Св-08ХГСМФА	CO_2	То же	1,30	0,70	0,020	0,020	1,00	0,40

Состав, %						
Mo	Ti	S (не более)	P (не более)	Прочие элементы	Рекомендуемый флюс	Основное применение
—	0,60—1,00	0,025	0,030	—	»	»
—	0,20—0,50	0,025	0,035	—	»	»
—	0,20—0,50	0,025	0,035	—	»	»
0,06—0,12	0,08—0,20	0,018	0,030	V 0,08—0,15 N 0,10—0,20	»	»
—	—	0,015	0,025	—	»	»
—	—	0,018	0,025	—	»	»
1,50—2,00	—	0,018	0,025	—	»	»
—	—	0,018	0,025	Nb 1,20—1,50	»	»
—	1,00—1,40	0,015	0,030	Al 0,60—0,95	»	»
—	0,50—1,00	0,015	0,030	—	»	»
—	—	0,018	0,025	—	»	»
—	—	0,025	0,030	V 1,80—2,40	АН-26С, АН-26СП, АН-26П	»
—	—	0,018	0,025	Nb 1,20—1,50	То же	»
—	—	0,020	0,030	Nb 0,90—1,30	АН-26С, АН-26П	»
2,00—3,00	0,50—0,80	0,018	0,025	—	АН-18, АН-45	»
2,00—3,00	—	0,018	0,025	Nb 0,90—1,30	То же	»
2,00—3,00	—	0,018	0,025	—	»	»
—	—	0,020	0,030	Nb 1,00—1,40 V 0,90—1,30	»	»
—	0,60—1,00	0,020	0,032	Nb 0,60—1,00	»	»
2,50—3,00	0,60—1,10	0,018	0,030	Al 0,30—0,70 Nb 0,60—0,90		
—	—	0,018	0,025	—	»	»
—	—	0,018	0,025	—	»	»
—	0,60—1,00	0,020	0,035	—	»	»
—	0,60—1,00	0,020	0,030	Al 0,40—0,80	»	»
—	0,50—0,90	0,020	0,030	Nb 0,70—1,10 Al 0,40—0,90	»	»
—	—	0,015	0,025	—	»	»
—	0,60—0,90	0,018	0,035	—	»	»
—	—	0,018	0,035	—	»	»
—	—	0,018	0,030	—	»	»
5,50—7,00	—	0,018	0,025	N_2 0,10—0,20	»	»
5,50—7,00	—	0,018	0,018	V 0,70—1,00	»	»
2,50—3,00	0,50—0,90	0,018	0,030	Cu 2,50—3,50	АН-18	»
—	0,20—0,70	0,015	0,025	W 2,50—3,50	АН-23	»
—	—	0,020	0,030	—	АН-23	»
14,00—16,00	—	0,015	0,015	Fe не более 4,0	АН-45	»

Механические свойства металла сварного шва							
Ni	Прочие элементы	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	$a_н$, Дж/см² (+20 °С)	$a_н$, Дж/см² (—40 °С)	Основное применение
⩽0,10	—	400	540	24	100	60	Автоматическая и полуавтоматическая сварка во всех пространственных положениях углеродистых и низколегированных конструкционных сталей
—	—	—	—	—	—	—	То же
—	—	440	510	22	120	50	»
0,10	Ti 0,02	530	690	23	86	—	»
До 0,3	—	370	510	25	120	80	Сварка низколегированных сталей типа 10ХСНД, 15ХСНД
До 0,3	—	500	630	23	100	60	То же
До 0,3	—	540	680	22	100	—	Сварка низколегированных теплоустойчивых сталей типа 30ХГСА, 15ХМА, 20ХМА
До 0,3	—	550	670	21	80	—	То же
До 0,3	V 0,1	560	670	21	70	—	Сварка низколегированных теплоустойчивых сталей типа 20ХМФЛ, 12Х1МФ, 15М1Х1Ф

Марка проволоки	Рекомендуемая защитная среда	Химический состав, %						
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
					не более			
Св-08Х3Г2СМ	CO_2	Не более 0,10	2,00	0,50	0,020	0,020	2,00	0,40
Св-15ГСТЮЦА	Воздух	0,15	0,90	0,60	0,020	0,020	—	—
Св-20ГСТЮА	»	0,17	1,00	0,70	0,020	0,020	⩽0,3	—

ких сталей типа 03Х19Н10АГ3, 03Х19АН12, 03Х18АН11, 03Х13АГ19, 03Х13Г20АН5.

Высокое содержание в проволоке Св-03Х21Н10АГ5 марганца и хрома обеспечивает повышенную растворимость азота в металле шва. Это гарантирует получение при сварке плотных и однородных швов. Свойства швов, сваренных этой проволокой, отличаются стабильностью в пределах марочного химического состава свариваемых сталей. Наличие азота в проволоке уменьшает химическую межфазную неоднородность, что способствует повышению стойкости швов против общей коррозии.

Сварные соединения, выполненные проволокой Св-03Х21Н10АГ5, имеют прочность не ниже, чем у основного металла при сварке как без разделки, так и в разделку. Наличие в составе проволоки комплекса элементов-аустенизаторов (никель, марганец, азот) способствует повышению ударной вязкости швов при криогенных температурах. Высокие механические характеристики сварных швов и соединений, сваренных этой проволокой, получены при сварке сталей 08Х22Н6Т, 08Х18Г8Н2Т и 03Х19Н10АГ3 под флюсом АНК-45.

Одним из способов повышения эффективности процесса сварки под флюсом (и электрошлаковой) является введение в зону сварки порошкообразного присадочного материала, что позволяет значительно уменьшить потери тепла в процессе сварки и повысить КПД источника тепла. В качестве ППМ используется крупка, нарубленная из сварочной проволоки диаметром 0,8—2 мм. Длина частицы крупки принимается равной диаметру проволоки. В зону сварки ППМ вводят двумя способами: путем предварительной засыпки в зазор или разделку перед сваркой или путем подачи ППМ с ферромагнитными свойствами на вылет электрода во время сварки.

Производительность сварки под флюсом может быть повышена также увеличением числа дуг, числа головок и другими способами.

Порошковая проволока (ГОСТ 26271—84) для дуговой сварки углеродистых и низколегированных сталей по условиям применения подразделяется на газозащитную (ПГ), используемую для сварки в углекислом газе или газовых смесях, и самозащитную (ПС), сварка которой осуществляется баз дополнительной защиты.

Газозащитная проволока применяется преимущественно при заводском изготовлении металлоконструкций. Самозащитная проволока в условиях выполнения монтажных работ обеспечивает получение высококачественных сварных швов даже при воздействии сильного ветра, а некоторые марки позволяют сваривать металл, покрытый окалиной или ржавчиной.

В соответствии с допустимыми пространственными положениями сварки и условиями формирования сварного шва порошковая проволока предназначается для положений: нижнего — Н; нижнего, горизонтального (на вертикальной плоскости) — Г; нижнего, горизонтального, вертикального — В; всех положений — У; горизонтального с использованием принудительного формирования — ГП; вертикального с использованием принудительного формирования — ВП; всех положений с использованием принудительного формирования — УП.

Таблица 5.3. **Типы порошковых проволок**

Тип проволоки	Предел текучести, МПа, не менее	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %, не менее
Д	—	—	—
34	340	400—550	16
39	390	450—600	22
44	440	500—650	20
49	490	550—700	20
54	540	600—750	18
59	590	650—800	16
64	640	700—850	14
69	690	750—900	10

Таблица 5.4. **Зависимость уровня проволоки от температуры испытаний и значений ударной вязкости наплавленного металла**

Уровень проволоки	Температура испытаний, при которой ударная вязкость не менее 35 Дж/см², °С	Ударная вязкость при 20 °С, Дж/см², не менее
Р	—	—
К	20	35
0	0	50
1	—10	60
2	—20	80
3	—30	80
4	—40	100
5	—50	100
6	—60	120

Таблица 5.5. **Обозначение категории проволоки в зависимости от химического состава наплавленного металла**

Категория	Массовая доля элементов, %, не более		
	C	S	P
A	0,15	0,03	0,05
B	0,15	0,04	0,04
C	0,25	0,03	0,03

Продолжение табл. 5.2

Механические свойства металла сварного шва							Основное применение
Ni	Прочие элементы	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$a_н$, Дж/см²		
					+20 °С	—40 °С	
До 0,3	—	930	1140	12	48	—	То же
—	Ti 0,04 Zr 0,01 Al 0,02	300	500	18	75	—	Сварка без дополнительной защиты низкоуглеродистых, среднеуглеродистых и низколегированных сталей
⩽0,4	Ti 0,05 Al 0,05	420	550	16	55	—	То же

В зависимости от предела текучести наплавленного металла порошковые проволоки подразделяются на типы (табл. 5.3).

В зависимости от температуры испытаний, при которой обеспечивается ударная вязкость наплавленного металла не менее 35 Дж/см², порошковые проволоки подразделяются на уровни (табл. 5.4).

В зависимости от химического состава наплавленного металла порошковой проволоке присваиваются категории А, В, С (табл. 5.5).

Пример условного обозначения порошковой проволоки марки ПП-АН7 диаметром 2,3 мм, самозащитной (ПС), обеспечивающей предел текучести наплавленного металла типа 44, категории А по химическому составу наплавленного металла, обеспечивающей ударную вязкость наплавленного металла не ниже 35 Дж/см² при температуре —20 °С (2), для сварки в нижнем, горизонтальном и вертикальном положениях (В): ПП-АН7 2,3 ПС44А2В ГОСТ 26271—84.

Технологические характеристики порошковой проволоки определяются не только химическим составом сердечника, но и ее конструкцией (формой поперечного сечения). Конструкция проволоки может быть различной в зависимости от назначения, способа защиты и др. Некоторые конструкции, получившие распространение в нашей стране, приведены на рис. 5.1, а их технические характеристики — в табл. 5.6—5.10.

Одна из новых высокопроизводительных порошковых проволок — ПП-АН57 — предназначена для сварки в углекислом газе высокопрочных сталей марок 14Х2ГМР, 12ГН2МФАЮ и других с пределом текучести свыше 588 МПа, большой толщины (40—120 мм). Сварку проводят в нижнем, наклонном и горизонтальном положениях от источников питания с жесткой внешней характеристикой. Сварка проволокой ПП-АН57 обеспечивает высокие значения механических свойств металла шва, в том числе ударную вязкость при —70° С свыше 29 Дж/см². Проволока обладает также хорошими сварочно-технологическими свойствами; разбрызгивание основного металла невелико. Сварку многопроходных швов этой проволокой выполняют по слою шлака, удаляя шлаковую корку после 4—5 проходов.

Разработаны проволоки марок ППТ-1 и ППТ-3 для сварки в инертных газах неплавящимся электродом конструкций из низко- и среднелегированных сплавов титана. При этом указанные проволоки применяются в качестве присадочного материала и позволяют получать сварочные швы за один проход без предварительной разделки кромок. Проволока ППТ-1 предназначена для сварки стыковых соединений металла толщиной 4—16 мм (прямолинейные и кольцевые швы), а проволока ППТ-3 — для сварки металла толщиной 2,0—3,2 мм, выпускаются по ТУ ИЭС 227—79 и ТУ ИЭС 228—79.

Активированная проволока состоит из металлической основы, содержащей оптимальное количество легирующих элементов, тонкого сердечника-фитиля, представляющего собой смесь стабилизирующих и поверхностно-активных шлакообразующих веществ (активирующей шихты). Масса активирующей шихты в общей массе проволоки составляет 5—8 %. Проволока предназначена для механизированной и автоматической дуговой сварки в углекислом газе. По сравнению с кремнемарганцевыми проволоками, например Св-08Г2С, активированные обеспечивают мелкокапельный перенос металла, минимальное разбрызгивание, более плавный переход от наплавленного к основному металлу и высокую производительность процесса.

Проволока АП-АН2 (ТУ ИЭС 14-4-1258—83) может быть использована для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей повышенной прочности (09Г2С, 10ХСНД) со скоростью до 70 м/ч. Проволока АП-АН4 (ТУ ИЭС 14-4-1259—83) пригодна для сварки ответственных металлоконструкций из низколегированных сталей (09Г2С, 10ХСНД, 5Г2СФД и др.), со скоростью до 100 м/ч, работающих при температурах до —60 °С. Обе эти проволоки обеспечивают хорошее формирование шва.

Проволока АП-АН11 (ТУ ИЭС 14-4-1301—84) предназначена для сварки корня стыковых швов трубопроводов из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Используется в качестве присадочной при сварке в аргоне неплавящимся электродом. Сварка корня выполняется двумя способами — непроникающей дугой с образованием сплошной ванны и проникающей дугой с образованием отверстия в головной части сварочной ванны. Например, проволока АП-АН11 использовалась при сварке корня шва на конструкциях из сталей 20 и 12Х1МФ, а последующих слоев — электродами ЦУ-5 и ЦЛ-39 соответственно. Применение активированной проволоки при сварке корня стыковых швов труб позволяет, по сравнению с проволокой сплошного сечения, улучшить формирование лицевой и обратной сторон шва и обеспечить плавный переход от поверхности валика к основному металлу; повысить производительность труда сварщиков на 20—30 % и в 3—5 раз уменьшить количество пор и шлаковых включений в металле шва.

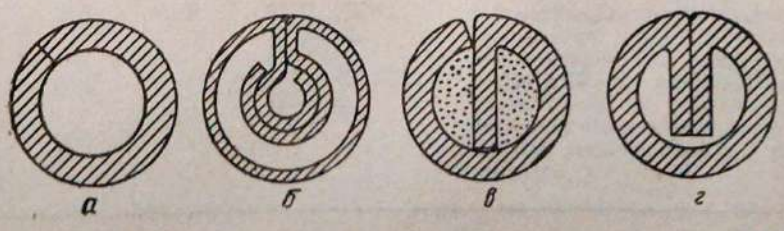


Рис. 5.1. Конструкция проволоки (поперечное сечение):
а — трубчатая; *б* — двухслойная; *в* — однозагибная; *г* — двухзагибная.

Таблица 5.6. **Технические характеристики самозащитных проволок для механизированной сварки**

Марка проволоки	Условное обозначение	Равноценные электроды (тип)	Диаметр, мм	Конструкция (позиция рис. 5.1)	Гарантийный срок хранения, мес.	Марка свариваемой стали	Основное применение
ПП-1ДСК	ПС39-ВКН	Э46, Э50	1,8; 2,35	*в*	12	Ст3, Ст4, 09Г2	Сварка металла толщиной более 3 мм. Можно сваривать металл, покрытый окалиной или ржавчиной
ПП-АН1	ПС39-ВКН	Э46, Э50	2,8	*а*	12	Ст3, Ст4, сталь 10, 15, 20, 09Г2	То же
СП-2	ПС39-В2Н	Э50, Э50А	2,5	*г*	6	Ст3сп, 09Г2, 10Г2С1	»
ППВ-4	ПС39-А2В	Э46	2,3	*в*	6	Ст3, сталь 10, 15	Сварка металла толщиной более 4 мм в нижнем положении и более 10 мм — в вертикальном
ППВ-5	ПС39-А0В	Э50А	2,3	*в*	6	Ст3, сталь 10, 15, 09Г2, 10Г2С1	Сварка металла толщиной более 3 мм в нижнем положении и более 8 мм — в вертикальном
ПП-АН3	ПС44-А4Н	Э50А	3,0	*б*	4	Ст3, 09Г2, сталь 10, 15, 10Г2С, 10Г2С1	Сварка металла толщиной более 5 мм
ПП-АН7	ПС44-А4В	Э50А	2,0; 2,3	*б*	4	Ст3, Ст4, 09Г2, 10ХСНД, 15ХСНД, 17ГС	Сварка металла толщиной более 3 мм
ПП-2ДСК	ПС44-А2Г	Э50, Э50А	2,35	*в*	6	Ст3, 09Г2, 10Г2С1	То же
ПП-АН11	ПС39-А4В	Э50А	2,0; 2,4	*б*	6	Ст3, 09Г2С, 10ХСНД, 17ГС, 10Г2С1	»
ПП-АН23	ПС39-А2Н	Э50, Э50А	3,0	*б*	6	Ст2, Ст3, 09Г2, 09Г2С, 14Г2, 25ГС (арматура)	Сварка металла толщиной более 8 мм, а также арматурных стержней в инвентарных формах

Таблица 5.7. **Технические характеристики порошковых проволок для сварки с дополнительной защитой в углекислом газе**

Марка проволоки	Условное обозначение	Равноценные электроды и проволоки (тип, марка)	Диаметр, мм	Конструкция (позиция рис. 5.1)	Гарантийный срок хранения, мес.	Марка свариваемой стали	Основное применение
ПП-АН8	ПГ44-А0Г	Э46, Э46А, Э50А, Св-08Г2С	2,2 2,5; 3,0	*а*	12	Ст3, Ст3Гпс, 18Гпс, 09Г2, 10Г2С1, 10ХСНД	Сварка металла толщиной более 3 мм. Возможна сварка на переменном токе
ПП-АН10	ПГ44-А2Г	То же	2,2	*а*	12	То же	Сварка металла толщиной более 3 мм
ПП-АН21	ПГ44-А2В	»	1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2	*а*	12	»	Сварка металлоконструкций, работающих с приложением статических и динамических нагрузок, при толщине металла более 2 мм
ПП-АН13	ПГ39-А0Н	»	2,2; 2,5	*а*	12	»	Сварка углеродистых и низколегированных сталей
ПП-АН4	ПГ39-А4Г	»	2,0; 2,2; 2,5	*а*	12	Ст3, Ст3Гпс, 18Гпс, 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1, 10ХСНД, 15ХСНД, 14Г2	Сварка ответственных металлоконструкций с тяжелым режимом работы при толщине металла более 3 мм
ПП-АН9	ПГ44-А4Н	»	2,2; 2,5	*а*	12	То же	Сварка металлоконструкций, работающих в условиях динамического нагружения и низких температур

Продолжение табл. 5.7

Марка проволоки	Условное обозначение	Равноценные электроды и проволоки (тип, марка)	Диаметр, мм	Конструкция (позиция рис. 5.1)	Гарантийный срок хранения, мес.	Марка свариваемой стали	Основное применение
ПП-АН22	ПГ44-А3Г	Э50А	1,8; 2,2; 2,5	*а*	9	Ст3, Ст3Гпс, 18Гпс, 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1, 10ХСНД, 15ХСНД, 14Г2	Сварка ответственных металлоконструкций, работающих с приложением статических и динамических нагрузок, при толщине металла более 3 мм
ПП-АН20	ПГ44-А5Н	Э60	2,2; 2,4; 2,5	*а*	12	16Г2АФ, 18Г2АФ	Сварка металлоконструкций, работающих в условиях динамического нагружения и низких температур, при толщине металла более 5 мм
ПП-АН54	ПГ64-А4Г	АПН-2	2,2; 2,5; 3,0	*а*	12	14Х2ГМР, 14Х2ГНМ, 12ГН2МФАЮ, 14ХГНМ	Сварка ответственных металлоконструкций из высокопрочных сталей при толщине металла более 5 мм

Таблица 5.8. Технические характеристики порошковых проволок специализированного назначения

Марка проволоки	Условное обозначение	Равноценные электроды и проволоки (тип, марка)	Диаметр, мм	Конструкция (позиция рис. 5.1)	Марка свариваемой стали	Основное применение
ПП-АН5	ПГ44-А2ВП	Э50А	3,0	*а*	Ст3сп, 09Г2	Автоматическая сварка с принудительным формированием шва вертикальных соединений при толщине металла 10—30 мм в углекислом газе
ПП-АН3С	ПГ44-А2ГП	Э50А, Св-08Г2С	3,2; 3,5	*б*	09Г2, 09Г2С	Автоматическая сварка с полупринудительным формированием горизонтальных швов листовых конструкций при толщине металла 10—30 мм
ПП-АН19	ПС44-А4УП	Э50А, Э55, Св-08Г2С	2,3; 3,0; 3,5	*б*	09Г2, 09Г2С, 10Г2СД, 10ХСНД, 15ХСНД, 10ХН1М, 17ГС, 15ГСТЮ, 17ГСФ	Автоматическая сварка вертикальных швов с принудительным формированием (d = = 3 мм), горизонтальных швов с полупринудительным формированием (d = 3,5 мм) и кольцевых швов неповоротных стыков труб большого диаметра при толщине металла 10—30 мм
ПП-АН19Н	ПС44-А4ВП	Э50А, Св-08Г2С	3,0	*б*	Ст3сп, 09Г2, 10ХСНД	Автоматическая сварка с принудительным формированием шва при толщине металла 10—30 мм. Отличается повышенной коррозионной стойкостью
ПП-АН19С	ПС49-А3ВП	Э50А, Э60, Св-08Г2С	3,0	*б*	09Г2, 09Г2С, 10ХСНД, 15ХСНД, 16Г2АФ, 17ГС, 10ХНМ	Автоматическая сварка с принудительным формированием шва вертикальных сварных соединений при толщине металла 12—60 мм. Возможна сварка на повышенных токах. Сливать избыток шлака не требуется

Продолжение табл. 5.8

Марка проволоки	Условное обозначение	Равноценные электроды и проволоки (тип, марка)	Диаметр, мм	Конструкция (позиция рис. 5.1)	Марка свариваемой стали	Основное применение
ПП-АН15	ПС44-А2ВП	Св-08Г2С	3,0	*г*	Ст3сп, 09Г2, 10ХСНД	Автоматическая сварка с принудительным формированием вертикальных швов при толщине металла 10—30 мм
ПП-АН24	ПС49-А4УП	Э60, Св-08Г2С	2,3	*б*	17Г1СФ, 17ГС, 17ГС1	Автоматическая сварка с принудительным формированием шва неповоротных стыков труб большого диаметра. Используется на самоходных комплексах типа «Стык»
ПП-2ВДСК	ПС39-А2ВП	Э50, Э50А, Св-08Г2С	2,4	*в*	Ст3, Ст3Гпс, 18Гпс, 09Г2, 10Г2С1, 09Г2С, 10ХСНД	Автоматическая сварка вертикальных швов с принудительным формированием при толщине металла 10—30 мм
ППС-АН1	ПС34-АУ	Э46	1,6	*а*	Ст3, 09Г2, 10ХГС, 14ХГС	Подводная сварка на глубине до 100 м с обеспечением стабильности процесса и качества. Возможна сварка в любых пространственных положениях

Таблица 5.9. **Технические характеристики порошковых проволок для сварки легированных сталей**

Марка проволоки	Условное обозначение	Равноценные электроды (марка)	Диаметр, мм	Марка свариваемой стали	Основное применение
ПП-АНВ1	ПС44-АГ	ЦЛ-11	2,6; 3,0	04Х18Н10, 08Х18Н10, 12Х18Н9, 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 12Х18Н9	Сварка высоколегированных коррозионно-стойких сталей типа 18-8 при толщине металла более 5 мм
ПП-АНВ2	ПС39-АГ	НИАТ-5	2,6; 3,0	110Г13Л + 30Г, 45Г17Ю3 + + 45Г17Ю3, 45Г17Ю3 + Ст3сп, 45Г17Ю3+12Х18Н10Т, 12Х18Н10Т + Ст3сп	Сварка комбинированных соединений сталей типа 30Г с марганцовистыми типа 110Г13Л в закаленном состоянии, а также углеродистых со сталями типа 18-8 при толщине металла более 5 мм
ПП-АНВ3	ПС34-АГ	АНВ-28	2,6; 3,0	ЭИ-943, ЭИ-943 + низкоуглеродистые стали	Сварка сплава ЭИ943 и его комбинированных соединений с углеродистыми сталями при толщине металла более 5 мм
ПП-АНА1	ПС34-АГ	ЭЛ396/9	2,5	Среднелегированные высокопрочные стали	Сварка конструкций из высокопрочных среднелегированных сталей при толщине металла более 5 мм

Таблица 5.10. **Технические характеристики порошковых проволок для сварки чугуна**

Марка проволоки	Марка равноценных электродов	Диаметр, мм	Свариваемый чугун	Основное применение
ПП-АНЧ2	ОМЧ-1	3,0	Феррито-перлитные, серые (СЧ18-36 и др.)	Ремонтная сварка или исправление дефектов литья из чугуна с пластинчатым графитом
ПП-АНЧ5	ЭВЧ-1	3,0	ВЧ45-5, ВЧ50-2, серые	Исправление дефектов литья и ремонтная сварка высокопрочного чугуна с шаровидным графитом

5.1.2. Электроды и прутки для ручной дуговой сварки и резки

Сварочные работы в строительстве, особенно при монтаже металлических конструкций зданий и сооружений, технологического оборудования и трубопроводов, выполняются преимущественно ручной электродуговой сваркой штучными (стержневыми) электродами. Это связано с разбросанностью рабочих мест при относительно небольших объемах сварки на каждом, необходимостью выполнения работ в неудобных пространственных положениях, влиянием неблагоприятных погодных и других условий.

Применяются только покрытые электроды. Назначение покрытий — обеспечить необходимые механические и сварочно-технологические свойства: легкое зажигание и устойчивое горение дуги; равномерное плавление покрытия и металлического стержня; равномерное покрытие шва шлаком и легкое удаление шлака после сварки; получение металла шва с заранее заданными свойствами (прочностью, пластичностью, ударной вязкостью, углом загиба, коррозионной стойкостью и др.), нужного химического состава, без непроваров, пор, трещин и других дефектов.

Электроды для сварки углеродистых, низколегированных конструкционных и теплоустойчивых сталей выпускаются в соответствии с ГОСТ 9466—75* «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация и общие технические условия», а также ГОСТ 9467—75* «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей. Типы». Эти стандарты устанавливают также размеры, правила приемки, методы испытаний, требования к упаковке, маркировке, хранению.

В соответствии со стандартом типы электродов обозначаются буквой Э, после которой следуют цифры, характеризующие минимальное временное сопротивление разрыву наплавленного металла (в кгс/мм²). Если после цифр следует буква А, то электроды обеспечивают повышенные значения относительного удлинения и ударной вязкости. Каждый тип включает одну или несколько марок электродов.

Устанавливаются следующие типы электродов для сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей: Э38, Э42, Э46, Э50 — для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву до 500 МПа; Э42А, Э46А, Э50А — для сварки этих же сталей, когда к металлу сварных швов предъявляют повышенные требования по пластичности и ударной вязкости; Э55, Э60 — для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением 500—600 МПа; Э70, Э85, Э100, Э125, Э150 — для сварки легированных конструкционных сталей повышенной и высокой прочности с временным сопротивлением разрыву свыше 600 МПа; Э-09М, Э-09МХ, Э-09Х1М, Э-05Х2М, Э-09Х2М1, Э-09Х1МФ, Э-10Х1М1НФБ, Э-10Х5МФ — для сварки легированных теплоустойчивых сталей. Размеры электродов должны соответствовать приведенным в табл. 5.11 и на рис. 5.2.

Назначение электродов определяется степенью легирования свариваемых сталей и их прочностными характеристиками. По назначению электроды обозначаются буквами: У — для сварки углеродистых и низколегированных сталей с $\sigma_в \leqslant 600$ МПа; Л — для сварки легированных конструкционных сталей с $\sigma_в \geqslant 600$ МПа; Т — для сварки легированных теплоустойчивых сталей; В — для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами; Н — для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами.

Таблица 5.11. Размеры электродов для ручной дуговой сварки и резки, мм

d	L электрода со стержнем из сварочной проволоки		l (предельные отклонения ±5)
	низкоуглеродистой или легированной	высоколегированной	
1,6	200, 250	150, 200 (250)	20
2,0	250 (300)	200, 250 (300)	20
2,5	250, 300 (350)	250 (300)	20
3,0	300, 350 (450)	300, 350	25
4,0	350, 450	350 (450)	25
5,0; 6,0; 8,0	450	350, 450	25
10,0; 12,0	—	—	30

Примечания. 1. Размеры, указанные в скобках, при изготовлении электродов использовать не рекомендуется. 2. d — номинальный диаметр электрода, определяемый диаметром стержня, L — номинальная длина электрода, l — длина зачищенного от покрытия конца электрода.

По толщине покрытия, в зависимости от отношения D/d (D — диаметр электрода, d — диаметр стержня), для электродов введены следующие обозначения: М — с тонким покрытием ($D/d \leqslant 1{,}20$); С — со средним покрытием ($1{,}20 < D/d < 1{,}45$); Д — с толстым покрытием ($1{,}45 < D/d \leqslant 1{,}80$); Г — с особо толстым покрытием ($D/d > 1{,}80$).

Применительно к электродам для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву до 600 МПа в условном обозначении электродов по ГОСТ 9467—75* установлена группа индексов (табл. 5.12), характеризующих металл шва и наплавленный металл по временному сопротивлению, относительному удлинению и минимальной температуре, при которой ударная вязкость составляет не менее 35 Дж/см².

По видам покрытия электроды обозначаются следующими индексами: 1) А — с кислым покрытием, содержащим оксиды железа, марганца, кремния, иногда титана. К ним относятся марки СМ-5, ОМА-2 и др. В связи с повышенным окислением металла шва и повышенной токсичностью электроды этих марок в нашей стране применяются мало. Сварку электродами с кислым покрытием можно выполнять на постоянном (прямой и обратной полярности) и переменном токе в различных пространственных положениях; 2) Б — с основным покрытием, содержащим в качестве основы фтористый кальций (плавиковый шпат) и карбонаты (мрамор, мел). К этому виду относятся, например, УОНИ 13/45, УОНИ 13/55, СМ-11, ДСК-50, СК-2-50. Сварку указанными электродами ведут на постоянном токе обратной полярности. Электроды СМ-11, ДСК-50, ДСК-50У, СК-2-50 позволяют также вести сварку на переменном токе, что дает определенные преимущества при выполнении монтажных сварочных работ. Электроды этой группы пригодны для сварки в различных пространственных положениях (электроды СК-2-50 особенно пригодны для сварки вертикальных швов). Электроды с основным покрытием, особенно типа УОНИ, предназначаются для сварки ответственных конструкций, когда к металлу сварных швов предъявляются повышенные требования по пластичности и ударной вязкости. Металл шва, наплавленный этими электродами, характеризуется высокой стойкостью

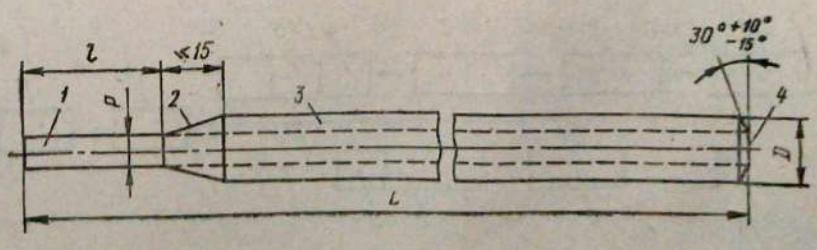


Рис. 5.2. Покрытый электрод:
1 — стержень; *2* — участок перехода; *3* — покрытие; *4* — контактный торец без покрытия

Таблица 5.12. **Группа индексов условного обозначения электродов для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву наплавленного металла до 600 МПа по ГОСТ 9467—75***

Группа индексов	Минимальные показатели механических свойств наплавленного металла и металла шва при нормальной температуре		Минимальная температура T_x, °С, при которой $a_н$ металла шва и наплавленного металла не менее 35 Дж/см²
	$\sigma_в$, МПа	δ_5, %	
37 0	370	При любом значении	При любом значении
41 0	410	До 20	Не регламентировано
41 1	410	20	20
41 2	410	22	0
41 3	410	24	—20
41 4	410	24	—30
41 5	410	24	—40
41 6	410	24	—50
41 7	410	24	—60
43 0	430	До 20	Не регламентировано
43 1	430	20	20
43 2	430	22	0
43 3	430	24	—20
43 4	430	24	—30
43 5	430	24	—40
43 6	430	24	—50
43 7	430	24	—60
51 0	510	До 18	Не регламентировано
51 1	510	18	20
51 2	510	18	0
51 3	510	18	—20
51 4	510	20	—30
51 5	510	20	—40
51 6	510	20	—50
51 7	510	20	—60

против образования кристаллизационных трещин и низким содержанием водорода; 3) Ц — с целлюлозным покрытием, имеющим в качестве основы целлюлозу и другие органические компоненты. К электродам с этим покрытием относятся ВСЦ-2, ВСЦ-4, ВСЦ-4А. Электроды имеют среднюю толщину покрытия (С). Ими можно вести сварку корневого слоя стыкового шва на постоянном токе прямой и обратной полярности, обеспечивая образование равномерного обратного валика. Для этих электродов характерны глубокое проплавление свариваемых кромок, хорошая отделимость шлака, малая чувствительность к наличию следов ржавчины и загрязнений на кромках. Применяются преимущественно при строительстве трубопроводов; 4) Р — с рутиловым покрытием, основные компоненты которого — рутил (диоксид титана) и алюмосиликаты. Разработано и применяется много марок этих и рутилоосновных электродов. К ним относятся: МР-3, АНО-4, АНО-5, АНО-18 (с железным порошком), ОЗС-4, РБУ-4, РБУ-5. Электроды отличаются хорошими сварочно-технологическими свойствами, позволяют вести сварку на переменном и постоянном токе. При сварке рутиловыми электродами с поверхности шва легко удаляется шлаковая корка. Электроды мало чувствительны к изменениям режима сварки и образованию пор при окисленной поверхности свариваемых кромок. Вместе с тем в металле шва, выполненного этими электродами, повышено содержание водорода и других газов, а также количество неметаллических включений. Стойкость металла шва, выполненного рутиловыми электродами, к образованию кристаллизационных трещин ниже, чем при применении основных электродов; 5) П — прочие виды покрытий.

Электроды смешанного типа, например АНО-13 с рутил-целлюлозным покрытием, обозначаются соответствующим двойным индексом РЦ.

Если в составе покрытия содержится железный порошок в количестве более 20 %, к указанным индексам покрытия добавляется буква Ж.

По допустимым пространственным положениям сварки электроды обозначают цифрами: для всех положений — 1; для всех положений, кроме вертикального сверху вниз,— 2; для нижнего, горизонтального на вертикальной плоскости и вертикального снизу вверх — 3; для нижнего и нижнего «в лодочку» — 4.

По роду применяемого тока электроды предназначаются для сварки на постоянном, переменном или постоянном и переменном токе (табл. 5.13).

Сварка на постоянном токе ведется на прямой или обратной полярности. При прямой полярности электрододержатель присоединяется к отрицательному полюсу источника постоянного тока, при обратной — к положительному полюсу.

Структура условного обозначения электродов приведена на рис. 5.3. Условные обозначения помещаются на этикетках в маркировке пачек, коробок, ящиков.

Таблица 5.13. **Условные обозначения электродов по роду и полярности тока**

Рекомендуемая полярность постоянного тока	Напряжение холостого хода источника переменного тока, В		Обозначение
	номинальное	предельное отклонение	
Обратная	—	—	0 *
Любая	50	±5	1
Прямая	50	±5	2
Обратная	50	±5	3
Любая	70	±10	4
Прямая	70	±10	5
Обратная	70	±10	6
Любая	90	±5	7
Прямая	90	±5	8
Обратная	90	±5	9

* Электроды для сварки или наплавки только на постоянном токе обратной полярности.

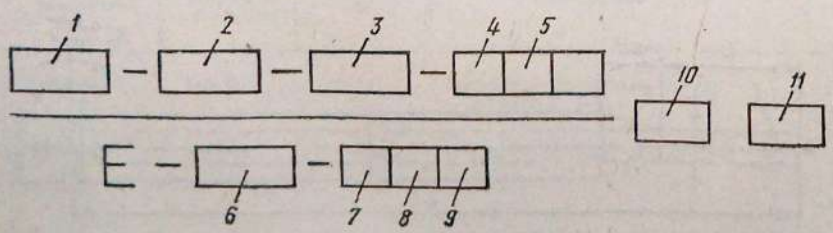


Рис. 5.3. Условное обозначение электродов на этикетках или в маркировке коробок, пачек и ящиков с электродами (ГОСТ 9467—75*):

1 — тип; *2* — марка; *3* — диаметр; *4* — назначение электродов; *5* — обозначение толщины покрытия; *6* — группа индексов, указывающих характеристики наплавленного металла по ГОСТ 9467—75*, ГОСТ 10051—75*; *7* — обозначение вида покрытия; *8* — обозначение допустимых пространственных положений сварки или наплавки; *9* — обозначение рода применяемого при сварке или наплавке тока, полярности постоянного тока и номинального напряжения холостого хода источника питания сварочной дуги переменного тока частотой 50 Гц; *10* — обозначение ГОСТ 9466—75*; *11* — обозначение ГОСТ 9467—75*.

Таблица 5.14. Технические характеристики электродов для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей

Тип	Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Род тока, полярность	Положение свариваемых швов	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Выход наплавленного металла, %	Режим прокалки: температура, °С	Режим прокалки: время, мин	Назначение, особые свойства
Э42	АНО-1	4,0 5,0	180—240 250—320	~, = (—)	4	15	175	180	50	Сварка низкоуглеродистых и низколегированных сталей (типа 09Г2), низкая склонность к образованию пор и кристаллизационных трещин
	АНО-6	4,0 5,0	130—200 150—270	~, =	2	9	93	180	60	Сварка низкоуглеродистых сталей с $\sigma_в$ до 430 МПа, низкая склонность к образованию пор и кристаллизационных трещин
	АНО-6М	4,0 5,0	130—200 150—270	~, =	2	8,5	85,5	180	60	То же, легкая отделимость шлаковой корки
	АНО-17	4,0 5,0	130—210 130—280	~, =	2	8,5	109	180	60	Сварка низкоуглеродистых сталей с $\sigma_в$ до 430 МПа, высокая стойкость против образования кристаллизационных трещин, повышенная производительность
	ОЗС-23	2,5 3,0	50—90 70—100	~, =	2	8,5	96	—	—	Сварка тонколистовой углеродистой стали, малая чувствительность к пористости
	ВСЦ-4	4,0	120—170	=	1	10	—	100—110	60	Сварка первого и второго слоев стыков труб из низкоуглеродистых и низколегированных сталей с $\sigma_в$ до 600 МПа
Э42А	УОНИ 13/45	3,0 4,0 5,0	70—100 130—150 160—200	= (+)	2	8,5	93	350—370	60	Сварка особо ответственных конструкций, металл шва отличается низким содержанием водорода
	СМ-11	4,0 5,0	140—220 160—250	~, = (+)	2	9,5	103	300—350	60	Сварка ответственных конструкций
Э46	РБУ-5	4,0 5,0	150—210 180—270	~, =	2	9,0	116	200	90	Сварка конструкций из низкоуглеродистых сталей
	АНО-18	4,0 5,0	150—220 160—300	~, = (—)	2	10,5	120	180	60	То же
	ОЗС-4	4,0 5,0	150—180 170—250	~, =(+)	2	9,0	90	140	40	Сварка сталей с $\sigma_в$ до 500 МПа, допускается сварка удлиненной дугой
	ОЗС-6	4,0 5,0	130—210 210—300	~, = (+)	2	10,0	115	160	60	То же

Тип	Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Род тока, полярность	Положение свариваемых швов	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Выход наплавленного металла, %	Режим прокалки: температура, °С	Режим прокалки: время, мин	Назначение, особые свойства
Э46	АНО-4	4,0 5,0	150—200 160—270	~, = (—)	2	8,3	115	190—200	40	Сварка рядовых и ответственных конструкций из низкоуглеродистых сталей
	АНО-13	4,0 5,0	170—190 190—260	~, = (—)	1	9,0	96	200	40	Сварка конструкций из низкоуглеродистых сталей, особенно соединений с разделкой способом «сверху вниз»
	ОЗС-12	3,0 4,0	80—110 120—160	~, = (—)	1	8,5	94	160	30	Сварка сталей с $\sigma_в$ до 500 МПа, особенно тавровых соединений с получением вогнутых швов
	ОЗС-21	4,0 5,0	120—160 160—200	~, = (+)	2	8,5	96	140	40	Сварка ответственных конструкций из сталей с $\sigma_в$ до 500 МПа, легкая отделимость шлака
	МР-3	4,0 5,0	160—200 180—260	~, = (+)	2	7,8	90	170—200	90	Сварка ответственных конструкций из сталей с $\sigma_в$ до 400 МПа
	РБУ-4	4,0 5,0	140—200 150—250	~, =	2	7,8	—	200	90	Сварка конструкций из низкоуглеродистых сталей
	АНО-20	4,0 5,0	180—240 260—320	~, = (—)	4	8,5	160	180	60	Высокопроизводительная сварка, особенно тонколистового металла
Э46А	ОЗС-22Р	4,0	140—200	~, =	1	10,0	108	220	90	Сварка сталей типа 09Г2, 10ХСНД, в том числе по загрунтованной поверхности
	УОНИ 13/55К	4,0 5,0	120—160 160—210	= (+)	2	9,5	93	260	60	Сварка особо ответственных конструкций, высокая стойкость против кристаллизационных трещин, низкое содержание водорода
Э50	ВСЦ-4А	3,0 4,0	90—110 120—170	=	1	9,5	—	100	60	Сварка первого и второго слоев стыков труб из сталей с $\sigma_в$ до 630 МПа
Э50А	УОНИ 13/55	3,0 4,0 5,0	70—100 130—160 160—210	= (+)	2	9,0	93	350	60	Сварка особо ответственных конструкций, низкое содержание водорода
	ДСК-50	4,0 5,0	200—220 250—270	~, = (+)	2	10,0	103	360	60	Сварка низколегированных сталей типа 14ХГС, 15ХСНД
	СК-2-50	4,0 5,0	160—220 180—280	~, = (+)	2	9,5	95	400	60	Сварка ответственных конструкций, особенно пригодны для сварки вертикальных швов
	АНО-9	3,0 4,0 5,0	100—150 160—210 180—270	~, = (+)	2	8,5	103	280	60	Сварка особо ответственных конструкций, легкая отделимость шлака, в том числе из глубокой разделки

Продолжение табл. 5.14

Тип	Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Род тока, полярность	Положение свариваемых швов	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Выход наплавленного металла, %	Режим прокалки: температура, °С	Режим прокалки: время, мин	Назначение, особые свойства
Э50А	ОЗС-18	3,0 4,0 5,0	60—110 120—170 150—190	= (+)	2	9,5	—	260	60	Сварка ответственных конструкций из стали 10ХНДП, высокая стойкость против атмосферной коррозии, низкое содержание водорода
	ТМУ-21	3,0 4,0 5,0	100—130 130—180 210—280	= (+)	2	9,5	96	400	90	Сварка ответственных конструкций и трубопроводов атомных электростанций
Э60	УОНИ 13/65	3,0 4,0 5,0	70—110 120—160 150—210	= (+)	2	9,0	95	400	60	Сварка ответственных конструкций из сталей с $\sigma_в$ до 600 МПа, в том числе работающих при низких температурах, низкое содержание водорода
	ВСФ-65У	4,0 5,0	140—170 200—250	= (+)	2	9,5	—	350	60	Сварка заполняющих и облицовочного слоев стыков труб из сталей с $\sigma_в$ = 530...635 МПа
Э70	АНП-2	3,0 4,0 5,0	100—120 150—200 200—250	= (+)	2	9,0	97	420	120	Сварка низколегированных высокопрочных сталей с $\sigma_в$ свыше 600 МПа
Э85	ВСФ-85	3,0 4,0	100—120 140—170	= (+)	2	9,5	—	400	60	Сварка неповоротных стыков термически упрочненных труб с $\sigma_в$ = = 685...700 МПа, а также легированных сталей с $\sigma_в$ свыше 580 МПа
	УОНИ 13/85	3,0 4,0 5,0	80—120 120—150 130—170	= (+)	2	10,0	95	370	60	Сварка особо ответственных конструкций из сталей повышенной прочности с $\sigma_в$ = 600... ...1000 МПа
	УОНИ 13/85У	3,0 4,0 5,0	80—120 100—180 140—220	∽, = (+)	2	9,5	95	300—350	60	Сварка ванным способом рельсов и стержней арматуры железобетонных конструкций, а также дуговая сварка конструкций из сталей повышенной прочности

Примечание. В графе «Род тока, полярность» приняты обозначения: ∽ — переменный ток; =(+) — постоянный ток обратной полярности; =(—) — постоянный ток прямой полярности; = — постоянный ток любой полярности.

Пример условного обозначения. Электроды типа Э50А, по ГОСТ 9467—75*, марки ДСК-50, диаметром 5 мм, для сварки углеродистых и низколегированных сталей — У, с толстым покрытием — Д, с установленной стандартом группой индексов, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва,— 51 2 (5), с основным покрытием — Б, для сварки во всех пространственных положениях (кроме вертикального сверху вниз) — 2, на постоянном (любой полярности) и переменном токе — 4:

$$\frac{\text{Э50А — ДСК-50 — 5 — УД}}{\text{Е — 51 2 (5) — Б24}}\ \text{ГОСТ 9466 — 75*;}$$

ГОСТ 9467 — 75*.

Условные обозначения электродов для ручной дуговой сварки конструкционных сталей с $\sigma_в \geqslant 600$ МПа отличаются от приведенных на рис. 5.3. В обозначении этих электродов позиция 6 содержит три индекса: первый — двузначное число, выражающее среднее содержание углерода (в сотых долях процента) в наплавленном металле; второй — характеризующий химический состав наплавленного металла (по принятой буквенной маркировке для стали); третий — определяющий минимальную температуру, при которой ударная вязкость наплавленного металла составляет не менее 35 Дж/см² (применяется по табл. 5.15).

Характеристики распространенных марок электродов для сварки углеродистых и конструкционных сталей приведены в табл. 5.14.

Таблица 5.15. Индексы, характеризующие металл шва и наплавленный металл при сварке конструкционных ($\sigma_в \geqslant 600$ МПа) и легированных теплоустойчивых сталей по ГОСТ 9467—75 *

Минимальная температура, при которой $a_н \geqslant 35$ Дж/см², °С	Индекс	Максимальная рабочая температура, при которой регламентированы показатели длительной прочности, °С	Индекс
Не регламентирована	0	Не регламентирована или ниже 450	0
20	1	450—465	1
0	2	470—485	2
—20	3	490—505	3
—30	4	510—525	4
—40	5	530—545	5
—50	6	550—565	6
—60	7	570—585	7
—	—	590—600	8
—	—	Свыше 600	9

В обозначении электродов для сварки теплоустойчивых сталей позиция 6 содержит двузначный индекс: первая цифра его характеризует минимальную температуру, при которой ударная вязкость составляет не менее 35 Дж/см², вторая — максимальную рабочую температуру, при которой регламентированы показатели длительной прочности наплавленного металла и металла шва (табл. 5.15).

Таблица 5.17. Индексы, характеризующие наплавленный металл и металл шва при сварке высоколегированных сталей

Стойкость наплавленного металла и металла шва против межкристаллитной коррозии (испытания по ГОСТ 6032—84)	Максимальная рабочая температура, при которой регламентированы показатели длительной прочности, °С	Максимальная рабочая температура сварных соединений, при которой допускается применение электродов для сварки жаростойких сталей, °С	Содержание ферритной фазы в наплавленном металле, %	Индекс
Данные отсутствуют	Нет свед.	Нет свед.	Не нормируется	0
По методу:				
А	До 500	До 600	0,5—4,0	1
АМ	510—550	610—650	2,0—4,0	2
Б	560—660	660—700	2,0—5,5	3
В	610—650	710—750	2,0—8,0	4
Д	660—700	760—800	2,0—10,0	5
—	710—750	810—900	4,0—10,0	6
—	760—800	910—1000	5,0—15,0	7
—	810—850	1010—1100	10,0—20,0	8
—	Свыше 850	Свыше 1100	—	9

Таблица 5.16. Технические характеристики электродов для сварки легированных теплоустойчивых сталей

Тип электрода	Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Выход наплавленного металла, %	Режим прокалки		Назначение, особые свойства
						температура, °С	время, мин	
Э-09МХ	ОЗС-11	3,0 4,0 5,0	70—110 120—150 150—210	8,5	89	180	30	Сварка конструкций из сталей 12МХ, 15МХ, 12ХМФ и других, работающих при температуре до 510 °С
Э-09Х1М	ТМЛ-1У	3,0 4,0 5,0	60—100 100—170 140—200	9,0	102	370	90	Сварка паропроводов из сталей 12МХ, 20ХМФЛ и других, поверхностей нагрева из сталей 12Х2МФСР и 12Х2МФБ независимо от рабочей температуры
Э-09Х1МФ	ЦЛ-20	4,0 5,0	140—160 180—210	10,4	—	330—350	45	Сварка конструкций из сталей 20ХМФЛ, 12Х1НФ, работающих при 500—700 °С
	ТМЛ-3У	3,0 4,0 5,0	110—120 140—160 180—210	9,5	98	400	90	Сварка стыков паропроводов из сталей 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 20ХМФЛ и других, работающих при температурах до 570 °С, сварка элементов поверхностей нагрева из сталей 12Х1МФ, 12ХМФБ, 12Х2МФСР независимо от рабочей температуры
	ЦЛ-39	2,5	75—90	9,5	94	400	60	Сварка элементов поверхностей нагрева и стыков труб диаметром до 100 мм и толщиной стенки до 8 мм из сталей 12Х1МФ, 12Х2МФСР, 12ХМФБ
Э-10Х5МФ	ЦЛ-17	3,0 4,0 5,0	80—120 130—160 180—210	10,5	94	300—350	45	Сварка сталей Х5М, 15ХМФА и других, работающих при температурах до 450 °С в контакте с агрессивной средой

Примечание. Все марки электродов пригодны для сварки на обратной полярности в любых пространственных положениях кроме «сверху вниз».

Таблица 5.18. **Технические характеристики электродов для сварки высоколегированных сталей**

Тип электрода	Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Выход наплавленного металла, %	Назначение
Э-12Х13	УОНИ13НЖ	2,0 3,0 4,0	40—60 60—100 100—140	11,0	93	Сварка ответственных конструкций из хромистых сталей марок 08Х13, 12Х13
Э-02Х21Н10Г2	ОЗЛ-22	3,0 4,0	55—85 90—130	13,0	90	Сварка хромоникелевых сталей марок 04Х18Н10, 03Х18Н12, 03Х18Н11, работающих в окислительных средах
Э-07Х20Н9	ОЗЛ-8	2,0 3,0 4,0	30—50 50—70 100—130	13,0	95	Сварка коррозионно-стойких сталей марок 08Х18Н10, 12Х18Н9, 08Х18Н10Т
Э-08Х20Н9Г2Б	ОЗЛ-7	2,0 3,0 4,0	25—50 50—80 90—130	12,0	93	Сварка коррозионно-стойких сталей марок 08Х18Н10, 08Х18Н12Т и т. п.
Э-08Х19Н10Г2Б	ЦТ-15	2,0 3,0 4,0	40—70 70—100 100—140	10,5	93	Сварка ответственных конструкций из аустенитных сталей марок Х18Н9Т-Л, 12Х18Н9Т и им подобных, работающих при 670—650 °С
Э-02Х20Н14Г2М2	ОЗЛ-20	3,0 4,0	55—85 90—130	13,5	90	Сварка хромоникельмолибденовых сталей аустенитных марок 03Х16Н15М3, 03Х17Н14М2 и т. п., а также стали 08Х17Н15М3Т
Э-08Х17Н8М2	НИАТ-1	2,0 3,0	30—50 50—80	10,5	95	Сварка преимущественно тонколистовых сталей 08Х18Н10, 10Х17Н13М2Т и т. п.
Э-09Х19Н10Г2М2Б	НЖ-13	3,0 4,0	70—90 110—140	13	95	Сварка сталей марок 10Х17Н13М2Т, 08Х17Н15М3Т и т. п., в частности для сред типа серной кислоты
Э-10Х20Н70Г2М2Б2В	ОЗЛ-25Б	3,0	60—80	14	110	Сварка жаростойких сплавов типа ХН78Т и разнородных сталей
Э-10Х25Н13Г2	ОЗЛ-6	3,0 4,0	50—80 100—140	11,5	95	Сварка литья и проката из жаростойких сталей марок 20Х2Н13, 20Х23Н18, работающих при температурах до 1000 °С
Э-10Х25Н13Г2Б	ЦЛ-9	3,0 4,0	70—100 100—150	11	93	Сварка двухслойного металла со стороны легированного слоя сталей 12Х18Н10Т, 12Х18Н9Т, 08Х13
Э-28Х24Н16Г6	ОЗЛ-9А	3,0 4,0	50—90 90—130	13,5	93	Сварка жаростойких сталей 12Х25Н16Г7АР, 45Х25Н20С2, работающих в окислительных средах при температурах до 1050 °С
Э-10Х17Н13С4	ОЗЛ-29	3,0 4,0	70—90 80—120	15,5	103	Сварка конструкций из жаростойких сталей 20Х20Н14С2, 20Х25Н20С2 и других, работающих в окислительных средах (до 1100 °С) и науглероживающих средах
Э-11Х15Н25М6АГ2	НИАТ-5	2,0 3,0 4,0	30—50 60—100 100—140	12,5	95	Сварка сталей 30ХГСА, 30ХГСНА и других низколегированных сталей в закаленном состоянии без последующей термообработки
Э-10Х20Н9Г6С	НИИ-48Г	3,0 4,0	70—90 120—140	11,5	95	Сварка низколегированных специальных сталей и высокомарганцовистой 110Г13-Л, пригодны для сварки разнородных сталей
Э-08Х20Н60М15В3	АНЖР-1	3,0 4,0	70—95 100—125	15	95	Сварка разнородных сталей (жаропрочных с теплоустойчивыми), а также закаливающихся без последующей термообработки
Э-07Х20Н9	АНВ-29	3,0 4,0 5,0	60—110 90—150 110—180	14,5	—	Сварка хромоникелевых сталей 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, высокая стабильность горения дуги на постоянном и переменном токе, сварка во всех пространственных положениях

Тип электрода	Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Коэффициент наплавки, г/(А · ч)	Выход наплавленного металла, %	Назначение
Э-08Х20Н9Г2Б	АНВ-35	3,0 4,0 5,0	60—110 90—150 110—180	14,5	—	Сварка хромоникелевых сталей 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, высокая стабильность горения дуги на постоянном и переменном токе, сварка во всех пространственных положениях
Э-02Х21Н10Г2	АНВ-34	3,0 4,0 5,0	60—110 90—150 110—180	14,5	—	Сварка хромоникелевых сталей 03Х18Н11, 03Х18Н10АГ3, высокая стабильность горения дуги на постоянном и переменном токе, сварка во всех пространственных положениях

Характеристики некоторых марок электродов для сварки легированных теплоустойчивых сталей приведены в табл. 5.16.

Электроды для сварки высоколегированных сталей по ГОСТ 10052—75* в обозначении (см. рис. 5.3, *б*) имеют четырехзначный индекс, в котором первая цифра характеризует стойкость наплавленного металла и металла шва против межкристаллитной коррозии, вторая — максимальную рабочую температуру, при которой регламентированы показатели длительной прочности, третья — максимальную рабочую температуру сварных соединений, при которой допускается применение электродов для сварки жаростойких сталей, четвертая — содержание ферритной фазы в наплавленном металле для электродов, обеспечивающих аустенитно-ферритную структуру наплавленного металла (табл. 5.17). Характеристики электродов приведены в табл. 5.18.

Разработан и выпускается промышленностью ряд марок электродов специального назначения. К ним могут быть отнесены электроды для сварки в наклонном положении, для сварки хладостойких низколегированных сталей, для ремонтной сварки и др. Новые марки электродов разработаны ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины совместно с другими организациями и предприятиями. Эти электроды предназначены для ручной дуговой сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Электроды могут найти применение при изготовлении и монтаже строительных конструкций, в частности при ремонте, расширении и реконструкции промышленных зданий и сооружений.

Электроды для сварки в наклонном положении марок ОЗС-12, ОЗС-15н, ОЗС-17н относятся к типу Э46 по ГОСТ 9467—75*. К этому же типу можно отнести электроды НЭ-2, изготовляемые малыми партиями Днепропетровским экспериментально-исследовательским заводом сварочных материалов. Электроды на основе рутила и железного порошка предназначены для сварки низкоуглеродистых сталей. Электроды ИТС-1 с фтористо-кальциевым покрытием используются также и для сварки низколегированных сталей.

Длина электродов увеличена по сравнению с принятой в стандарте и составляет 600 и 700 мм, диаметр 5 и 6 мм, толщина покрытия 2 мм на сторону.

Электроды обеспечивают хорошее формирование швов, мелкочешуйчатую поверхность шва, стабильное горение дуги и легкую отделимость шлаковой корки. Для сварки этими электродами применяются несложные установки. Один сварщик-оператор обслуживает одновременно 4—6 установок, что обеспечивает существенное повышение производительности труда.

Электроды АНМ-1 (тип Э46 по ГОСТ 9467—75*) предназначены для ремонтной сварки металлоконструкций из низколегированных сталей с поверхностным насыщением серой (элементной и в виде различных соединений с концентрацией до 0,6 %), которое происходит в процессе эксплуатации сернокислотного, сланцехимического, энергетического и других видов оборудования.

Электроды АНМ-1 позволяют сваривать металл, насыщенный серой, при наличии окалины, ржавчины и других загрязнений. Они отличаются повышенной стойкостью против образования горячих трещин, свищей и пор в сварном шве; пригодны для сварки во всех пространственных положениях на переменном и постоянном токе любой полярности.

Электроды обеспечивают легкое возбуждение и стабильное горение дуги, низкие потери электродного металла от разбрызгивания, хорошее формирование швов и легкую отделимость шлаковой корки, мало чувствительны к образованию подрезов. Коэффициент наплавки 8,5—9,5 г/(А · ч); коэффициент потерь 6—8 %. Металл шва отличается высокой пластичностью и ударной вязкостью (60—90 Дж/см² при температуре —40 °С на образцах с круглым надрезом). Химический состав наплавленного металла типичен для электродов типа Э46, но отличается меньшим содержанием вредных примесей: углерода — 0,08 %, серы и фосфора — не более 0,025 %. Применение электродов АНМ-1 позволяет существенно повысить эффективность ремонтных работ за счет исключения трудоемких операций воздушно-дуговой строжки и последующей зачистки кромок шлифмашинками.

Электроды марки АНО-ТМ основного типа предназначены для сварки и ремонта трубопроводов. Электроды относятся к типу Э50А по ГОСТ 9467—75*. В отличие от известных электродов этого типа, например УОНИ 13/55, «Шварц-3К», «Гарант», электроды АНО-ТМ обеспечивают надежный провар корня шва и формирование выпуклого шва внутри трубы (обратного валика) без подварки изнутри.

Электроды пригодны для сварки трубопроводов из низкоуглеродистых и низколегированных сталей в нижнем, вертикальном и потолочном положениях. Сварку корневых проходов выполняют на прямой полярности, а заполняющих швов — на обратной. Коэффициент наплавки 9,0—9,5 %. Электроды можно использовать при сварке по зазорам увеличенной ширины. По содержанию кислорода и азота в наплавленном металле электроды АНО-ТМ находятся на уровне известных марок с основным покрытием, а содержание водорода в металле шва заметно ниже, что способствует повышению его стойкости против хрупкого разрушения.

Электроды АНО-25 с основным покрытием предназначены для сварки хладостойких низколегированных сталей 17Г2СФ, 14Г2САФ, 15Г2АФД и др., могут быть использованы и для сварки сталей 09Г2, 09Г2С, 10ХСНД. (Электроды АНО-25 соответствуют типу Э50 по ГОСТ 9467—75*.) Минимальные значения ударной вязкости на образцах с острым надрезом (тип IX по ГОСТ 6996—66*) при температуре —70 °С составляют 34 Дж/см², максимальные — 76 Дж/см² (в зависимости от марки свариваемой стали). Коэффициент наплавки 9,5—10,5 г/(А · ч).

Электроды АНО-25 отличаются более мелкокапельным переносом расплавленного металла, чем, например, электроды ДСК-50 и СМ-11, предназначенные для монтажной сварки. Электроды АНО-25 пригодны для сварки на переменном и постоянном токе (обратная полярность) в любых пространственных положениях.

Электроды АНО-26 и АНО-27 с основным покрытием и улучшенными сварочно-технологическими свойствами предназначены для сварки ответственных конструкций из углеродистых и низколегированных сталей во всех пространственных положениях на переменном и постоянном токе (об-

Таблица 5.19. Сварочный ток, А, при сварке электродами АНП-6П

Род тока	Диаметр электрода, мм		
	4	5	6
Постоянный	190—210	270—290	350—370
Переменный	220—240	300—320	380—400

ратная полярность). По механическим свойствам металла шва электроды относятся к типу Э50А по ГОСТ 9467—75*.

По содержанию кислорода и азота в наплавленном металле новые электроды сравнимы с серийно выпускаемыми электродами с покрытием аналогичного типа (УОНИ 13/55). Электроды обеспечивают низкое содержание водорода в металле шва: $H_{сум} = 4{,}1...6{,}0$ см³/100 г для электродов АНО-26 и 5,3—7,3 см³/100 г — для электродов АНО-27 по сравнению с 8,2—9,2 см³/100 г для электродов УОНИ 13/55.

Высокопроизводительные электроды марки АНП-6П предназначены для сварки тяжелонагруженных конструкций из сталей марок 13ХГМРБ, 12ГН2МФАЮ, 14Х2ГМРЛ и других с пределом текучести $\sigma_{0,2} \geqslant 600$ МПа, эксплуатируемых в районах Сибири и Крайнего Севера.

Электроды АНП-6П соответствуют типу Э70 по ГОСТ 9467—75*. В отличие от известных электродов этого типа АНП-2 и 48Н-11 электроды АНП-6П позволяют выполнять сварку как на постоянном, так и на переменном токе, характеризуются легким возбуждением дуги и стабильным горением дуги при сварке переменным током от трансформаторов с напряжением холостого хода 65 В. Они обеспечивают лег-

Таблица 5.21. Технические характеристики вольфрамовых неплавящихся сварочных электродов

Марка	Материал	Цвет маркировки прутков
ЭВЧ	Вольфрам чистый	Не маркируется
ЭВЛ	Вольфрам с присадкой оксида лантана (1,1—1,4 %)	Черный
ЭВИ-1	Вольфрам с присадкой оксида иттрия (1,5—2,3 %)	Синий
ЭВИ-2	Вольфрам с присадкой оксида иттрия (2,0—3,0 %)	Фиолетовый
ЭВИ-3	Вольфрам с присадкой оксида иттрия (2,5—3,5 %)	Зеленый
ЭВТ-15	Вольфрам с присадкой оксида тория (1,5—2,0 %)	Красный

Примечание. Содержание вольфрама в электродах 99,89—99,95 %.

Таблица 5.20. Технические характеристики электродов для холодной сварки чугуна

Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Положение свариваемых швов	$\sigma_в$, МПа	δ_4, %	Твердость, *HB*	Свариваемые чугуны, назначение сварки
ОЗЧ-2	4,0	100—140	Нижнее, горизонтальное, вертикальное	100—120	—	150—200	Серый и ковкий чугун без подогрева, заварка дефектов литья
ОЗЖН-1	3,0 4,0 5,0	90—120 120—150 150—180	То же	490—510	26—30	180—210	Серый и высокопрочный чугун без подогрева, заварка дефектов, при больших объемах наплавки первый и последний слои выполняют электродами ОЗЧ-3 или МНЧ-2
МНЧ-2	4,0 5,0 6,0	100—140 140—190 190—230	Все, кроме вертикального сверху вниз	240—260	—	120—160	Серый, ковкий и высокопрочный чугун без подогрева, особенно для заварки первого слоя
ОЗЧ-3	3,0 4,0 5,0	70—110 100—130 120—160	Нижнее, вертикальное, горизонтальное	430—480	20—26	150—180	Детали из серого и ковкого чугуна без подогрева, заварка дефектов, особенно для сварки при повышенных требованиях к чистоте поверхности
ОЗЧ-4	3,0 4,0 5,0	70—110 100—130 120—160	То же	250—320	15—19	160—190	Серый и высокопрочный чугун без подогрева, особенно для наплавки поверхностного слоя при работе на истирание
ЦЧ-4	3,0 4,0 5,0	65—80 90—120 130—150	Нижнее	480—510	8	160—190	Высокопрочный чугун с шаровидным графитом, серый с пластинчатым графитом и их сочетания со сталью
ЦЧ-4А	3,0 4,0 5,0	60—80 90—120 150—200	»	—	—	—	То же
ОЗЧ-6	3,0 4,0 5,0	75—90 100—120 120—150	»	310	12	200	Серый и высокопрочный чугун, предпочтительны для ремонта сквозных дефектов, особенно в тонкостенных деталях

Таблица 5.22. Ток, А, при ручной электродуговой резке стали

Диаметр электрода, мм	Тип электрода	
	АНР-2М	ОЗР-1
3,0	—	110—170
4,0	250—300	180—260
5,0	320—360	250—350
6,0	350—420	360—600

кую отделимость шлаковой корки, хорошее формирование металла шва. Электроды АНП-6П пригодны для работы на повышенных токах (табл. 5.19).

По производительности электроды АНП-6П превосходят электроды АНП-2 и 48Н-11 в 1,6—1,8 раза. Сварные соединения, выполненные высокопроизводительными электродами, отличаются повышенной сопротивляемостью образованию холодных трещин. При сварке металлов большой толщины (30—60 мм) подогрев до 60 °С исключает возможность образования трещин.

Механические свойства металла швов, выполненных на указанных выше сталях, соответствуют свойствам основного металла. Ударная вязкость металла швов при температуре —70 °С на образцах с острым надрезом — 17—24 Дж/см².

Электроды для холодной сварки чугуна изготовляются преимущественно из никеля и меди или их сплава (табл. 5.20). Так, электроды ОЗЧ-3 содержат не менее 99 % никеля, ОЗЧ-4—95 % никеля, ОЗЖН-1—48 % меди. Основу электродов ОЗЧ-2 составляет медь. Электроды МНЧ-2 на 66 % состоят из никеля, остальное — медь. На электроды наносится покрытие специального состава, например из 40 % графита, 60 % мела или мрамора и др.

Сварку этими электродами ведут на постоянном токе прямой полярности, за исключением электродов ЦЧ-4 и ЦЧА, пригодных также и для сварки на переменном токе. Сварка производится короткими валиками длиной 30—60 мм с охлаждением на воздухе до 60 °С.

Вольфрамовые неплавящиеся сварочные электроды по ГОСТ 23949—80 из вольфрама с активирующими присадками (табл. 5.21) применяют для дуговой сварки неплавящимся электродом в инертных газах (аргон, гелий), а также для плазменных процессов резки, наплавки и напыления. Они выпускаются в виде прутков диаметром до 10 мм, но чаще всего применяются электроды диаметром 1—4 мм.

Электроды марок АНР-2М и ОЗР-1 для ручной электродуговой резки и строжки металлов, а также для вырезки дефектных швов, разделительной резки низкоуглеродистых, высокоуглеродистых и высоколегированных сталей, чугуна и цветных металлов.

Одним из основных преимуществ резки этими электродами, в отличие от воздушно-дуговой резки угольным электродом, является отсутствие науглероживания поверхности реза. При этом отпадает необходимость трудоемкой операции ее зачистки шлифовальными камнями.

Резка электродами АНР-2М и ОЗР-1 проводится во всех пространственных положениях на переменном и постоянном токе на открытых площадках и в цехах (табл. 5.22).

Производительность резки стали электродами АНР-2М 6—14 кг/ч в зависимости от диаметра электрода и значения тока, расход электродов 0,35—0,55 кг на 1 кг выплавленного металла. Для электродов ОЗР-1 эти показатели не регламентируются.

5.1.3. Проволоки, электроды и прутки для сварки цветных металлов

Проволока для сварки алюминия и его сплавов поставляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7871—75* диаметром 0,8—12 мм. Предусмотрен выпуск 14 марок проволоки. Массовое содержание основных элементов в некоторых марках проволоки и марки свариваемого металла приведены в табл. 5.23. Кроме этих элементов в проволоке есть примеси железа, кремния, меди, титана, цинка, содержание которых составляет доли процента.

Сварку конструкций из алюминия и его сплавов наиболее целесообразно выполнять в защитных газах — аргоне, гелии или их смеси неплавящимся (вольфрамовым) и плавящимся электродами. Возможно применение ручной, механизированной и автоматической сварки. Значительное распространение получила ручная сварка в аргоне вольфрамовым электродом на переменном токе. Используется также способ автоматической сварки металла толщиной 6—25 мм полуоткрытой дугой по флюсу.

Для ручной дуговой сварки алюминия (табл. 5.24) применяют электроды с металлическим стержнем марок: ОЗА-1 — для сварки конструкций из алюминия А0, А1, А2, А3; ОЗА-2 — для сварки и наплавки деталей из алюминиево-кремнистых литейных сплавов АЛ-4, АЛ-9, АЛ-11 и др.

Проволока и прутки сварочные из меди и сплавов на медной основе изготовляются в соответствии с ГОСТ 16130—85. Диаметр проволоки 0,8—8,0 мм, прутков — 6,0 и 8,0 мм. Сварку меди выполняют неплавящимся (вольфрамовым) электродом и плавящимся электродом в защитном газе. В качестве последнего применяют аргон высшего сорта, гелий особой чистоты и азот высшей чистоты. В качестве присадочного металла применяют медную проволоку М1 или проволоку из медно-никелевого сплава БрКМц-1.

Автоматическую сварку меди под флюсом можно выполнять неплавящимся угольным или графитовым электродом и плавящимся электродом, используя проволоки сплошного сечения или порошковые. Применяют проволоки из меди М0 или М1. Для улучшения механических свойств сварного соединения применяют проволоку из сплава БрКМц3-1.

Ручная дуговая сварка меди может выполняться покрытыми электродами со стержнем, подобным основному металлу. Диаметр электродов 3—6 мм. Для сварки меди, медных сплавов и меди со сталью применяют электроды марок АНЦ/ОЗМ-2. Для сварки чистой меди марок М1, М2, М3 и меди со сталью используют электроды «Комсомолец-100» со стержнем из сплава БрКМц3-1. Некоторые технические характеристики этих электродов приведены в табл. 5.24.

Проволоку для сварки титана и его сплавов выбираю: в зависимости от степени легирования свариваемого сплават

Таблица 5.23. Химический состав сварочных проволок для сварки алюминия и его сплавов

Марка проволоки	Содержание основных элементов, %	Свариваемый металл
Св-А97	99,97 Al	Технический алюминий марок АД00, АД0
Св-АМц	93,95—95,15 Al, 1,0—1,5 Mn, 0,3—0,5 Fe, 0,2—0,4 Si	Сплав алюминиево-марганцевый АМц
Св-АМг3	93,95—95,15 Al, 3,2—3,8 Mg, 0,3—0,6 Mn, 0,5—0,8 Si	Сплав алюминиево-магниевый АМг2, АМг3
Св-АМг5	91,8—93,2 Al, 4,8—5,8 Mg, 0,5—0,8 Mn	Сплав алюминиево-магниевый АМг4, АМг5
Св-АМг6	91,0—92,4 Al, 5,8—6,8 Mg, 0,5—0,8 Mn	Сплав алюминиево-магниевый АМг2, АМг3, АМг4, АМг5
Св-АМг61	91,0—93,35 Al, 5,5—6,5 Mg, 0,1—1,1 Mn	Сплав алюминиево-магниевый АМг6, АМг61
1557	92,8—94,4 Al, 4,5—5,5 Mg, 0,2—0,6 Mn	Сплав алюминиево-магниевый АМг4, АМг5, АМг6

Таблица 5.24. Технические характеристики электродов для ручной дуговой сварки алюминия и меди

Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Положение свариваемых швов	Выход наплавленного металла, %	Режим прокалки: температура, °С	Режим прокалки: время, мин	Назначение, особенности сварки
ОЗА-1	4 5 6	100—120 120—150 160—180	Нижнее, горизонтальное, вертикальное	83	170	60	Сварка конструкций из алюминия марок А0, А1, А2, А3, предварительный подогрев металла до 250—400 °С (в зависимости от его толщины)
ОЗА-2	4 5 6	100—120 120—150 160—180	То же	83	180	60	Заварка дефектов литья и наплавка деталей из алюминиево-кремнистых сплавов АЛ-4, АЛ-9, АЛ-11, предварительный подогрев металла до 250—400 °С (в зависимости от толщины металла)
АНЦ/ОЗМ-2	4 5 6	230—300 350—400 440—500	Нижнее	63	370	120	Сварка меди, медных сплавов и меди со сталью, предварительный подогрев металла толщиной более 10 мм, до 150—350 °С
«Комсомолец-100»	3 4 5	70—110 100—140 170—190	Нижнее, горизонтальное, вертикальное	90	180	60	Сварка чистой меди марок М-1, М-2, М-3 и меди со сталью, предварительный подогрев до 300—500 °С

технический титан сваривают проволокой сплошного сечения ВТ1-00, низколегированные сплавы — проволоками ВТ1-00, ВТ2св, ВТ20-1св; высоколегированные сплавы — проволоками ВТ6св, СПТ-2. Наиболее широко используется сварочная проволока из технически чистого титана ВТ1-00. Она применяется при сварке титана той же марки, а также однофазных (α) и двухфазных ($\alpha + \beta$) низколегированных сплавов с пределом прочности 800—900 МПа.

Для автоматической сварки под флюсом и для аргонодуговой сварки следует использовать проволоку, предварительно прошедшую вакуумный отжиг. При сварке такой проволокой обеспечивается небольшое содержание водорода в металле шва и, следовательно, высокая стойкость против образования холодных трещин.

5.2. ПРОВОЛОКИ, ЛЕНТЫ И ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ И РУЧНОЙ НАПЛАВКИ

5.2.1. Проволоки и ленты

Проволока стальная наплавочная по ГОСТ 10543—82* предназначена для механизированной и автоматической дуговой наплавки поверхностных слоев с целью восстановления размеров и повышения износостойкости различных стальных деталей, работающих в условиях трения металла о металл, интенсивного изнашивания, знакопеременных и ударных нагрузок, значительных локальных давлений.

Стандартом предусмотрено изготовление 30 марок проволоки сплошного сечения из углеродистой, легированной и высоколегированной стали. Химический состав проволоки, твердость наплавленного металла и примерное назначение некоторых марок, используемых в строительном производстве, приведены в табл. 5.25. Номинальные диаметры наплавочных проволок 0,3—8 мм. Кроме того для наплавки могут применяться проволоки из числа предусмотренных ГОСТ 2246—70* на проволоку стальную сварочную Св-08Г2С, Св-12ГС, Св-18ХГС и др. (табл. 5.26).

Для защиты зоны сварки применяют углекислый газ или его смеси: $CO_2 + Ar$ или $CO_2 + Ar + O_2$.

Порошковые проволоки и порошковые ленты, как и проволоки наплавочные сплошного сечения, предназначены для механизированной дуговой наплавки поверхностных слоев различных стальных деталей.

Конструкция порошковых проволок для наплавки такая же, как и сварочных (трубчатая, двухслойная). Конструкция порошковых лент обеспечивает автоматическую наплавку поверхностей больших размеров и получение небольшого провара основного металла. Ширина ленты 14—45 мм, толщина 3—4 мм. Чаще других применяются ленты 20 × × 4 мм и 45 × 3 мм.

Проволоки и ленты могут использоваться для наплавки под флюсом или открытой дугой (самозащитные). Марки некоторых проволок и лент приведены в табл. 5.27. Наплавка ведется на постоянном токе обратной полярности, проволока ПП-АН170 допускает также наплавку на переменном токе. Проволока ПП-ИТС-02 предназначена для наплавки открытой дугой или под намагничивающим флюсом НФ-ИТС-02.

Указанные в табл. 5.27 значения твердости характеризуют наплавленный металл после наплавки. Термическая обработка (отжиг, закалка с отпуском) позволяет изменять эти значения.

5.2.2. Электроды

Электроды покрытые для дуговой наплавки поверхностных слоев изготовляются в соответствии с ГОСТ 10051—75*. Обозначение электродов отличается от схемы, принятой на рис. 5.3, тем, что позиция *6* состоит из двух индексов: первый — слева от косой черты показывает среднюю твердость наплавленного металла по Виккерсу (*HV*); второй — справа от косой черты — твердость по Роквеллу (*HRC*). Наличие цифр после второго индекса означает, что твердость обеспечивается: 1— без термической обработки после наплавки; 2 — после термической обработки (табл. 5.28).

Характеристики некоторых марок электродов для наплавки и их назначение приведены в табл. 5.29.

5.3. ГОРЮЧИЕ И ЗАЩИТНЫЕ ГАЗЫ ДЛЯ СВАРКИ, НАПЛАВКИ И РЕЗКИ

5.3.1. Горючие газы и кислород

Горючие газы используются, как правило, в смеси с кислородом. Наиболее распространен ацетилен, применяются также водород, коксовый, нефтяной, пиролизный, природный, городской газы, пары бензина и керосина, сжиженные пропан-бутановые смеси (табл. 5.30).

Таблица 5.25. Технические характеристики стальной наплавочной проволоки

Марка проволоки	Содержание элементов, %						
	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
						не более	
Нп-25	0,22—0,3	0,5—0,8	0,17—0,37	Не более 0,25	Не более 0,3	0,04	0,04
Нп-50	0,45—0,55	0,5—0,8	0,17—0,37	То же	То же	0,04	0,04
Нп-65	0,6—0,7	0,5—0,8	0,17—0,37	» »	» »	0,04	0,04
Нп-50Г	0,45—0,56	0,7—1	0,17—0,37	Не более 0,3	» »	0,04	0,04
Нп-65Г	0,6—0,7	0,9—1,2	0,17—0,37	То же	» »	0,04	0,04
Нп-30ХГСА	0,27—0,35	0,8—1,1	0,9—1,2	0,8—1,1	Не более 0,4	0,03	0,04
Нп-30Х5	0,27—0,35	0,4—0,7	0,2—0,5	4—6	То же	0,04	0,04
Нп-40Х3Г2МФ	0,35—0,45	1,3—1,8	0,4—0,7	3,3—3,8	» »	0,04	0,04
Нп-40Х2Г2М	0,35—0,43	1,8—2,3	0,4—0,7	1,8—2,3	» »	0,04	0,04
Нп-40Х13	0,35—0,45	0,8	0,8	12—14	Не более 0,6	0,03	0,035
Нп-45Х2В8Т	0,4—0,5	1—1,4	0,4—0,7	2,2—3	То же	0,04	0,04
Нп-Г13А	1—1,2	12,5—14,5	Не более 0,4	Не более 0,6	» »	0,05	0,035

Ацетилен может использоваться при всех видах газопламенной обработки. Ацетилен — бесцветный газ со специфическим запахом, который придают ему примеси — фосфористый водород, сероводород и др. В смеси с кислородом ацетилен дает наиболее высокую, по сравнению с другими горючими газами, температуру пламени. Ацетилен легче воздуха: плотность его составляет 0,9 плотности воздуха. При 0,101 МПа (760 мм рт. ст.) и температуре от —82,4 до —83,6 °С ацетилен переходит в жидкое состояние, при понижении температуры до —85 °С затвердевает.

Технический ацетилен выпускают в основном растворенным в ацетоне (ГОСТ 5457—75*), равномерно распределенным в пористой массе, которая заполняет баллон. При давлении 0,101 МПа и температуре 20 °С в 1 кг ацетона растворяется 27,9 кг ацетилена (или в 1 л ацетона растворяется 20 л ацетилена). Растворимость ацетилена в ацетоне возрастает примерно пропорционально давлению. С повышением температуры растворимость падает.

В жидком и твердом состоянии ацетилен взрывоопасен. Он взрывается от трения или удара. При температуре 500—600 °С ацетилен самовоспламеняется при давлении до 0,2 МПа. Эта температура заметно снижается с повышением давления (350 °С при 2,2 МПа). Присутствие катализаторов, например оксида меди, снижает температуру воспламенения до 246 °С. С медью и серебром ацетилен вступает в реакцию, образуя взрывоопасные соединения. Поэтому при изготовлении ацетиленовой аппаратуры запрещается применять сплавы, содержащие более 70 % меди.

Взрывоопасны также смеси ацетилена с кислородом и воздухом. Нижний концентрационный предел взрываемости: с воздухом — 2,2 % по объему, с кислородом — 2,3 % по объему (см. табл. 5.30). Наиболее взрывоопасны смеси, содержащие 7—13 % по объему ацетилена.

В условиях строительного производства ацетилен получают преимущественно из карбида кальция в ацетиленовых генераторах (стационарных или переносных), в результате разложения (гидролиза) карбида кальция водой. Максимальный выход ацетилена из 1 кг карбида при 20 °С и 0,101 МПа (760 мм рт. ст.) составляет 285 л и зависит от грануляции карбида (табл. 5.31).

Особое внимание следует обращать на наличие карбидной пыли, которая разлагается в генераторе почти мгновенно. Разложение пыли сопровождается быстрым нагревом, в результате чего может возникнуть взрыв ацетилена. Поэтому использование карбидной пыли в обычных генераторах не допускается.

Карбид кальция транспортируют и хранят в герметически закупоренных барабанах из тонколистовой стали. Масса карбида в барабане — до 120 кг.

На рабочие места ацетилен поступает из переносных генераторов по шлангам, от стационарных ацетиленовых станций — по трубопроводам.

Водород для газопламенной обработки в чистом виде применяется редко, в основном при сварке и пайке свинца, других легкоплавких металлов, а также для резки; чаще — в качестве компонента газовых смесей. Водород — газ без цвета и запаха. Водородо-кислородное пламя бесцветно. На 1 м³ водорода в горелку подается 0,25—0,35 м³ кислорода. Водород обладает высокой проникающей способностью. В смесях с кислородом и воздухом водород образует взрывоопасные смеси, поэтому при их использовании нужно обращать особое внимание на герметичность аппаратуры и коммуникаций. Водород поставляется в баллонах или (например, для пайки свинца) его получают на рабочих местах в генераторах с помощью реакции железа или цинка с серной кислотой.

Коксовый газ применяется для газопламенной обработки только в хорошо очищенном виде. Он представляет собой

Прочие элементы	Твердость наплавленного металла	Объекты наплавки
—	*HB* 160—220	Оси, шпиндели, валы
—	*HB* 180—240	Натяжные колеса, скаты тележек, опорные ролики
—	*HB* 220—300	Опорные ролики, оси
—	*HB* 200—270	Натяжные колеса, опорные ролики
—	*HB* 230—310	Крановые колеса, оси, опорные ролики
—	*HB* 220—300	Обжимные прокатные валки, крановые колеса
—	*HRC* 37—42	Прокатные валки сортопрокатных станов
0,1—0,2 V 0,3—0,5 Mo	*HRC* 38—44	Детали, испытывающие удары и абразивное изнашивание
0,8—1,2 Mo	*HRC* 54—56 после закалки	Детали машин, работающих с динамическими нагрузками, коленчатые валы, оси опорных катков
—	*HRC* 45—52	Опорные ролики тракторов и экскаваторов, детали транспортеров
8—9,5 W 0,3—0,5 V	*HRC* 40—46	Ножи резки горячего металла, прессовый инструмент
—	*HRC* 220—280	Железнодорожные крестовины, щеки дробилок, зубья ковшей

смесь газообразных продуктов сухой перегонки каменного угля. Содержит до 40—60 % водорода, 20—30 % метана, 5—12 % оксида углерода (CO) и др. Коксовый газ, хотя и имеет сравнительно низкую теплотворную способность, широко используется на металлургических предприятиях как побочный продукт. На предприятиях стройиндустрии и строительных площадках используется преимущественно для резки. Для полного сгорания 1 м³ коксового газа требуется до 0,8—0,9 м³ кислорода. К месту потребления газ транспортируют в баллонах либо по газопроводам от близко расположенных металлургических предприятий.

Нефтяной газ для газопламенной обработки применяется редко. Он представляет собой смесь горючих газов. Естественные нефтяные газы (сопутствующие) содержат метан, этан, пропан, бутан и др. Искусственные нефтяные газы (заводские) содержат углеводороды, этилен, пропилен и другие газы, а также до 60 % водорода.

Природный и городской газы используются преимущественно для резки, иногда — для сварки тонколистового металла. В составе газов преобладает метан (75—99 %), в небольших количествах содержатся инертные газы и азот. Природные газы бесцветны и не имеют запаха. Для обнаружения утечек к ним добавляют одорант, имеющий резкий запах. Температура метано-кислородного пламени на 1000—1200 °С ниже ацетилено-кислородного. Поэтому при резке природным газом на подогрев затрачивается в 1,5—2 раза больше времени, чем на подогрев ацетилено-кислородным пламенем. Природный газ может поступать к потребителю в баллонах либо по газопроводам низкого (до 0,005 МПа), среднего (0,005—0,3 МПа) и высокого (0,3—1,2 МПа) давления.

Сжиженные (жидкие) газы представляют собой углеводы или их смеси, которые при температуре 20 °С и давлении 0,101 МПа (760 мм рт. ст.) находятся в газообразном состоянии, а при небольшом повышении давления или снижении температуры переходят в жидкое состояние. Для газопламенной обработки используют смесь, состоящую в основном из пропана и бутана.

Сжиженные газы имеют низкие концентрационные пределы взрываемости в смеси с воздухом. Они тяжелее воздуха даже в газообразном состоянии и при утечке могут застаиваться в нижней части помещений у земли или пола. Поэтому их нельзя применять для выполнения работ в замкнутых сосудах, шахтах и других подобных местах.

Жидкие пропан и бутан имеют значительный коэффициент объемного расширения. Это следует учитывать при наполнении баллонов, которые после заполнения должны иметь свободный объем для компенсации при расширении жидкости в случае повышения температуры. При испарении 1 кг жидкой смеси получается около 0,5 м³ газа. Пропан-бутановая смесь применяется преимущественно при резке металла, реже для сварки и пайки цветных металлов.

Бензин и керосин — продукты переработки нефти. Используются в виде паров, в основном для резки металла, обеспечивая хорошую чистоту реза. Бензин и керосин подаются в резак из специальных бачков, в которых создается давление до 0,2—0,3 МПа. Для образования паров резаки снабжаются испарителями.

Бензин применяют любого сорта, кроме этилированного, обладающего повышенной токсичностью. Для керосино-кислородной резки применяют осветительный керосин, который перед заливкой в бачок следует профильтровать для очистки от примесей.

Кислород (ГОСТ 5583—78*) используют в качестве окислителя при сварке и резке металлов, а также компонента смесей, применяемых при дуговой сварке с газовой защитой. Газообразный кислород — газ без цвета и запаха. При температуре —182,97 °С и давлении 0,101 МПа кислород переходит в жидкое состояние. Масса 1 л жидкого кислорода 1,14 кг. Отечественная промышленность выпускает несколько сортов кислорода. Объемная доля основного вещества в них составляет: в первом — 99,7 %; во втором — 99,5 %; в третьем — 99,2 %; в медицинском — 99,5 %. Чистота кислорода заметно влияет на производительность и качество кислородной резки.

Соприкосновение сжатого кислорода с маслами, жирами и мелкодисперсными горючими веществами (угольной пылью, ворсинами тканей и т. п.) приводит к их мгновенному окислению с выделением тепла и воспламенению металлических частей.

Таблица 5.26. **Твердость наплавленного металла при механизированной наплавке**

Марка проволоки	Твердость наплавленного металла	Объекты наплавки
Св-08	*HB* 120—160	Оси, валы, поддерживающие ролики трактора, тормозные барабаны, ступицы колес
Св-10Г2	После наплавки *HV* 180—210, после закалки *HV* 395—410	Оси, шпиндели, валы
в-12ГС	*HV* 190—220	Оси, шпиндели, валы, опорные ролики
Св-08Г2С	После наплавки *HV* 180—210, после закалки *HV* 395—410	То же
Св-18ХГС	После наплавки *HV* 240—300, после закалки *HV* 550—560	Опорные ролики, натяжные колеса гусеничных тракторов, цапфы, оси катков

Таблица 5.27. Технические характеристики порошковой проволоки и порошковой ленты для наплавки

Марка проволоки	Марка наплавленного металла	Диаметр или сечение, мм	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Режим наплавки		
				ток, А	напряжение, В	скорость наплавки, м/ч
				Порошковая проволока		
ПП-АН120	18Х1Г1М	3,6	12	380—420	28—30	12—18
ПП-АН122	30Х5Г2СМ	2,6	14	320—360	25—27	19—22
ПП-АН103	200Х12М	3,6	12	380—400	28—32	25—35
ПП-АН135	250Х10Б8С2	3,2	22—24	380—420	30—34	8—12
ПП-АН125	200Х15С1ГРТ	3,2	16	400—420	28—32	18—25
ПП-АН170	80Х20Р3Т	3,2	22—24	400—420	30—32	8—12
ПП-ИТС-02	350Х32Р1	3,2	—	300—360	28—32	10—20
ПП-У10Х4Г2-0	100Х4Г2Р	3,2	23	250—320	22—24	30—40
				Порошковая лента		
ПЛ-АН126	20Х2Г2СТ	20×4	16—20	Под флюсом		
				600—1000	28—36	15—40
				Открытой дугой		
				600—1000	28—32	15—60
ПЛ-У25Х25Г3Ф2РН	250Х25Г3Ф1Н1РС	45×3	24—28 и 33—36	950—1050	34—37	16—20
				1800—2000	40—42	38—42
ПЛ-У30Х30Г3ТЮ	300Х30Г3ТЮ	45×3	25—27	900—950	33—35	15—18
			33—36	1800—2000	40—42	38—42
ПЛ-АН171	100Х20Р4С3Г2	20×4	18—22	Под флюсом		
				700—1000	28—36	15—30
				Открытой дугой		
				700—1000	28—34	20—50
ПЛ-АН101	300Х25М3Н3Г2	20×4	18—22	Под флюсом		
				700—750	32—34	17—23
				Открытой дугой		
				700—750	28—30	40—45
ПЛ-У40Х38Г3РТЮ	400Х38Г3РТСЮ	45×3	24—28	900—950	33—35	15—18

На строительные площадки кислород поступает преимущественно в стальных баллонах емкостью 40 л, под давлением до 15 МПа. На крупных предприятиях, имеющих кислородные станции, кислород поступает к местам потребления по трубопроводам под давлением до 1,5 МПа. Некоторые предприятия транспортируют кислород в жидком виде, а затем газифицируют его в специальных газификаторах.

5.3.2. Защитные газы

Газы — углекислый, азот, аргон, гелий и их смеси — используют при дуговой сварке для защиты дуги и металла сварочной ванны от азота и кислорода воздуха (табл. 5.32). Защитные газы делятся на активные и инертные. В качестве активного газа чаще всего используют углекислый газ, в каче-

Сварка под флюсом или открытой дугой	Твердость после наплавки	Применение
АН-348А АН-60	*HB* 350—400	Крановые колеса, ролики рольгангов, катков, натяжные колеса гусеничных машин и т. п.
О	*HRC* 50—56	Катки и ролики ходовой части гусеничных машин и т. п.
АН-20 АН-15М	*HRC* 40—44	Ролики рольгангов, ножи холодной резки металлов и т. п.
О	*HRC* 50—58	Зубья и ковши скальных экскаваторов, рыхлители и коронки тяжелых бульдозеров для работы на мерзлоте
О	*HRC* 50—58	Зубья, козырьки и стенки ковшей экскаваторов, ножей грейдеров и бульдозеров, грунтозацепов, звеньев и звездочек ходовой части гусеничных машин
О	*HRC* 58—67	Ковши экскаваторов, козырьки драг, рабочие колеса и улитки землесосов на песчаном грунте, шламовые насосы
О и под флюсом НФ-ИТС-02	*HRC* 57	Грунтовые, шламовые и шнековые насосы, брикетировочные кирпичные прессы и т. п.
О	*HRC* 56—62	Катки гусеничных тракторов и др.
О или под флюсом АН-348-А	*HRC* 38—45	Ходовая часть гусеничных машин, роликов рольгангов, крановых колес и т. п.
АН-20 АН-15М	*HRC* 45—50	Ножи бульдозеров и скреперов, зубья ковшей экскаваторов и др.
АН-60	*HRC* 45—50	Ножи бульдозеров и скреперов, кирковщики грейдеров, зубья ковшей экскаваторов и др.
О или под флюсом АН-15М	*HRC* 65—68	Корпусы и рабочие колеса землесосов, рабочих органов для переработки грунта
О или под флюсом АН-15М	*HRC* 50—56	Засыпные аппараты доменных печей, валки коксовых дробилок, ножи бульдозеров и др.
АН-60	*HRC* 50—54	Лопатки дорожной фрезы, козырьки ковшей, зубья роторных экскаваторов

стве инертных — аргон, реже — гелий. Азот по отношению к меди является инертным газом.

В углекислом газе плавящимся электродом сваривают низкоуглеродистые, низко- и среднелегированные стали. В аргоне плавящимся и неплавящимся электродами сваривают преимущественно высоколегированные стали, цветные металлы и их сплавы. В качестве защитной среды могут использоваться также газовые смеси.

Углекислый газ (диоксид углерода) — бесцветный газ со слабым запахом, с резко выраженными окислительными свойствами. Он является побочным продуктом ряда производств. Его получают из отходящих газов при брожении спирта, расщеплении жиров, производстве синтетического аммиака, а также из дымовых газов промышленных котельных.

В качестве активной защитной среды при сварке углекислый газ применяют в сочетании с определенными сварочными проволоками. Наиболее часто применяют проволоку Св-08Г2С.

Углекислый газ тяжелее воздуха и формирует эффективную защитную оболочку вокруг зоны сварки. При температуре 0 °С и давлении 0,101 МПа (760 мм рт. ст.) плотность диоксида углерода составляет 1,977 кг/м³. Углекислота в жидком состоянии производится трех марок (см. табл. 5.32), различающихся по содержанию CO_2 и количеству примесей — воздуха, влаги, оксида углерода, минеральных масел. Для сварки следует применять углекислоту сварочную и пищевую. Использовать техническую углекислоту не рекомендуется.

При охлаждении под давлением углекислый газ переходит в жидкое состояние, при охлаждении без давления превращается в твердое тело — сухой лед, который при повышении температуры снова переходит в газ. При давлении 528 кПа и температуре —56 °С углекислый газ может находиться во всех трех состояниях (тройная точка). При атмосферном давлении жидкая углекислота превращается в газ и снег, имеющий температуру —79 °С.

При испарении из 1 кг жидкой углекислоты при температуре 0 °С и давлении 0,101 МПа образуется 506,8 л газа. В стандартный баллон вместимостью 40 л заливают 25 кг жидкой углекислоты, что обеспечивает выход 12,67 м³ газа. Рабочее давление газа в баллоне 7—7,5 МПа. Для удаления содержащейся в углекислоте влаги, являющейся вредной примесью, газ пропускают через осушитель (силикагель, алюмогель, медный купорос) при температуре 250—300 °С в течение 2—2,5 ч.

Газообразная углекислота при недостаточной вентиляции помещения может скапливаться у пола, в приямках (при сварке внутри емкости), емкостях и пр., что может вызвать кислородную недостаточность. При содержании ее в воздухе в небольших количествах (до 0,5 %) не представляет опасности для здоровья.

Азот не имеет цвета и запаха. Получают его из атмосферного воздуха способом глубокого охлаждения. Выпускается несколько марок азота (см. табл. 5.32), из которых при сварке используют газообразный технический азот первого и второго сортов. В азоте ограничивают объемное содержание кислорода до 0,4 % для первого сорта и до 1 % для второго сорта, а также содержание водяных паров и масел.

Плотность газообразного азота 1,25 кг/м³ при 0 °С и давлении 0,101 МПа. Азот в газообразном состоянии при обычной температуре не токсичен и не взрывоопасен.

Азот при сварке находит ограниченное применение. Его используют в качестве защитной среды преимущественно при сварке меди, для которой он является практически инертным газом. Азот иногда применяют для сварки аустенитных сталей в сочетании с проволоками, металл которых способен в большом количестве растворять азот. При сварке углеродистых сталей азот вызывает образование пор в металле шва.

Аргон может находиться в газообразном и жидком состояниях. Он не токсичен и не взрывоопасен. Аргон получают из воздуха методом глубокого охлаждения и из остаточных газов аммиачных производств. Его используют в качестве защитной среды при сварке и резке активных и редких металлов (титан, цирконий, ниобий) и сплавов на их основе, а также алюминия, алюминиевых и магниевых сплавов, нержавеющих хромоникелевых жаропрочных сплавов и легированных сталей различных марок. С большинством элементов аргон не образует химических соединений. Практически не растворим в металлах.

Выпускается двух сортов — высшего и первого, которые различаются по содержанию аргона и примесей — кислорода, азота, водяного пара, углеродсодержащих соединений.

Таблица 5.28. Индексы электродов для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами

Твердость		Индекс	Твердость		Индекс
HV	*HRC*		*HV*	*HRC*	
175—224	13—21	200/17	675—724	58	700/58
225—274	22—28	250/25	725—774	59—60	725/60
275—324	29—35	300/32	775—824	61	800/61
325—374	26—38	350/37	825—874	62—63	850/62
375—424	39—43	400/41	875—924	64	900/64
425—474	44—47	450/45	925—974	65	950/65
475—524	48	500/48	975—1024	66—67	1000/66
525—574	49—51	550/50	1025—1074	68	1050/68
575—624	52—54	600/53	1075—1124	69	1100/69
625—674	55—57	650/56	1125—1175	70—71	1150/70

Таблица 5.29. Технические характеристики электродов для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами

Тип электрода	Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Род тока, полярность	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Расход на 1 кг наплавленного металла, кг	Твердость наплавленного металла *HRC*	Применение и свойства
Э-12Г4	ОЗН-35ОУ	4 5	140—160 160—180	∽, = (+)	7—8	1,8	35—40	Наплавка железнодорожных крестовин, осей, валов и др., износостойкость умеренная
Э-90Х4М4ВФ	ОЗИ-3	3 4 5	80—100 120—160 160—240	= (+)	9,5	1,4	50—62	Наплавка штампов и быстроизнашивающихся деталей станочного оборудования, износостойкость высокая
Э-37Х9С2	ОЗШ-2	3 4 5	110—130 130—150 160—180	=(+)	9—10	1,7	52—58	Наплавка штампов горячей и холодной штамповки и др., износостойкость высокая
Э-65Х11Н3	ОМГ-Н	4 5	120—140 160—180	∽, =	9,2	1,45	25—33	Наплавка изношенных участков и заварка пороков литья на щеках дробилок, крестовин и других деталей из стали Г13, износостойкость и сопротивление ударам высокие
Э-50Х12Н4М2	ВСН-10 ТУ ВНИИСТ	5	160—170	= (+)	9,8	1,45	40—45	Наплавка деталей ходовой части бульдозеров, экскаваторов и др.
Э-95Х7Г5С	12АН/ЛИВТ	4 5	150—160 200—210	∽, = (+)	8,3	1,6	25—32	Ремонт и изготовление молотков дробилок, зубьев экскаваторов, деталей земснарядов и др., износостойкость удовлетворительная
Э-80Х4С	13КН/ЛИВТ	4 5	140—150 190—200	∽, = (+)	6,5	1,75	56—62	Наплавка зубьев экскаваторов, деталей земснарядов, ножей дорожных машин и др., наплавленный металл сопротивляется абразивному изнашиванию
Э-110Х14В13Ф2	ВСН-6	4 5	140—160 150—170	= (+)	9,5	2,2	50—55	Наплавка зубьев роторных экскаваторов, резцов машин для мерзлого грунта, износостойкость высокая в условиях абразивного изнашивания
Э-140Х10Н2Г2АР	ВСН-9 ТУ ВНИИСТ	5	160—170	= (+)	9,8	1,45	60—65	Наплавка шнеков, наконечников рыхлителей навесного оборудования бульдозеров, высокая износостойкость в условиях ударно-абразивного воздействия

Продолжение табл. 5.29

Тип электрода	Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Род тока, полярность	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Расход на 1 кг наплавленного металла, кг	Твердость наплавленного металла HRC	Применение и свойства
Э-175Б8Х6СТ	ЦН-16	4 5	130—160 190—200	= (+)	11	1,65	52—57	Наплавка черпаков драг, зубьев ковшей экскаваторов, ножей бульдозеров, износостойкость высокая в условиях абразивного истирания
Э-320Х23С2ГТР	Т-620	4 5	200—220 250—270	=	8,5	1,3	55—62	Наплавка бил мельниц, щек камнедробилок и др., износостойкость высокая условиях истирания абразивными материалами
Э-320Х25С2ГР	Т-590	4 5	200—220 250—270	∞, =	8,5	1,4	57—65	Наплавка лопаток дымососов, рабочих колес землесосов и др., износостойкость высокая в условиях истирания абразивными материалами

Примечание. Условные обозначения рода тока и полярности см. в примечании к табл. 5.14.

Таблица 5.30. Технические характеристики горючих газов (паров) и жидкостей

Газ	Плотность, кг/м³	Температура пламени при сгорании в смеси с кислородом, °С	Оптимальное соотношение между газом и кислородом в смеси в горелке	Пределы объемного содержания в смеси, при которых происходит взрыв, %	
				с воздухом	с кислородом
Ацетилен, ГОСТ 5457—75*	1,09—1,17	3150—3200	1—1	2,2—82,0	2,3—93,0
Водород, ГОСТ 3022—80*	0,084	3200	0,3—0,4	3,3—81,5	4,6—93,0
Коксовый	0,4—0,55	2000—2200	0,6—0,8	7,0—19,0	—
Природный, ГОСТ 5542—87	0,7—0,9	1850—2200	1,5—1,6	4,5—14,0	3,0—45,0
Городской, ГОСТ 5542—87	0,84—1,05	2000	1,5—1,6	3,8—24,8	10,0—73,6
Сжиженный газ (пропан-бутановая смесь), ГОСТ 20448—80*	1,95	2400—2500	3,4—3,8	2,17—9,5	2,4—57
Бензин (пары), ГОСТ 1012—72*	0,7—0,76	2500—2600	1,1—1,4	2,6—6,7	2,1—28,4
Керосин (пары)	0,8—0,84	2400—2500	1,7—2,4	1,4—5,5	—

Газообразный аргон транспортируют в стальных баллонах под давлением 15 или 20 МПа. Возможна перевозка в таре большей вместимости.

Так как аргон тяжелее воздуха, он может накапливаться в слабопроветриваемых помещениях у пола и в приямках, а также во внутренних объемах оборудования, предназначенного для получения, хранения и транспортирования газообразного и жидкого аргона. При этом снижается содержание кислорода в воздухе, что может вызвать кислородную недостаточность и удушье.

Смеси газов применяют двух- или трехкомпонентные. В качестве компонентов смеси используют активные (CO_2, O_2) и инертные (Ar, He) газы.

Основной смеси активных газов чаще всего является углекислый газ. В качестве дополнительного компонента используют в основном кислород, который вводится как добавка к активным и инертным газам.

Добавка кислорода в защитную смесь ($CO_2 + O_2$) позволяет по сравнению со сваркой в CO_2 снизить содержание водорода в металле шва, повысить стойкость сварных швов против образования трещин и пор, снизить уровень набрызгивания электродного металла (приваривание брызг), повысить стабильность процесса сварки. Добавка кислорода позволяет наряду с улучшением качества металла шва интенсифицировать металлургические процессы и экономить углекислоту.

Использование смесей аргона с окислительными газами в качестве защитной среды при сварке плавящимся электродом позволяет устранить многие технологические недостатки, присущие процессу сварки в углекислом газе, прежде всего разбрызгивание электродного металла.

Содержание кислорода в тройной смеси $Ar + CO_2 + O_2$ колеблется в пределах от 2 до 5 %. По данным Института электросварки им. Е. О. Патона АН Украины, оптимальной с точки зрения требований, предъявляемых

Таблица 5.31. Выход ацетилена из карбида кальция

Размеры кусков, мм	Обозначение	Выход ацетилена, л/кг, не менее	
		Первый сорт	Второй сорт
25—80	25/80	285	265
15—25	15/25	275	265
8—15	8/15	265	250
2—8	2/8	255	240
Смешанные размеры	—	275	255

Таблица 5.32. Защитные газы и их назначения

Газ	ГОСТ и ТУ	Содержание чистого газа по объему, %, не менее	Способ транспортировки к рабочим местам	Применение
Углекислый газ:	ГОСТ 8050—85		По газопроводу или в баллонах в жидком виде под давлением 20 МПа	Сварка углеродистых, низколегированных и нержавеющих сталей; как компонент газовых смесей с аргоном и кислородом
пищевой		99,8		
технический		98,5		
сварочный		99,5		
Азот газообразный и жидкий:	ГОСТ 9293—74*		В баллонах в газообразном состоянии под давлением (15±0,5) МПа или (20±1) МПа либо по трубопроводу	Сварка меди и медных сплавов, плазменная резка; испытания газосварочной аппаратуры
особой чистоты		99,996		
высший технический:		99,994		
1-го сорта		99,6		
2-го сорта		99,0		
Аргон газообразный и жидкий:	ГОСТ 10157—79*		В баллонах под давлением (15±0,5) МПа или (20±±1) МПа в газообразном состоянии (может поставляться в смеси с кислородом, азотом, гелием и водородом)	Сварка нержавеющих и жаропрочных легированных сталей, алюминия, меди и их сплавов, титана, циркония и др.; как компонент газовых смесей
высшего сорта		99,993		
1-го сорта		99,987		
Гелий:	ГОСТ 20461—75*		В баллонах под давлением (15±0,5) МПа или (20±±1) МПа, в газообразном состоянии	Наравне с аргоном (расход выше на 30 %); для поддува при сварке в аргоне активных и редких металлов. В качестве примеси к аргону при сварке алюминия, меди и их сплавов
особой чистоты		99,995		
высокой чистоты		99,985		
технический		99,8		

к защитному газу, является смесь 70 % Ar + 5 % O_2 + + 25 % CO_2. Технологические преимущества такой смеси особенно четко проявляются в диапазоне режимов сварки, обеспечивающих струйный перенос электродного металла. Поверхность швов при этом мелкочешуйчатая. Разбрызгивание и набрызгивание электродного металла в 3—4 раза меньше, чем при сварке в CO_2.

Применение тройной смеси для сварки большинства строительных низкоуглеродистых и низколегированных сталей возможно с использованием стандартных сварочных проволок (Св-08Г2С, Св-08ГС). При этом обеспечивается получение плотных швов с высокими показателями механических свойств, особенно ударной вязкости при низких температурах.

Экономичный способ получения тройной смеси заключается в смешивании аргоно-кислородной смеси, содержащей до 9 % кислорода, с углекислым газом. Аргоно-кислородная смесь образуется как один из продуктов промышленного разделения воздуха. Большие количества этой смеси целесообразно транспортировать и хранить в сжиженном виде, используя криогенное оборудование.

Для смешивания газов служат выпускаемые серийно постовые и рамповые смесители. Постовой смеситель УКП-1 предназначен для получения смеси газов: CO_2 — 70 % и O_2 — 30 %. Для централизованного питания сварочных постов применяется рамповый смеситель УКР-1 с возможностью одновременного питания 90—100 постов при содержании в смеси 20—30 % кислорода. Созданы конструкции автоматизированных установок УСД-1А и УСД-1Б, предназначенных для образования двухкомпонентных смесей CO_2 и O_2, с содержанием их соответственно 70—95 % и 30—5 %. Автоматизированные установки УСТ-1 и УСТ-1А предназначены

Таблица 5.33. Рекомендации по выбору защитных газов и их смесей

Свариваемые металлы и сплавы	Защитная среда при сварке электродом	
	неплавящимся	плавящимся
Низкоуглеродистые и низколегированные стали	Ar + CO_2	CO_2; 70—85 % CO_2 + 30—15 % O_2
Низкоуглеродистые, низколегированные и легированные стали	Ar	Ar + 2—5 % O_2; Ar + 5—30 % CO_2; 70 % Ar + 5 % O_2 + 25 % CO_2
Теплоустойчивые (перлитные) стали	Ar	CO_2; 75—80 % Ar + 25—20 % CO_2
Высоколегированные коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные стали	Ar; He; Ar + CO_2	CO_2; 75—90 % Ar + 25—10 % CO_2
Жаропрочные и хромоникелевые стали	Ar; He	Ar; He
Легкие и химические активные металлы и сплавы, в том числе алюминий и его сплавы	Ar; 30—50 % Ar + 70—50 % He	30—50 % Ar + 70—50 % He
Титан и его сплавы	Ar	Ar
Медь и ее сплавы	Ar; He	Ar; He; 70—80 % Ar + 30—20 % CO_2
Магниевые сплавы	Ar; He	Ar
Цирконий, молибден, тантал и другие активные металлы	Ar	Ar

для получения трехкомпонентных смесей и питания одновременно 3—40 постов. Рекомендации по выбору защитных газов и их смесей приведены в табл. 5.33.

5.4. СВАРОЧНЫЕ ФЛЮСЫ

5.4.1. Флюсы для сварки стали

Флюсы применяются в строительном производстве для механизированной дуговой и электрошлаковой сварки. Они обеспечивают высокую производительность процесса и высокое качество сварки. В строительной индустрии флюсы используются на заводах по изготовлению металлических конструкций, на монтажно-заготовительных предприятиях, при укладке трубопроводов различного назначения, в условиях строительных площадок — при сварке протяженных швов.

Флюсы предназначаются для защиты дуги и сварочной ванны от доступа воздуха и для металлургической обработки ванны расплавленного металла.

Флюсы классифицируют по способу изготовления, назначению, химическому составу, строению и размеру частиц. По способу изготовления флюсы делятся на плавленые, полученные путем сплавления компонентов в электрических или пламенных печах, и неплавленые — керамические и спеченные, а также флюсы-смеси. Керамические флюсы получают из смесей порошкообразных материалов, скрепляемых с помощью клеящих веществ, преимущественно жидкого стекла, с последующей грануляцией, сушкой и прокаливанием. Спеченные флюсы получают путем спекания компонентов шихты при высоких температурах без их сплавления. Флюсы-смеси изготовляют механическим смешением частиц различных материалов или флюсов.

По назначению различают флюсы для дуговой и электрошлаковой сварки и для наплавки углеродистых и легированных сталей, а также цветных металлов. Такое деление условно, так как флюсы, отнесенные к одной группе, часто используются при сварке металлов другой группы.

В зависимости от химического состава флюсы подразделяются по содержанию в них SiO_2 и MnO — наиболее часто встречающихся в них активных оксидов. К высококремнистым относят флюсы, содержащие 35—40 % кремнезема. При меньшем его количестве флюсы относят к низкокремнистым, а при содержании не более 4 % — к бескремнистым. По содержанию MnO плавленые флюсы делятся на безмарганцевые (до 1 % MnO) и марганцевые (свыше 1 % MnO).

Для взаимодействия металла и флюса при сварке существенное значение имеет степень основности флюса, которая определяется соотношением во флюсе основных (CaO, MgO, MnO, FeO) и кислых (SiO_2, TiO_2, ZrO_2) оксидов. Оксид алюминия Al_2O_3 и оксид железа Fe_2O_3 имеют амфотерный характер.

По строению частиц флюсы делятся на стекловидные, пемзовидные и кристаллические. Объемная масса стекловидных и кристаллических флюсов 1,4—1,8 г/см³, пемзовидных — 0,6—1,0 г/см³, промежуточную объемную массу имеют флюсы полупемзовидного строения.

Требования к химическому составу и физическим показателям флюсов приведены в ГОСТ 9087—81*. Технические характеристики наиболее часто используемых в строительстве флюсов приведены в табл. 5.34, в которой также указаны назначение и марки проволок, применяемых в сочетании с данной маркой флюса.

Ниже приведено краткое описание некоторых флюсов, разработанных преимущественно в последние годы.

Плавленый флюс АНЦ-1 предназначен для автоматической сварки и наплавки углеродистых и низколегированных сталей общего назначения взамен флюсов АН-348-А и ОСЦ-45 на режимах, рекомендованных для этих флюсов. Флюс состоит из стекловидных зерен от светло-желтого до темно-коричневого цвета. Размер зерен 0,25—2,5 мм, насыпная масса 1,4—1,7 кг/дм³. Массовая доля фосфора в АНЦ-1 ниже, чем в заменяемых флюсах. Флюс пригоден для сварки на постоянном и переменном токах. Применяется в сочетании с проволоками марок Св-08, Св-08А, Св-08ГА.

Керамический флюс АНК-57 предназначен для автоматической дуговой сварки конструкций из низколегированных сталей, работающих при пониженных температурах. Флюс флюоритно-основного типа. В сочетании с низкоуглеродистой проволокой Св-10Г2 и низколегированными проволоками марок Св-08МХ, Св-10НМА обеспечивает хорошие механические свойства металла шва, в том числе ударную вязкость на образцах типа IX по ГОСТ 6996—66* (с острым надрезом). Флюс дает хорошее формирование шва, легкую отделимость шлаковой корки, устойчивое горение дуги.

Керамический флюс АНК-60 (ТУ НЭС 491—85) предназначен для автоматической дуговой сварки никелевых хладостойких сталей марок ОН-6 и ОН-9, а также железоникелевых инварных сплавов типа 36Н и 36НХ, которые применяются при изготовлении конструкций, работающих при низких температурах.

Флюс обеспечивает хорошее формирование швов при однодуговой сварке на постоянном токе металла толщиной 10—24 мм в нижнем положении и горизонтальных швов. Требуемые механические свойства обеспечиваются при многопроходной сварке с погонной энергией не более 15 кДж/м.

Для улучшения сварочно-технологических свойств в состав флюса АНК-60 введены оксиды железа в виде гематита и фтористый натрий — до 5 % каждого. Флюс относится к высокоосновным (основность 3,1). Флюс обеспечивает высокую стойкость против пористости. Применяется в сочетании с проволоками: для сварки ОН-6 и ОН-9 — с проволокой Св-03Х19Н15Г6М2АВ2; ОН-9 — с проволокой Св-06Х15Н60М15; 36НХ — с проволокой Св-36НМГТ.

Флюсы для электрошлаковой сварки должны обеспечивать следующие условия: быстрое и легкое установление электрошлакового процесса и его устойчивость в широком диапазоне сварочных токов и напряжений; достаточное проплавление кромок основного металла и удовлетворительное формирование шва без образования подрезов и наплывов; флюс не должен вытекать в зазоры между кромками швов и формирующими устройствами и не должен отжимать ползуны от свариваемых кромок (это зависит от вязкости шлака); образовывать шлаки, легко удаляющиеся с поверхности шва; предотвращать образование горячих трещин, пор и неметаллических включений в металле шва; быть технологичными в изготовлении, не содержать дефицитных и дорогих материалов, обеспечивать необходимые санитарно-гигиенические условия при изготовлении и применении.

Флюсы существенно различаются по температуре начала плавления. Флюс АН-8 расплавляется при наиболее низкой температуре и, следовательно, является наилучшим для сварки швов с применением формирующих ползунов. По мере повышения температуры располагаются флюсы АН-8М, АН-22, АН-348-А, ФЦ-7. Наиболее тугоплавкий — флюс АНФ-1.

Требование легкой отделимости шлака связано с необходимостью упрощения операции очистки и безопасностью работ. Отделимость шлаковой корки зависит от химического состава как металла, так и флюса.

Обеспечение необходимых технологических и электрических свойств шлака достигается введением в него тех или иных компонентов. Так, например, электрошлаковый процесс становится более устойчивым с понижением во флюсах доли SiO_2 и повышением доли MnO. Сильно повышают электропроводимость шлака фтористый кальций и другие фториды, а также оксиды титана.

Лучшими технологическими свойствами при сварке углеродистых и низколегированных сталей обладают флюсы АН-8, АН-8М, АН-22. Флюсы ФЦ-7 и АН-348-А мало пригодны для сварки длинных швов. Хорошее качество швов при сварке углеродистых сталей обеспечивает флюс АН-348-В. Устойчивый электрошлаковый процесс и швы высокого качества на этих сталях получены при сварке под флюсом АН-47.

Для электрошлаковой сварки легированных сталей повышенной прочности типа 25ХН3МФА, 20Х2М разработан и применяется низкокремнистый цирконсодержащий флюс марки АН-9. Он обладает хорошими сварочно-технологическими свойствами, обеспечивая высокое качество металла шва на сталях как обычной, так и повышенной прочности.

Таблица 5.31. Технические характеристики флюсов для дуговой и электрошлаковой сварки

Марка флюса	Способ изготовления, цвет зерен	Размер зерен, мм	Объемная масса, г/см³	Род тока	Сварочный ток, А	Скорость сварки, м/ч	Рекомендуемые проволоки	Назначение
АН-348-А	Плавленый, желто-коричневый	0,35—3,0	1,3—1,8	=	1100 (2 электрода)	120	Св-08, Св-08А, Св-08ГА, Св-10Г2	Автоматическая дуговая сварка и наплавка углеродистых и низколегированных сталей, модификация АН-348-АМ (размер зерен 0,25—1,6 мм) для механизированной сварки
АН-348-В	Плавленый, темно-коричневый, черный	0,35—3,0	1,3—1,8	=	1100 (2 электрода)	120	Св-08, Св-08А, Св-08ГА, Св-10Г2	Автоматическая дуговая сварка и наплавка углеродистых и низколегированных сталей, модификация АН-348-ВМ (размер зерен 0,25—1,6 мм) для механизированной сварки, улучшенные санитарно-гигиенические характеристики
ОСЦ-45	Плавленый, светло-серый, желтый, коричневый	0,25—3,0	1,3—1,8	=	1200	30	Св-08, Св-08А, Св-08ГА, Св-10ГА	Автоматическая дуговая сварка и наплавка углеродистых и низколегированных сталей, модификация ОСЦ-45М (размер зерен 0,25—1,6 мм) для механизированной сварки
АН-60	Плавленый, белый, желтый, светло-коричневый	0,35—4,0	0,8—1,1	=	1800 (3 электрода)	220	Св-08А, Св-08ГА, Св-08ХМ, Св-10НМА	Автоматическая дуговая сварка углеродистых и низколегированных сталей с повышенной скоростью, малая склонность швов к порообразованию при сварке ржавого металла
АН-47	Плавленый, темно-коричневый, черный	0,25—2,5	1,4—1,8	= (+)	1200	120	Св-08ГА, Св-10Г2, Св-08ХМ, Св-08МХ, Св-10НМА	Автоматическая дуговая сварка низколегированных сталей обычной и повышенной прочности, особенно для сварки стыков труб большого диаметра из дисперсно-упрочненных сталей
АН-65	Плавленый, темно-серый, черный	0,35—2,5	0,85—1,1	=	1700 (3 электрода)	220	Св-08ГА, Св-10Г2, Св-08ХМ, Св-10НМА	Автоматическая сварка углеродистых и низколегированных сталей с повышенной скоростью, обеспечивает высокие значения ударной вязкости при отрицательных температурах
АН-17М	Плавленый, черный, коричневый, зеленый	0,25—2,5	1,4—1,7	= (+)	750	30—40	Св-10ГА, Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-08ХН2ГМЮ, Св-08ХН2Г2СМЮ	Автоматическая дуговая сварка низколегированных термоупрочненных сталей

Продолжение табл. 5.34

Марка флюса	Способ изготовления, цвет зерен	Размер зерен, мм	Объемная масса, г/см³	Род тока	Сварочный ток, А	Скорость сварки, м/ч	Рекомендуемые проволоки	Назначение
АН-43	Плавленый, черный, коричневый, зеленый	0,25—2,5	1,3—1,8	= (+)	800	30—40	Св-10ГН, Св-10НМА, Св-08ГСМТ, Св-08ХГСМА, Св-08ХН2ГМЮ, Св-08ХГСМФА, Св-10ХГ2СМА	То же
АН-26С	Плавленый, серый, светло-зеленый	0,25—2,5	1,3—1,8	=	800	40	Св-06Х19Н9Т, Св-01Х19Н9, Св-08Х19Н10Б	Автоматическая и механизированная дуговая сварка нержавеющих и жаропрочных сталей. Модификации АН-26П (размер зерен 0,35—3,0 мм) и АН-26СП (размер зерен 0,25—4,0 мм)
ВН-20С	Плавленый, светло-серый, светло-голубой	0,35—3,0	1,3—1,7	=	550	30	ПП-3Х2В8, ПП-25Х5ФМС, Нп-10ХГСА, Св-30Х25Н16Г7	Автоматическая дуговая наплавка высоколегированных сталей; сварка легированных и высоколегированных сталей, меди и ее сплавов
АНК-30	Керамический, серый	0,25—2,5	1,0—1,2	= (+)	1000	40	Св-10Г2	Автоматическая дуговая сварка конструкций из углеродистых и низколегированных сталей, в том числе хладостойких мелкозернистых повышенной прочности
АНК-35	Керамический, черный	0,25—2,5	1,0—1,2	= (+)	1000	50	Св-08А	Автоматическая дуговая сварка низкоуглеродистых сталей
АН-8	Плавленый, желтый, коричневый	0,25—2,5	1,5—1,8	=	600	40	Св-08ГА, Св-10Г2, Св-10НМА, Св-08ХН2ГМЮ	Электрошлаковая сварка и наплавка углеродистых и низколегированных сталей
АН-22	Плавленый, светло-коричневый, желтый	0,25—2,5	1,5—1,8	Для ЭШС; =	800	40	Св-08Х20Н9Г7Т, Св-08ГА, Св-10Г2, Св-10НМА	Электрошлаковая сварка и наплавка легированных сталей; дуговая сварка и наплавка высоколегированных сталей, содержащих марганец

Электрошлаковую сварку легированных и высоколегированных сталей и сплавов осуществляют под флюсами на основе CaF_2, CaO, Al_2O_3 (АНФ-1, АНФ-7, 48-ОФ6 и др). Хорошие результаты при сварке коррозионно-стойких и углеродистых сталей получены под флюсом АН-45.

Для электрошлаковой сварки и наплавки чугуна нашел применение флюс АНФ-14 и разработан флюс АН-75.

В качестве электродного материала при электрошлаковой сварке применяют проволоку, пластины, ленты и др. Как правило, используют проволоку сплошного сечения диаметром 3 мм, но можно применять проволоку и других диаметров (1—2 мм или 5—6 мм). Флюсы АН-8 и АН-22 широко применялись при возведении кожухов доменных печей, в том числе крупных — № 9 объемом 5000 м³ Криворожского металлургического завода и объемом 5500 м³ Череповецкого металлургического завода. При этом флюс АН-8 использовался для электрошлаковой сварки элементов конструкций из низколегированной стали, а АН-22 — для сварки высоколегированной стали и ее сочетаний с низколегированной. Толщина свариваемых листов составляла 20—45 мм.

В случае увлажнения флюсы перед сваркой должны быть просушены. Температура, продолжительность сушки и допустимая влажность зависят от марки флюса. Например, температура сушки флюсов АН-348-А, АНЦ-1, АН-348-В составляет 350—400 °С, продолжительность — около 2 ч, допустимая влажность — не более 0,1 %.

Флюс-паста предназначена для защиты и лучшего формирования обратной стороны корневого шва при односторонней сварке трубопроводов. Применяется взамен поддува аргона.

Флюс-паста ФПВ-2 используется при сварке трубопроводов из коррозионно-стойких аустенитных сталей. Для сварки трубопроводов из низкоуглеродистых сталей разработана флюс-паста ФП8-Н.

В состав флюс-пасты входят сухая шихта и жидкая силикатная связка, поставляемые раздельно. Шихту и связку перед употреблением тщательно перемешивают до получения однородной пастообразной массы. Ее наносят шпателем (ширина 3—5 мм) в виде полос на кромки стыка с внутренней его стороны. Ширина полосы 5—7 мм, толщина 0,4—0,7 мм.

Таблица 5.35. Состав флюсов для сварки алюминия и его сплавов, % (по массе)

Составляющие вещества	Марки флюсов для сварки												
	полуоткрытой дугой						закрытой дугой				электрошлаковой		
	АН-А1	МАТИ-1	МАТИ-1А	МАТИ-10	АФ-5	АН-А4	ЖА-64	ЖА-64А	ЖА-70П	ЖА-72П	АН-А301	АН-А302	АН-А304
Хлористый калий	50	34	47	30	50	57	43	38	До 46	34—40	50	40	—
Хлористый натрий	20	43	—	—	10	—	17	15	15—19	14—17	—	35	—
Криолит	30	23	3	2	—	—	36	43	20—44	36—46	—	—	—
Хлористый барий	—	—	—	68	40	28	—	—	—	—	20	—	—
Песок кварцевый	—	—	—	—	—	—	4	До 1	3—5	До 1	—	—	—
Фтористый кальций	—	—	—	—	—	—	—	3	—	4—6	—	—	15
Хлористый литий	—	—	8	—	—	—	—	—	—	—	20	15	—
Фтористый литий	—	—	—	—	—	7,5	—	—	—	—	8	—	25
Фтористый натрий	—	—	42	—	—	—	—	—	—	—	—	6	60
Фтористый алюминий	—	—	—	—	—	7,5	—	—	—	—	2	4	—

Сварку производят после полного высыхания (через 15—20 мин при температуре 15—20 °С).

При сварке в процессе плавления флюс-пасты входящие в ее состав компоненты диссоциируют, а сама флюс-паста образует шлак, который защищает металл ванны от воздуха и способствует хорошему формированию корня шва.

5.4.2. Флюсы для сварки цветных металлов и сплавов

Флюсы для сварки алюминия и его сплавов должны обладать следующими сварочно-технологическими свойствами: быть легкоплавкими, иметь малую плотность, хорошо смачивать поверхность свариваемого металла, иметь способность растворять или абсорбировать оксидную пленку Al_2O_3, быть малогигроскопичными, обеспечивать устойчивое горение дуги и хорошее формирование шва, хорошие механические свойства шва. Этим требованиям удовлетворяют флюсы, состоящие из хлоридов и фторидов щелочных и щелочноземельных металлов.

Таблица 5.36. Флюсы для дуговой сварки титана

Марка флюса	Толщина свариваемого металла, мм	Назначение
	Сварка плавящимся электродом	
АНТ-1	3—7	Сварка технического титана и его сплавов
АНТ-3	6—12	То же
АНТ-7	8—20	» »
	Сварка неплавящимся электродом	
АНТ-17А	3—6	Сварка низколегированных сплавов без присадочной проволоки
АНТ-23А	0,8—3	То же
ФАН-1	3—6	Сварка средне- и высоколегированных сплавов с присадочной проволокой
	Электрошлаковая сварка	
АНТ-2	40	Сварка технического титана и его сплавов (низколегированных)
АНТ-4, АНТ-6	40	Сварка высокопрочных титановых сплавов

Механизированную сварку алюминия можно осуществлять двумя различными способами: под флюсом и по флюсу полуоткрытой дугой. При использовании последнего способа на свариваемую поверхность наносится тонкий слой флюса, недостаточный для закрытия дуги. При этом пары флюса, образующиеся при его нагревании дугой, защищают металл сварочной ванны от действия воздуха. Основными недостатками способа сварки по флюсу являются интенсивное свечение дуги, выделение большого количества паров и газов, разбрызгивание электродного металла, высокая трудоемкость удаления шлака. Поэтому сваркой по флюсу выполняют преимущественно стыковые швы, с которых легче удалить шлак.

Предложено большое количество рецептов флюсов, однако ввиду недостаточного опыта их применения сложно отдать предпочтение какому-либо из них. Составы некоторых флюсов для сварки полуоткрытой и закрытой дугой, а также электрошлаковой сварки алюминия и его сплавов приведены в табл. 5.35.

Флюс АН-А1 получил практическое применение для сварки полуоткрытой дугой технического алюминия и сплавов, не содержащих магния. Во флюсах для сварки алюминиево-магниевых сплавов количество солей натрия должно быть минимальным или они должны вовсе отсутствовать. Это требование вызвано возможностью восстановления натрия в процессе сварки магнием и перехода его в шов, что приводит к снижению пластичности металла шва и образованию в нем пор. С учетом этого требования разработаны флюсы АН-А4, АФ-5 и МАТИ-10.

Флюс МАТИ-1А предназначен для сварки алюминиево-марганцевых сплавов.

Во флюсах для сварки алюминия и его сплавов закрытой дугой содержится повышенное количество криолита и небольшое — SiO_2 (до 5 %). Флюсы ЖА-64 и ЖА-64А — керамические, применяются для сварки алюминия толщиной 30 мм и более. Флюсы ЖА-70П и ЖА-72П — плавленые. При этом флюс ЖА-72П, в котором часть SiO_2 заменена на CaF_2, предназначен для сварки алюминия высокой чистоты, например АД00.

Электрошлаковый процесс целесообразно применять для сварки конструкций из алюминия и его сплавов при толщине металла более 40 мм. С увеличением толщины изделий технико-экономическая эффективность процесса возрастает.

К флюсам для электрошлаковой сварки алюминия и его сплавов предъявляются дополнительные требования относительно большей легкоплавкости и повышенной жидкотекучести при температуре существования шлаковой ванны. Этим требованиям отвечают флюсы на основе фторидов и хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов: АН-А301, АН-А302, АН-А303, АН-А304, АН-А306, АНМ-10.

Флюсы для сварки титана и его сплавов применяются при сварке под флюсом плавящимся электродом, аргонодуговой сварке неплавящимся электродом и электрошлаковой.

Таблица 5.37. Материалы для сварки строительных стальных конструкций *

Группа конструкций в климатических районах	Марка стали	Сварка			
		под флюсом		в углекислом газе (ГОСТ 8050—85) или в его смеси с аргоном (ГОСТ 10157—79*)	покрытыми электродами типа (ГОСТ 9467—75*)
		Марка			
		флюсов (ГОСТ 9087—81)	сварочной проволоки (ГОСТ 2246—70*)		
2, 3 и 4 во всех районах, кроме I_1, I_2, II_2 и II_3	18сп, 18пс, 18кп, 18Гсп, Ст3сп, Ст3пс, Ст3кп, Ст3Гпс, 20, СтТпс	АН-348-А, АН-60	Св-08А, Св-08ГА	Св-08Г2С, Св-08Г2СЦ	Э42, Э46
	09Г2С, 09Г2, 10Г2С1, 14Г2, 15ХСНД, 10ХНДП, 10ХСНД	АН-47, АН-43, АН-17М, АН-348-А **	Св-10НМА, Св-08ХМ, Св-10Г2 ***, Св-08ГА ***, Св-10ГА ***	Св-08Г2С, Св-08Г2СЦ	Э46, Э50
	18Г2АФпс, 16Г2АФ, 15Г2СФ, 15Г2АФДпс, 14Г2АФ	АН-47, АН-43, АН-17М, АН-348-А**	Св-10НМА, Св-08ХМ 4*	Св-08Г2С, Св-08Г2СЦ, Св-08ХГСМА, Св-10ХГ2СМА	Э50, Э60
1 — во всех районах; 2, 3 и 4 — в районах I_1, I_2, II_2 и II_3	18сп, 18Гпс, 18Гсп, Ст3сп, Ст3пс, Ст3Гпс, 20, СтТпс	АН-348-А	Св-08А, Св-08ГА	Св-08Г2С, Св-08Г2СЦ	Э42А, Э46А
	09Г2С, 09Г2, 10Г2С1, 14Г2, 15ХСНД, 10ХНДП, 10ХСНД	АН-47, АН-43, АН-348-А **	Св-10НМА Св-08ХМ 4*	Св-08Г2С, Св-08Г2СЦ	Э46А, Э50А
	18Г2АФпс, 16Г2АФ, 15Г2АФДпс, 14Г2АФ	АН-47, АН-17М, АН-348-А **	Св-10НМА, Св-08ХМ 4*	Св-08Г2С, Св-08Г2СЦ, Св-08ХГСМА, Св-10ХГ2СМА	Э50А, Э60
	12ГН2МФАЮ, 12Г2СМФ	АН-17М	Св-08ХН2ГМЮ	Св-10ХГ2СМА	Э70

* При соответствующем технико-экономическом обосновании для сварки конструкций разрешается использовать сварочные материалы (проволоки, флюсы, защитные газы), не указанные в настоящей таблице. При этом механические свойства металла шва, выполняемого с их применением, должны быть не хуже свойств, обеспечиваемых применением материалов согласно настоящей таблице.

** Применение флюса АН-348-А требует проведения дополнительного контроля механических свойств металла шва при сварке соединений элементов всех толщин для конструкций в климатических районах I_1, I_2, II_2, II_3 и толщин более 32 мм для конструкций в остальных климатических районах.

*** Не применять в сочетании с флюсом АН-43.

4* Применять только в сочетании с флюсом АН-47.

Для каждого из этих способов разработаны специальные флюсы с учетом особых свойств титана и его сплавов — высокой температуры плавления, большого химического сродства к азоту и кислороду при повышенных температурах и особенно в расплавленном состоянии, склонности к росту зерна при нагреве. Разработан ряд бескислородных флюсов. Назначение наиболее широко применяющихся из них приведено в табл. 5.36.

Сварку титана и его сплавов под флюсом выполняют на постоянном токе обратной полярности. Высота слоя должна быть достаточной для того, чтобы не допускать прорыва дуги сквозь слой. Шлаковую корку со шва следует удалять только после его остывания до температуры ниже 400 °С. При соблюдении этих условий швы не имеют пор, шлаковых включений, трещин и других дефектов. Удовлетворительное формирование достигается в узком диапазоне режимов.

Непосредственно перед употреблением флюс необходимо прокалить при температуре 350—400 °С в течение 1,5—2 ч.

Для электрошлаковой сварки конструкций из титана и его сплавов применяют хлоридно-фтористые флюсы: АНТ-2, АНТ-4 АНТ-6.

Флюсы для сварки меди и большинства ее сплавов в связи с низкой их химической активностью применяются те же, что и для сварки стали плавящимся электродом. При сварке постоянным током на обратной полярности эти флюсы обеспечивают удовлетворительную устойчивость дугового процесса и получение плотных швов. В связи с высокой теплопроводностью меди под флюсом свариваются только стыковые швы.

При толщине металла 20—25 мм применяются флюсы, серийно выпускаемые промышленностью: АН-26С, АН-20С, АН-348-А, ОСЦ-45. При большей толщине перечисленные флюсы не обеспечивают получение плотных швов и нужной пластичности сварных соединений. Для улучшения этих показателей при сварке меди и хромовой бронзы толщиной 30—40 мм рекомендуется применять смесь флюсов АН-26С (80 %) и АН-60 (20 %).

Толстолистовую медь сваривают электрошлаковым способом, для которого непригодны флюсы, обычно применяемые при сварке стали этим способом. Для электрошлаковой сварки меди разработаны специальные легкоплавкие флюсы на основе фторидов щелочных и щелочноземельных металлов. К ним относится, например, флюс АН-М10, имеющий следующий состав, %: NaF — 50—70, LiF — 10—20, CaF_2 — 10—20, SiO_2 — 5—10, CaO — до 3.

Для дуговой сварки и наплавки алюминиевых бронз применяются низкокремнистые и высококремнистые плавленые флюсы, предназначенные для сварки стали. Наибольшую плотность швов на алюминиевой бронзе обеспечивает флюс АН-60.

Высокое качество сварки латуни со сталью обеспечивает использование флюса АН-20.

5.5. МАТЕРИАЛЫ, РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ДЛЯ СВАРКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Материалы для автоматической под флюсом, механизированной в углекислом газе и ручной сварки покрытыми электродами приведены в табл. 5.37 (СНиП II-23—81*). Материалы соответствуют указанным в таблице маркам стали и применяются в зависимости от группы конструкций и климатических районов.

К группе 1 отнесены сварные конструкции либо их элементы, работающие в особо тяжелых условиях или подвергающиеся непосредственному воздействию динамических, вибрационных или подвижных нагрузок (подкрановые балки, элементы конструкций бункерных и разгрузочных эстакад, непосредственно воспринимающих нагрузку от подвижных составов, пролетные строения транспортных галерей и т. п.). К группе 2 отнесены сварные конструкции либо их элементы, работающие при статической нагрузке (фермы, ригели рам, балки покрытий и перекрытий, опоры транспортных галерей и т. п.). К группе 3 отнесены сварные конструкции либо их элементы, работающие при статической нагрузке (колонны, вертикальные связи по колоннам, стойки, элементы настила покрытий, конструкции, поддерживающие технологическое оборудование, и т. п.). К группе 4 отнесены вспомогательные конструкции зданий и сооружений (связи, кроме указанных в группе 3, элементы фахверка, лестницы, трапы, площадки, ограждения и т. п.).

В табл. 5.37 выделены климатические районы со следующими расчетными температурами районов строительства (t, °С):

I_1	$-50 > t \geqslant 65$
I_2, II_2, II_3	$-40 > t \geqslant 50$
II_4	$-30 > t \geqslant 40$
II_5 и др.	$t \geqslant -30$

Расчет сварных соединений стальных конструкций: стыковых — на центральное растяжение или сжатие и угловых — на срез (условный) следует производить по формулам и нормативным расчетным сопротивлениям, приведенным в СНиП II-23—81*.

ГЛАВА 6

ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ

Неравномерность нагрева изделия при сварке, неодновременность появления объемных эффектов структурных превращений, различие в физических свойствах материалов свариваемых изделий приводят к интенсивным деформационным процессам в околошовной зоне. Эти факторы существенно влияют на технологическую прочность, точность изготовления, несущую способность и эксплуатационную стойкость сварного соединения. Поэтому наличие информации об этих процессах в зависимости от условий и параметров режима сварки весьма важно; оно необходимо для рационального проектирования сварных конструкций, а также при разработке технологии их изготовления.

6.1. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Рассмотрим идеализированную модель образования продольных (вдоль сварного шва) сварочных напряжений при сварке полос или узких пластин (рис. 6.1). Модель состоит из трех взаимосвязанных стержней, из которых стержень I имитирует зону сварного шва, а стержень II соответствует периферийной части соединения. Стержни имеют сечения с площадями соответственно F_I и F_{II}. Известны закономерности изменения во времени t температур $T_I(t)$ и $T_{II}(t)$, а также соответствующих объемных эффектов $\varphi_I(t)$ и $\varphi_{II}(t)$, связанных либо с чисто температурным удлинением, либо еще и со структурными превращениями. Будем считать, что стержни II деформируются чисто упруго, а стержень I — упругопластически. Деформацией ползучести пренебрегаем. Тогда в соответствии с [1] можно записать

$$d\varepsilon_I = d\left(\frac{\sigma_I}{E}\right) + d\varphi_I + d\varepsilon_I^p; \quad d\varepsilon_{II} = d\left(\frac{\sigma_{II}}{E}\right) + d\varphi_{II}, \tag{6.1}$$

где $d\varepsilon_I$ и $d\varepsilon_{II}$ — дифференциальные приращения за время dt продольных деформаций соответствующих стержней; $d\varepsilon_I^p$ — приращение пластической составляющей деформации стержня I, σ_I и σ_{II} — напряжения в стержнях; E — модуль упругости.

К уравнениям (6.1) можно присоединить уравнение совместности деформаций

$$d\varepsilon_I = d\varepsilon_{II} = d\varepsilon, \tag{6.2}$$

уравнение равновесия

$$\sigma_I = \sigma_{II}\frac{F_{II}}{F_I} \tag{6.3}$$

и условие идеальной текучести

$$|\sigma_I| \leqslant \sigma_\tau(T), \tag{6.4}$$

где $\sigma_\tau(T)$ — предел текучести материала при температуре T. Если весь период времени нагрева и охлаждения стержней разбить на ряд временных интервалов длиной Δt, то из (6.1) — (6.4) следует при постоянном E за время Δt

$$\sigma_I(t) = \sigma_I(t-\Delta t) + \frac{E}{1+0{,}5F_I/F_{II}}[\Delta(\varphi_{II}-\varphi_I) - \Delta\varepsilon_I^p];$$

$$|\sigma_I(t)| \leqslant \sigma_\tau(T); \quad \sigma_{II}(t) = \sigma_I(t)\frac{F_{II}}{F_I}. \tag{6.5}$$

Используя уравнения (6.5) и заданные кривые $T_I(t)$, $T_{II}(t)$, $\varphi_I(T)$, $\varphi_{II}(T)$, $\sigma_\tau(T)$, можно проследить развитие напряжений и деформаций в рассматриваемых стержнях начиная с начального состояния $t=0$ до полного остывания. На рис. 6.2 приведена кинетическая диаграмма развития напряжений $\sigma_I(T)$ при условии, что $T_{II} = T_0 = \text{const}$, $\varphi_{II} = 0$, $\varphi_I = \alpha(T - T_0)$, где α — коэффициент температурного удлинения материала. Точками *1, 2, ..., 6* обозначены характерные участки развития напряжений и пластических деформаций в стержне *I*. *Участок 1—2* — упругая деформация:

$$\Delta\varepsilon_I^p = 0; \quad \sigma_I(T) = -\frac{E}{1+0{,}5F_I/F_{II}}\alpha(T_I - T_0). \tag{6.6}$$

Участок 2—3 — пластическое течение (сжатие):

$$\sigma_I = -\sigma_\tau(T);$$

$$\Delta\varepsilon_I^p = \varepsilon_I^p = -\alpha[T_I - T_I^{(2)}] + [\sigma_\tau(T_I) - \sigma_\tau(T_I^{(2)})] \times \frac{1+0{,}5F_I/F_{II}}{E} = \sigma_\tau(T_I)\frac{1+0{,}5F_I/F_{II}}{E} - \alpha(T_I - T_0). \tag{6.7}$$

В точке *3* температура T_I достигает максимального значения $T_I^{\max}$, а затем происходит охлаждение стержня.

Участок 3—4 — упругая разгрузка:

$$\sigma_I = -\sigma_\tau(T_I^{\max}) - \frac{E}{1+0{,}5F_I/F_{II}}\alpha(T_I - T_I^{\max});$$

$$\Delta\varepsilon_I^p = 0, \ \varepsilon_I^p = \sigma_\tau(T_I^{\max})\frac{1+0{,}5F_I/F_{II}}{E} - \alpha(T_I^{\max} - T_0). \tag{6.8}$$

Участок 4—5 — повторное пластическое течение (растяжение):

$$\sigma_I = \sigma_\tau(T_I);$$

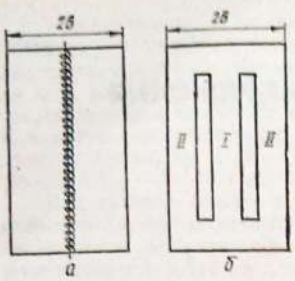


Рис. 6.1. Схема свариваемой встык тонкой пластины (*а*) и идеализированная модель из трех стержней (*б*).

$$\Delta\varepsilon_1^p = \alpha\,[T_1^{(4)} - T_1] - [\sigma_\tau(T_1) - \sigma_\tau(T_1^{(4)})] \times$$
$$\times \frac{1 + 0{,}5F_1/F_{11}}{E};$$
$$\varepsilon_1^p = \alpha\,[T_1^{(4)} - T_1 - T_1^{\max} + T_0] - [\sigma_\tau(T_1) - \quad (6.9)$$
$$- \sigma_\tau(T_1^{(4)}) - \sigma_\tau(T_1^{\max})]\,\frac{1 + 0{,}5F_1/F_{11}}{E} =$$
$$= -\sigma_\tau(T_1)\,\frac{1 + 0{,}5F_1/F_{11}}{E} + \alpha\,(T_0 - T_1).$$

Участок 5—6 — равномерное остывание обоих стержней, когда $T_1 = T_{11}$, не меняет напряженного состояния и пластических деформаций. Следовательно, для остаточного состояния

$$\sigma_1^{\text{ост}} = \sigma_\tau(T_0);\quad (\varepsilon_1^p)^{\text{ост}} = -\sigma_\tau(T_0)\,\frac{1 + 0{,}5F_1/F_{11}}{E}. \quad (6.10)$$

Полная деформация (укорочение) стержней

$$\varepsilon^{\text{ост}} = \frac{\sigma_\tau(T_0)}{E} + (\varepsilon_1^p)^{\text{ост}} = -\frac{\sigma_\tau(T_0)}{2E}\,\frac{F_1}{F_{11}}. \quad (6.11)$$

Несмотря на достаточно высокую степень идеализации рассматриваемой модели, из полученных результатов можно сделать ряд общих выводов относительно напряжений и деформаций. Для формирования остаточных напряжений наиболее ответственными являются участки охлаждения после точки *4*. Возрастание напряжений характеризуется кривой $\sigma_\tau(T_1)$, если на участке *4—5* согласно (6.5)

$$\frac{\partial\sigma_\tau}{\partial T_1}\,dT_1 < \frac{E}{1 + 0{,}5F_1/F_{11}}\,\frac{\partial(\varphi_{11} - \varphi_1)}{\partial T_1}\,dT_1. \quad (6.12)$$

Из (6.12) следует, что не всегда остаточные напряжения соответствуют пределу текучести материала при температуре T_0. Если значение $\partial\sigma_\tau/\partial T_1$ вблизи температуры $T_1 = T_0$ весьма значительно, как, например, у титановых сплавов, то остаточные напряжения почти всегда ниже предела текучести. Снижение темпа изменения величины $\partial(\varphi_{11} - \varphi_1)/\partial T_1$ при остывании за счет высокой теплопроводности материала (φ_{11} быстро стремится к φ_1) также приводит к тому, что остаточные напряжения в зоне шва ниже предела текучести. Последнее характерно, например, для алюминиевых, ниобиевых, молибденовых сплавов, причем для двух первых высокая теплопроводность сочетается с низкими значениями модуля упругости. Уменьшение жесткости соединения за счет увеличения отношений F_1/F_{11} по (6.12) способствует снижению остаточных продольных напряжений. Это особенно характерно для материалов, у которых величины φ невелики (например, ниобиевые и молибденовые сплавы). Применение предварительного подогрева T_0 до температур, при которых начинается резкое изменение величины $\sigma_\tau(T)$ (например, для сталей — 250—300 °С), способствует заметному снижению остаточных напряжений (примерно в 1,5 раза, хотя σ_τ (300 °С) $\approx 0{,}9\,\sigma_\tau$ (20 °С) [1]. При структурных превращениях со значительными объемными эффектами на стадии охлаждения ветвь *4—6* на рис. 6.2 может уходить в зону отрицательных напряжений, что характерно для сварки закаливающихся сталей.

Из рассмотренной модели следует, что в результате неравномерного нагрева возникают пластические деформации, которые приводят к общим деформациям укорочения свариваемых элементов. Чем меньше жесткость (отношение F_{11}/F_1), тем больше укорочение при сварке.

Указанные выводы имеют, в основном, качественный характер, и их следует относить только к продольным напряжениям при сварке узких полос. Реальная картина напряжений и деформаций в конкретных сварных изделиях, как правило, значительно сложнее. Накоплено достаточно много сведений в этой области, полученных экспериментальными и расчетными методами. Однако прежде чем приступить к изложению этих сведений, рассмотрим общие понятия и классификацию сварочных напряжений и деформаций.

Напряжения при сварке — это тензорная функция, которую в системе декартовых координат $Oxyz$ можно представить в виде

$$\sigma_{ij}(i,\ j = x,\ y,\ z) = \begin{Vmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{Vmatrix}, \quad (6.13)$$

где σ_{xx}, σ_{xy}, ... — компоненты тензора напряжений. Принято считать, что тензор σ_{ij} симметричный ($\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ и т. д.). Сварочные напряжения обычно самоуравновешенные, поэтому компоненты тензора напряжений удовлетворяют условиям статики, т. е. для всех внутренних объемов свариваемого изделия для (6.13) имеет место [1]

$$\frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial z} = 0;$$
$$\frac{\partial\sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial z} = 0; \quad (6.14)$$
$$\frac{\partial\sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} = 0,$$

а на поверхностях, ограничивающих свариваемое изделие и определяемых нормалями n,

$$X_n = \sigma_{xx}l + \sigma_{xy}m + \sigma_{xz}\gamma;$$
$$Y_n = \sigma_{yx}l + \sigma_{yy}m + \sigma_{yz}\gamma; \quad (6.15)$$
$$Z_n = \sigma_{zx}l + \sigma_{zy}m + \sigma_{zz}\gamma,$$

где X_n, Y_n, Z_n — проекции распределенного усилия на указанные поверхности, определяемые взаимодействием свариваемого изделия с технологической оснасткой и другими факторами; l, m, γ — направляющие косинусы нормали n.

В случае, когда $X_n \approx Y_n \approx Z_n \equiv 0$, сварочные напряжения соответствуют условиям сварки в свободном состоянии. Отличные от нуля усилия X_n, Y_n, Z_n создают дополнительные, так называемые реактивные, напряжения.

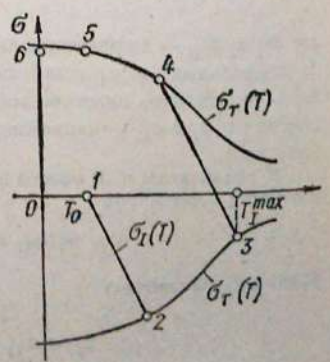


Рис. 6.2. Диаграмма развития напряжения σ в стержне I (см. рис. 6.1) в зависимости от изменения его температуры T.

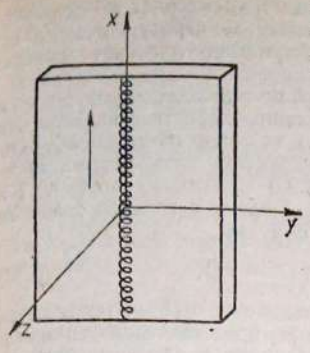


Рис. 6.3. Основные направления x, y, z, связанные с осью сварного шва.

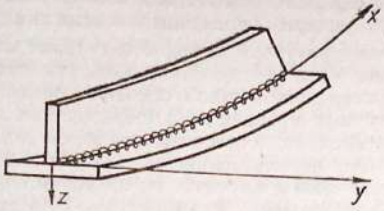


Рис. 6.4. Схема сварной балки таврового сечения с одним поясным швом.

Деформации в каждой точке свариваемого изделия также определяются тензорной функцией

$$\varepsilon_{ij}\,(i,\ j=x,\ y,\ z)=\begin{Vmatrix}\varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz}\\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz}\\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz}\end{Vmatrix}, \qquad (6.16)$$

где $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{xy}, \ldots$ — компоненты тензора деформаций. Принято также считать, что тензор ε_{ij} — симметричный, т. е. $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}\,(i, j = x, y, z)$.

Компоненты тензора ε_{ij} связаны с вектором перемещений $u_i\ (i = x, y, z)$ соотношениями Коши, т. е.

$$\varepsilon_{xx}=\frac{\partial u_x}{\partial x}\ ;\quad \varepsilon_{xy}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_y}{\partial x}+\frac{\partial u_x}{\partial y}\right)\ ; \qquad (6.17)$$

$$\varepsilon_{xz}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_z}{\partial x}+\frac{\partial u_x}{\partial z}\right)\ \text{и т. д.}$$

Тензоры σ_{ij} и ε_{ij} имеют характеристики (инварианты), значения которых не зависят от выбираемой системы координат. Для каждого из приведенных тензоров можно указать по три независимых инварианта, комбинируя которые можно получить целый ряд других инвариантных характеристик. Наиболее важные из них: среднее давление

$$\sigma=\frac{1}{3}\,(\sigma_{xx}+\sigma_{yy}+\sigma_{zz}), \qquad (6.18)$$

средняя деформация

$$\varepsilon=\frac{1}{3}\,(\varepsilon_{xx}+\varepsilon_{yy}+\varepsilon_{zz}), \qquad (6.19)$$

интенсивность напряжений

$$\sigma_i=\frac{1}{2}\,[(\sigma_{xx}-\sigma_{yy})^2+(\sigma_{xx}-\sigma_{zz})^2+(\sigma_{yy}-\sigma_{zz})^2+$$
$$+\,6\,(\sigma_{xy}^2+\sigma_{zy}^2+\sigma_{xz}^2)]^{0,5}, \qquad (6.20)$$

интенсивность деформаций

$$\varepsilon_i=\frac{\sqrt{2}}{3}\,[(\varepsilon_{xx}-\varepsilon_{yy})^2+(\varepsilon_{xx}-\varepsilon_{zz})^2+(\varepsilon_{yy}-\varepsilon_{zz})^2+$$
$$+\,6\,(\varepsilon_{xy}^2+\varepsilon_{xz}^2+\varepsilon_{yz}^2)]^{0,5}. \qquad (6.21)$$

В любой точке изделия можно найти такие направления i, j для тензоров напряжений и деформаций, когда отличными от нуля будут только диагональные элементы (нормальные компоненты напряжений и деформаций). Такие направления называются главными. В общем случае напряжено-деформированного состояния изделия эти направления в разных точках изделия различны. Однако главные направления могут быть одинаковыми для больших участков свариваемого изделия, что делает удобным их использование на практике. Очень часто такими направлениями для сварочных напряжений и деформаций могут быть направления, связанные с осью сварного шва (рис. 6.3). В этом случае принято нормальные напряжения σ_{xx} и деформации ε_{xx} и перемещения u_x называть продольными вдоль сварного шва; нормальные напряжения σ_{yy}, деформации ε_{yy} и перемещения u_y — поперечными (действуют поперек сварного шва); нормальные напряжения σ_{zz}, деформации ε_{zz} и перемещения u_z — поперечными по толщине свариваемого изделия [2]. Для тонкостенных изделий все компоненты тензора напряжений с индексом z (по толщине изделия) обычно невелики по сравнению с остальными. Такие случаи соответствуют плоскому напряженному состоянию (при этом деформации ε_{zz} и перемещения u_z могут быть весьма значительными). Для сварочных напряжений в конструкциях достаточно характерно, что продольные напряжения значительно больше всех остальных компонентов тензора напряжений (например, в сварных балках при сварке поясных швов (рис. 6.4)). Такие случаи напряженного состояния называют линейными. Естественно, что при линейном напряженном состоянии поперечные деформации и особенно перемещения могут быть весьма значительными.

Среди множества формоизменений свариваемых изделий, определяемых перемещениями от сварки, можно выделить несколько наиболее типичных видов (рис. 6.5), которые проявляются отдельно либо в определенных комбинациях друг с другом. Это изменения, вызванные поперечной (*а*) и продольной (*б*) усадкой, поворотом одного элемента относительно другого (*в*), изгибные деформации балок от продольных швов (*г*), угловые деформации (*д*), бухтиноватость, связанная с потерей устойчивости тонкостенных элементов (*е*), «корсетность» от кольцевых швов на цилиндрических оболочках (*ж*) и некоторые другие. Различают временные и остаточные сварочные напряжения и деформации. Первые сопровождают процесс сварки и заканчиваются остаточными обычно после полного охлаждения (выравнивания температур). Эти клас-

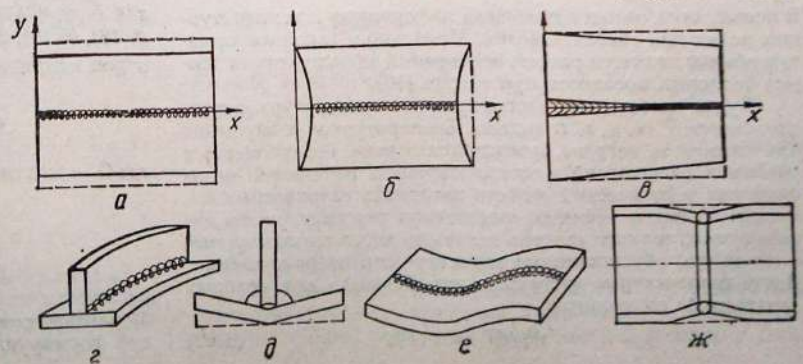


Рис. 6.5. Типичные случаи формоизменения свариваемых деталей:

а — от поперечной усадки; *б* — от продольной усадки; *в* — от поворота одного элемента относительно другого; *г* — изгибные деформации балок от поясных швов; *д* — от угловых деформаций; *е* — бухтиноватость; *ж* — корсетность в зоне кольцевых швов тонкостенных оболочек вращения.

сификационные определения относятся к так называемым напряжениям первого рода, хотя сварочный нагрев и связанные с ним структурные изменения материала, а также пластическое деформирование могут приводить к возникновению напряжений второго и третьего родов. В дальнейшем рассматриваются только напряжения (деформации) первого рода в предположении, что напряжения (деформации) более высоких (второго и третьего) родов практически могут быть учтены через изменения соответствующих свойств материалов в зоне сварки.

Имеется большое количество работ по экспериментальному и теоретическому (расчетными методами) исследованию процессов образования сварочных напряжений и деформаций, что объясняется настоятельной потребностью практики проектирования и получения высококачественных сварных конструкций, а также интенсивным развитием смежных областей знаний (механики деформируемых сред, вычислительной техники, численных методов и т. д.) [1—3 и др.].

Ниже изложены современные расчетные и экспериментальные методы определения сварочных напряжений и деформаций.

6.2. РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

Расчетные методы определения сварочных напряжений и деформаций можно условно разделить на две группы. В первую группу входят методы, основанные на прослеживании развития упруго-пластических деформаций в процессе нагрева и выравнивания температур при сварке, в которых используются данные по температурным полям при сварке в сочетании с математическим аппаратом теории термопластичности. В общем случае это достаточно громоздкая задача. Ее реализация даже для сравнительно простых сварных узлов требует использования мощных вычислительных средств [1, 4—7]. Методы первой группы позволяют получить информацию как по остаточным, так и по временным напряжениям и деформациям при сварке.

Вторую группу методов (в основном для определения остаточных напряжений и деформаций) составляют методы, основанные на использовании усадочных явлений, вызванных сваркой отдельных швов [8—18]. Основным преимуществом таких методов является возможность, используя математический аппарат теории упругости (термоупругости при «фиктивной» температуре), находить решение достаточно сложных задач. Недостатком этих методов является невысокая достоверность решения, зависящая от выбора функции усадки. Малоприемлем такой подход и для оценки временных напряжений и деформаций при сварке.

Рассмотрим более подробно основные методы указанных групп.

6.2.1. Методы, основанные на теории термопластичности

В основу этих методов положена информация о температурных полях при сварке изделий. Источником такой информации обычно является расчет, основанный на положениях теории тепловых процессов при сварке [19].

Будем считать, что нестационарное температурное поле при сварке $T(x, y, z, t)$ задано. Температурное возмущение при сварочном нагреве проявляется в виде неравномерных объемных расширений и соответствующих изменений механических и физических свойств материала свариваемых изделий. Объемные эффекты, вызываемые температурными изменениями, принято условно делить на чисто температурные и объемные, обусловленные структурными превращениями. Чисто температурые эффекты — это эффекты, для которых справедливо соотношение

$$d\varphi/dT = \alpha(T), \qquad (6.22)$$

где φ — функция температурных удлинений; α — локальный коэффициент относительного температурного удлинения, зависящий только от абсолютного значения температуры.

Если φ является функцией не только температуры, но и ряда других параметров (времени, скорости и направления изменения температуры и т. п.), то такие объемные эффекты обычно принято связывать с эффектами структурных превращений. Если выражение (6.22) проинтегрировать по T в пределах T_0, T и применить теорему о среднем значении определенного интеграла, то получим

$$\varphi = \bar{\alpha}(T)(T - T_0), \qquad (6.23)$$

где $\bar{\alpha}(T)$ — некоторое среднее значение $\alpha(T)$ на температурном интервале $T_0 - T$. При таком представлении функции φ в определенной степени можно учесть и объемные эффекты структурных превращений, если они достаточно стабильны по температуре, и экспериментальные значения $\bar{\alpha}(T)$, полученные с их учетом. Например, при сварочном нагреве низкоуглеродистой стали основные объемные эффекты от структурных превращений (образование либо распад аустенита) происходят в относительно узком диапазоне температур, поэтому использование выражения (6.23) для точек околошовной зоны с разными термическими циклами не приводит к значительным погрешностям. При сварке закаливающихся сталей структурные превращения в зависимости от термического цикла весьма существенно смещаются по температуре, поэтому неучет таких смещений может дать заметные погрешности при оценке сварочных напряжений и деформаций. Обычно такой учет осуществляется приближенно на основе экспериментальных дилатометрических кривых, соответствующих среднему термическому циклу околошовной зоны либо ее отдельных участков [5]. Таким образом, можно считать, что при сварке известны не только температурные поля $T(x, y, z, t)$, но и поле объемных эффектов $\varphi(x, y, z, t)$. Высокие температуры и значительная неравномерность в распределении функции $\varphi(x, y, z, t)$ приводят обычно к возникновению значительных неупругих деформаций. В этой связи тензор деформации ε_{ij} [1] можно представить в виде суммы

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon^e_{ij} + \varepsilon^p_{ij} + \varepsilon^c_{ij}, \qquad (6.24)$$

где индексы e, p, c определяют составляющие соответственно упругой деформации, деформации мгновенной пластичности и деформации диффузионной пластичности (ползучести).

Условия появления деформаций ε^p_{ij} и ε^c_{ij} для различных материалов относительно несложно получить при простейших напряженных состояниях (одноосное растяжение, сжатие, сдвиг). Для сложного напряженного состояния экспериментальное определение таких условий сопряжено с большими трудностями, поэтому обычно используют теоретические построения, обобщающие результаты испытаний на простое напряженное состояние. В основу таких построений положены следующие общие положения: 1) среднее давление σ создает только упругие объемные изменения, характеризуемые средней деформацией ε; при этом [1]

$$\varepsilon = K\sigma + \varphi, \qquad (6.25)$$

где K — модуль объемного сжатия; σ и ε определены по (6.18), (6.19); 2) тензор упругих деформаций ε^e_{ij} связан с тензором напряжений σ_{ij} законом Гука

$$\varepsilon^e_{ij} = \delta_{ij}\varepsilon + (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)\frac{1}{2G}, \qquad (6.26)$$

где G — модуль сдвига; δ_{ij} — единичный тензор, т. е.

$$\delta_{ij} = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}; \qquad (6.27)$$

3) условия появления или изменения пластических деформаций формируются с помощью инвариантных характеристик

напряженно-деформированного состояния, например с помощью интенсивности напряжений σ_i и интенсивности деформаций ε_i (см. выражения (6.20) и (6.21)), и экспериментальной зависимости, связывающей эти величины. Так, диаграмма на простое растяжение при данной температуре, когда $\sigma_i = |\sigma_{xx}|$, $\varepsilon_i = |\varepsilon_{xx}|$ (x — направление растяжения), определяет условия возникновения и развития пластических деформаций мгновенной пластичности при данной температуре (рис. 6.6).

Задача теории термопластичности состоит в обобщении на трехмерный случай следующих основных особенностей, связанных с упругопластическим деформированием по диаграмме σ_i, ε_i: 1) пластические деформации возникают или изменяются только при $\sigma_i \geqslant \sigma_\tau$; при этом точки $(\sigma_i, \varepsilon_i)$ находятся на линии ABD; 2) состояния, когда точки $(\sigma_i, \varepsilon_i)$ находятся выше линии $OABD$, недопустимы; 3) в случае сложных путей нагружения, при которых состояния активного нагружения чередуются с разгрузкой (кривая $ABabdD$), однозначное соответствие между напряжениями и деформациями отсутствует (например, в точках m и m', k и k') и возникает необходимость учета истории нагружения; 4) изменения температуры, а в некоторых случаях и скорости деформирования, приводят к заметным изменениям диаграммы σ_i, ε_i. Кроме того, в ряде случаев возникает необходимость учитывать и другие особенности, например возникновение деформационной анизотропии, когда деформированное упрочнение имеет направляемый характер. Одним из проявлений деформационной анизотропии является эффект Баушингера [1, 22], роль которого может быть значительной в условиях циклических знакопеременных напряжений с достаточно высокой амплитудой изменения нагрузки.

Здесь нет необходимости подробно останавливаться на различных современных теориях термопластичности [22], решающих указанную задачу. Рассмотрим одну из наиболее простых теорий неизотермического пластического течения, связанную с условием текучести Мизеса для среды, обладающей незначительным деформационным упрочнением. Условие текучести записывается в виде

$$f = \sigma_i^2 - \sigma_\tau^2(T) = 0, \tag{6.28}$$

где σ_i — интенсивность напряжений, определяемая зависимостью (6.20) либо выражением

$$\sigma_i = \sqrt{3/2}\ [(\sigma_{xx} - \sigma)^2 + (\sigma_{yy} - \sigma)^2 + (\sigma_{zz} - \sigma)^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)]^{0,5} = \sqrt{3/2}\ [S_{xx}^2 + S_{yy}^2 + S_{zz}^2 + 6(S_{xy}^2 + S_{xz}^2 + S_{yz}^2)]^{0,5}, \tag{6.29}$$

где S_{ij} $(i, j = x, y, z)$ — компоненты девиатора напряжений,

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma. \tag{6.30}$$

В соответствии с (6.29) σ_i в общем случае является функцией шести компонентов девиатора напряжений, т. е. выражение (6.28) определяет в шестимерном пространстве координат S_{ij} некоторую поверхность текучести. Эта поверхность $f = 0$ выпуклая [1], и все напряженные состояния, определяемые точками S_{ij} внутри этой поверхности ($f < 0$), соответствуют упругому поведению материала. Пластические деформации появляются и развиваются, только когда напряженные состояния соответствуют точкам этой поверхности. Естественно, что состояния вне поверхности текучести ($f > 0$) недопустимы.

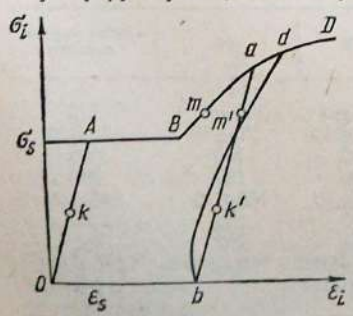
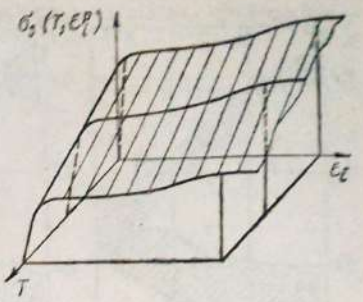


Рис. 6.6. Диаграмма σ_i — ε_i при изотермическом растяжении (сжатии) образцов материала.

Рис. 6.7. Зависимость $\sigma_s(T, \varepsilon_i^p)$ от температуры и интенсивности пластических деформаций.



Ассоциированный закон течения дает следующие зависимости для пластических деформаций ε_{ij}^p:

$$d\varepsilon_{ij}^p, \text{ если } f < 0 \text{ или } f = 0, \text{ но } df < 0;$$
$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda S_{ij}, \text{ если } f = 0 \text{ и } df > 0; \tag{6.31}$$

состояние $f > 0$ недопустимо,

где $d\lambda$ — некоторая положительная скалярная функция. Из (6.28) следует

$$df = 2\sigma_i d\sigma_i - 2\sigma_\tau \frac{\partial \sigma_\tau}{\partial T} dT, \tag{6.32}$$

т. е. при $f = 0$ и незначительном деформационном упрочнении

$$df > 0, \text{ если } d\sigma_i > \frac{\partial \sigma_\tau}{\partial T} dT. \tag{6.33}$$

Следовательно, вместо (6.31) можно записать $d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda S_{ij}$, где

$$d\lambda = 0, \text{ если } \sigma_i < \sigma_\tau \text{ или } \sigma_i = \sigma_\tau, \text{ но } d\sigma_i < \frac{\partial \sigma_\tau}{\partial T} dT;$$
$$d\lambda > 0, \text{ если } \sigma_i = \sigma_\tau \text{ и } d\sigma_i > \frac{\partial \sigma_\tau}{\partial T} dT; \tag{6.34}$$

состояние $\sigma_i > \sigma_\tau(T)$ недопустимо.

Условие текучести (6.34) нетрудно обобщить на несколько более сложный случай изотропного деформационного упрочнения материала, введя в (6.28) вместо $\sigma_\tau(T)$ величину $\sigma_s(T, \varepsilon_i^p)$, определяемую из опытов на простое растяжение (рис. 6.7). Здесь ε_i^p — интенсивность пластических деформаций,

$$\varepsilon_i^p = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{xx}^p - \varepsilon_{yy}^p)^2 + (\varepsilon_{xx}^y - \varepsilon_{zz}^p) + (\varepsilon_{yy}^p - \varepsilon_{zz}^p)^2 + 6(\varepsilon_{xy}^{p^2} + \varepsilon_{xz}^{p^2} + \varepsilon_{yz}^{p^2})}. \tag{6.35}$$

В этом случае $d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda S_{ij}$, где

$$d\lambda = 0, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s \text{ или } \sigma_i = \sigma_s, \text{ но } d\sigma_i < \frac{\partial \sigma_s}{\partial T} dT + \frac{\partial \sigma_s}{\partial \varepsilon_i^p};$$
$$d\lambda > 0, \text{ если } \sigma_i = \sigma_s \text{ и } d\sigma_i > \frac{\partial \sigma_s}{\partial T} dT + \frac{\partial \sigma_s}{\partial \varepsilon_i^p} d\varepsilon_i^p, \tag{6.36}$$

состояние $\sigma_i > \sigma_s(T, \varepsilon_i^p)$ недопустимо.

Необходимость учета деформационного упрочнения при расчете сварочных напряжений и деформаций возникает достаточно редко, поскольку сварочные деформации относи-

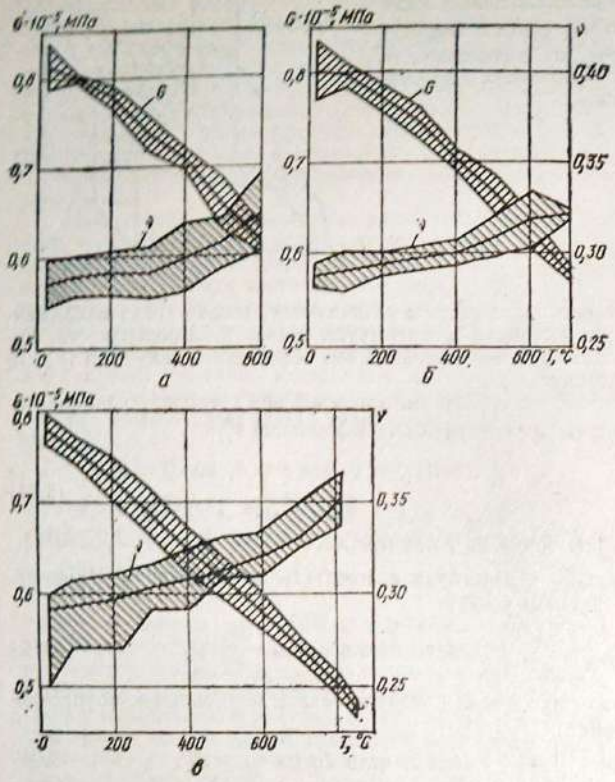


Рис. 6.8. Зависимость упругих характеристик G и ν стальных сплавов от температуры [1]:

а — армко-железо и углеродистые стали (стали 15, 25, 40, Ст5, Ст6, У8, У12); *б* — низко- и среднелегированные стали (12М, 15М1,5; 25Х2МФА, 30ХНМ, 10Х2М, 15Х2М, 10Х2, 5СМ, 12Х3С1М, 30НХ3, 3УХН3М, 33ХН3МА, 38ХН3ВА, 20Н5, 50Г, 10Х5МТ, 10Х5С1, 5М, Х6СМ, 10ХН7СМ); *в* — легированные стали (Х18Н8Б, 6Х18Н9С, Х18Н10Т, 2Х19Н14Б2Г, 1Х25Н20, Х16Н25М6, Х13Н13М2В2Б3К10)

тельно невелики, т. е. величина такого упрочнения соизмерима с погрешностями задания величины $\sigma_т$ (T).

Деформации диффузионной пластичности ε_{ij}^c определяют два хорошо известных в технике процесса: ползучесть и релаксацию напряжений. Расчетному описанию указанных процессов уделяется большое внимание [21]. Как и для мгновенных пластических деформаций, здесь также имеется целый ряд теорий, обобщающих простые эксперименты на случай многоосного напряженного состояния. Широкое распространение получило допущение о пропорциональности девиатора напряжений либо тензору деформаций (деформационная теория), либо тензору скоростей деформаций (теория течения). В соответствии с теорией течения для трехмерного случая можно записать [1]

$$d\varepsilon_{ij}^c = S_{ij}\Phi dT, \qquad (6.37)$$

где Φ — функция ползучести, которую в достаточно общем случае можно представить зависимостью от инвариантов тензоров ε_{ij}^c и S_{ij}, а также от температуры T.

Необходимость учета этих деформаций при расчете сварочных напряжений и деформаций может возникать только при очень высоких предварительных подогревах, а также при определенных вариантах электрошлаковой сварки, отличающихся большой длительностью пребывания околошовной зоны при высоких температурах. В свете изложенного уравнения связи между напряжениями и деформациями можно представить в виде

$$d\varepsilon_{xx} = d\left(\frac{\sigma_{xx}-\sigma}{2G} + K\sigma + \varphi\right) + (\sigma_{xx}-\sigma)\times$$

$$\times (d\lambda + \Phi dT),$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (6.38)$$

$$d\varepsilon_{xy} = d\left(\frac{\sigma_{xy}}{2G}\right) + \sigma_{xy}(d\lambda + \Phi dT),$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$

где $d\lambda$ определяется по (6.34) или (6.36).

Рассматриваемая модель деформирования изделия при сварочном нагреве кроме функции относительных свободных удлинений φ содержит четыре экспериментальные характеристики материала. Это упругие характеристики G и K, предел текучести $\sigma_т$ и функция ползучести Φ. Упругие характеристики G и K либо E — модуль нормальной упругости и ν — коэффициент Пуассона, связанные друг с другом соотношениями $G = E/2(1+\nu)$, $K = (1-2\nu)/E$, для большинства металлов и их сплавов достаточно хорошо изучены в широком диапазоне температур [1], поэтому их выбор в каждом конкретном случае не вызывает особых затруднений. Здесь большую роль играет относительно высокая стабильность этих величин при различных отклонениях химического состава сплава, его структуры, скорости деформирования, степени пластических деформаций и т. п. На рис. 6.8 приведены области разброса величин G и ν для углеродистых, низко- и среднелегированных, а также аустенитных сталей при разных температурах. Из рисунка следует, что для многих сталей разных марок величины G и ν лежат в относительно узких пределах. Предел текучести материала $\sigma_т$ является значительно более чувствительной характеристикой не только к температуре и химическому составу сплава, но и к ряду других факторов. Для идеальных структурно-устойчивых материалов основными параметрами, влияющими на $\sigma_т$, являются температура и скорость деформирования. К таким материалам можно с известной степенью идеализации отнести целый ряд реальных металлических сплавов при определенных условиях деформирования (например, условия, близкие к изотермическим). Для них накоплено достаточно много данных относительно температурной зависимости предела текучести при изотермических испытаниях. Для многих сплавов наблюдается подобие температурных зависимостей предела текучести. На рис. 6.9 приведен ряд типичных примеров для нескольких групп сталей и алюминиевых сплавов. В пределах каждой группы различные марки сплавов имеют заметное различие $\sigma_т$ при комнатной температуре (20° С), тем не менее величины $g_\sigma(T) = \sigma_т(T)/\sigma_т$ (20° С) достаточно близки к одной кривой, что часто используется при выборе зависимости $g_\sigma(T)$ на основе известных результатов для таких сплавов. Влияние скорости деформирования на $\sigma_т$ при обычных способах сварки невелико, особенно при температурах ниже $0{,}5T_{пл}$.

Значительно более сложным является выбор величины $\sigma_т$ для структурно-неустойчивых материалов, когда история охлаждения и деформирования может оказать заметное влияние

Таблица 6.1. **Значения $\sigma_т$, МПа, в зависимости от времени $t_{8,5/5}$ [20]**

Марка стали	$t_{8,5/5}$, с			
	4	20	100	После нормализации
Ст3сп	205±15	165±5	135±5	220
09Г2	260	200±10	170±15	355±20
09Г2С	245	190	190	390
10Г2С	245	190	190	390
10ХСН	240±5	185±10	160±10	340±15
10ХС	260	220	190	—
10ХГНМ	295	295	290	461
10ХГМ	310±20	310±20	290±20	520±30
15ХМФ	290	240	210	269

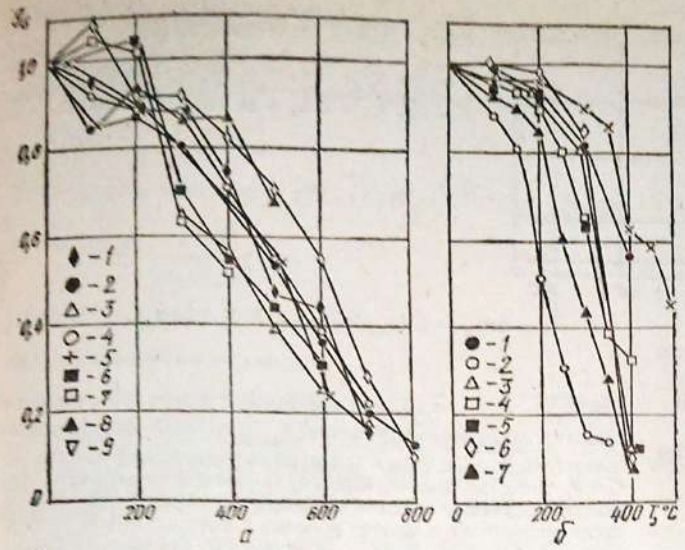
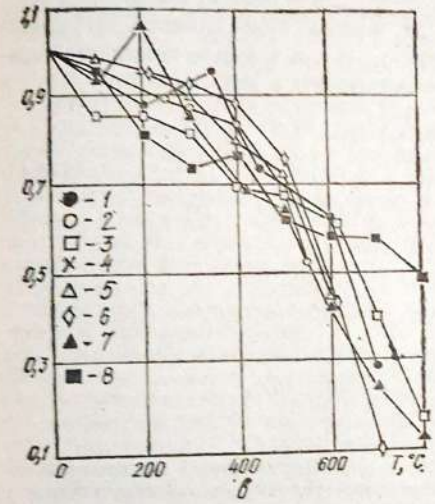


Рис. 6.9. Зависимость относительного предела текучести g_σ (T) от температуры для некоторых сталей и алюминиевых сплавов:

а — низколегированные стали: *1* — техническое железо; *2* — Ст05; *3* — Ст08кп; *4* — сталь 10кп; *5* — сталь 15кп; *6* — сталь 20, *7* — сталь 25; *8* — сталь 30; *9* — сталь 35, *б* — алюминиевые сплавы: *1* — АД1; *2* — АМц; *3* — АМг3, *4* — АМг6; *5* — Д16Т; *6* — АКЧ; *7* — АК6; *8* — В95; *в* — низко- и среднелегированные стали: *1* — 40Х; *2* — 25ХГСА; *3* — 35ХМА; *4* — 1Х3; *5* — 1Х18Н9Т; *6* — 12Х5МА; *7* — 50ХФА.



на структуру сплава и соответственно на величину $\sigma_т$. В табл. 6.1 приведены величины $\sigma_т$ при 20 °С для характерных конструкционных сталей в зависимости от времени $t_{8,5/5}$ длительности охлаждения испытываемого образца в диапазоне температур 850—500° С, а также после нормализации. Из этих данных следует, что низкоуглеродистые и низколегированные конструкционные стали обладают определенной чувствительностью по $\sigma_т$ к скорости охлаждения при сварке. Однако при скоростях охлаждения в диапазоне 850—500° С ниже 15—20 °С/с ($t_{8,5/5} \geq 20$ с) $\sigma_т$ меняется несущественно. Важным фактором является то, что в случае термообработки нормализацией в околошовной зоне происходит достаточно заметное разупрочнение при указанных скоростях охлаждения. При более высоких скоростях охлаждения ($t_{8,5/5} \approx 4$ с) величины $\sigma_т$ могут на 20—30 % превышать таковые при $t_{8,5/5} > > 20$ с. Однако даже в этом случае по сравнению с состоянием после нормализации имеет место заметное разупрочнение.

Функция ползучести Φ (T, σ_i) также является весьма чувствительной характеристикой материала, поэтому наиболее надежными можно считать данные относительно $\Phi(T, \sigma_i)$, полученные на образцах из материала изделия при соответствующем структурном состоянии.

Представление о величинах Φ (T, σ_i) в зависимости от температуры T и интенсивности напряжений σ_i дает рис. 6.10 [1]. Видно, что функция ползучести Φ (T, σ_i) существенно зависит от величин σ_i и T, особенно в зоне высоких температур и при значениях σ_i, близких к $\sigma_т$ (T).

Степень проявления релаксационных процессов при значениях $\sigma_i \leqslant \sigma_т$ (T) характеризуют кривые, приведенные на рис. 6.11 и полученные с помощью данных рис. 6.10 для слу

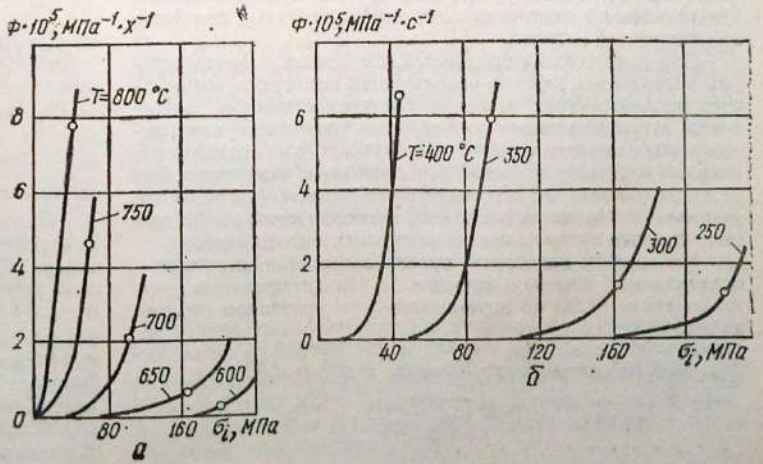


Рис. 6.10. Кривые ползучести Φ (σ_i, T) для стали 35 (*а*) и алюминиевого сплава Д16АТ (*б*); значки — значения $\sigma_i = \sigma_т$ (T).

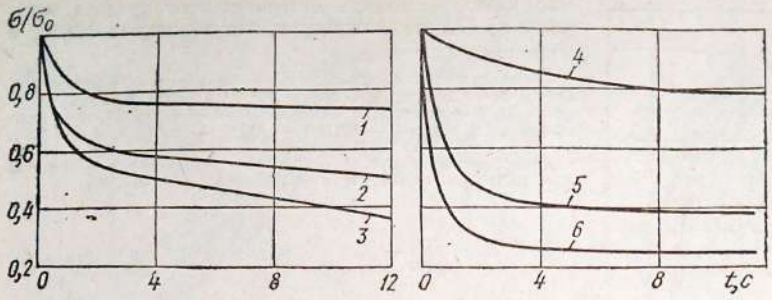


Рис. 6.11. Кривые релаксации алюминиевого сплава Д16АТ (*а*) и стали 35 (*б*):
1 — $\sigma_0 = 160$ МПа, $T = 300$ °С; *2* — $\sigma_0 = 100$ МПа, $T = 350$ °С; *3* — $\sigma_0 = 45$ МПа, $T = 400$ °С; *4* — $\sigma_0 = 200$ МПа, $T = 600$ °С; *5* — $\sigma_0 = 100$ МПа, $T = 700$ °С; *6* — $\sigma_0 = 60$ МПа, $T = 750$ °С.

чая одномерного напряженного состояния при условии, что

$$\frac{d\varepsilon^e_{xx}}{dt} + \frac{d\varepsilon^c_{xx}}{dt} = 0, \text{ т. е. } \frac{d}{dt}\left(\frac{\sigma_{xx}}{E}\right) + \frac{2}{3}\Phi\sigma_{xx} = 0; \tag{6.39}$$

отсюда время релаксации

$$t = \frac{3}{2}\int_{\sigma_{xx}}^{\sigma^0_{xx}} \frac{d\,(\sigma_{xx}/E)}{\Phi\,(\sigma_i,\ T)\,\sigma_{xx}}, \tag{6.40}$$

где σ^0_{xx} — напряжение при $t = 0$. Данные на рис. 6.11 соответствуют случаю, когда $\sigma^0_{xx} = \sigma_т\ (T)$. Из кривых релаксации следует, что за время, равное нескольким секундам, и при интенсивности напряжений около $\sigma_т\ (T)$ заметное проявление релаксационных процессов имеет место главным образом при температурах выше $0{,}5T_{пл}$, при которых напряжения невелики. Очевидно, что при более низких напряжениях еще более незначительными будут релаксационные процессы в зоне температур ниже $0{,}5T_{пл}$. Эти данные подтверждают положение, что необходимость учета деформаций ползучести при расчетах сварочных напряжений и деформаций возникает только при очень длительных пребываниях зоны шва в области достаточно высоких температур.

Если к уравнениям (6.38) присоединить уравнения равновесия (6.14) и геометрии деформации (6.17), а также задать условия на границе в виде (6.15) либо через перемещения u_i, то получим полную математическую формулировку задачи определения сварочных напряжений и деформаций в процессе сварочного нагрева данного конкретного изделия. Реализация этой задачи связана с преодолением ряда математических трудностей. Условно эти трудности можно разделить на следующие три типа: 1) обусловленные нестационарностью процесса и необходимостью учитывать историю нагружения; 2) связанные с физической нелинейностью, содержащейся в условиях текучести и функции ползучести; 3) обусловленные представленной многомерностью деформационных процессов при сварочном нагреве.

Для преодоления трудностей, связанных с учетом истории нагружения, обычно используется метод последовательного прослеживания развития упругопластических деформаций, когда на каждом последующем шаге (этапе) нагружения решение находится с учетом полученного на предыдущем, начиная с заданного исходного состояния. Для этого весь рассматриваемый период сварочного нагрева (нагружения) разбивается на отдельные этапы, величина которых выбирается опытным путем на основе численных экспериментов.

Рассмотрим некоторый произвольный этап нагружения, определяемый отрезком времени Δt. Проинтегрировав уравнения связи (6.38) по переменной t' на указанном отрезке, получим

$$\Delta\varepsilon_{xx} = \Delta\,[(\sigma_{xx} - \sigma)/2G + K\sigma + \varphi] + (\Delta\lambda + \Delta\Phi) \times \overline{(\sigma_{xx} - \sigma)},$$

$$\Delta\varepsilon_{xy} = \Delta\,(\sigma_{xy}/2G) + (\Delta\lambda + \Delta\Phi)\,\sigma_{xy}, \tag{6.41}$$

. . . . . .

где $\overline{(\sigma_{xx} - \sigma)}, \ldots, \overline{\sigma}_{xy}, \ldots$ — некоторые средние значения компонентов девиатора напряжений S_{ij} на отрезке Δt, вычисленные по теореме о среднем значении определенного интеграла. С погрешностью аппроксимации, зависящей от величины Δt, можно указанные средние значения заменить соответствующими величинами в момент времени t, которые будем обозначать как $(\sigma_{xx} - \sigma), \ldots, \sigma_{xy}, \ldots$ в отличие от аналогичных величин в момент $t - \Delta t$, которые будем отмечать звездочкой, например $(\sigma_{xx} - \sigma)^*$, σ^*_{xy} и т. д. С учетом сказанного выражение (6.41) можно представить в виде

$$\Delta\varepsilon_{xx} = \psi\,(\sigma_{xx} - \sigma) + K\sigma - b_{xx},$$

. . . . . .

$$\Delta\varepsilon_{xy} = \psi\sigma_{xy} - b_{xy}, \tag{6.42}$$

. . . . . .

где

$$b_{xx} = (\sigma_{xx} - \sigma/2G)^* + (K\sigma)^* - \Delta\varphi,$$

. . . . . .

$$b_{xy} = (\sigma_{xy}/2G)^*, \tag{6.43}$$

. . . . . .

$\varphi = 1/2G + \Delta\lambda + \Delta\Phi$ и для напряженного состояния в момент времени t определяется условием текучести, которое с учетом выражения (6.36) можно представить следующим образом:

$$\psi = 1/2G + \Delta\Phi, \text{ если } \sigma_i < \sigma_s \text{ или } \sigma_i = \sigma_s,$$

$$\text{но } \Delta\sigma_i < \frac{\partial\sigma_т}{\partial T}\Delta T + \frac{\partial\sigma_s}{\partial\varepsilon^p_i}\Delta\varepsilon^p_i; \tag{6.44}$$

$$\psi > 1/2G + \Delta\Phi, \text{ если } \sigma_i = \sigma_т \text{ и } \Delta\sigma_i > \frac{\partial\sigma_т}{\partial T}\Delta T + \frac{\partial\sigma_s}{\partial\varepsilon^p_i}\Delta\varepsilon^p_i,$$

состояние $\sigma_i > \sigma_s\,(T, \varepsilon^p_i)$ недопустимо.

Соотношения (6.42) позволяют формально на каждом шаге прослеживания исключить время t из числа независимых переменных задачи, т. е. на каждом шаге решать стационарную задачу с заданными дополнительными деформациями $b_{xx}, \ldots, b_{xy}, \ldots$ по (6.43) и физической нелинейностью, определяемой (6.44). Для реализации физической нелинейности в (6.44) наиболее приемлем метод последовательного уточнения. Этот метод позволяет нелинейную задачу заменить совокупностью последовательно решаемых линейных задач, построив соответствующий итерационный процесс уточнения функций ψ на основе условий (6.44).

Заслуживает внимания следующий итерационный процесс по ψ:

$$\left.\begin{aligned}
&\psi^{(n+1)} = \psi^{(n)} p + (1-p)\left[\frac{1}{2G} + \Phi(\sigma_i^{(n)}, T)\,\Delta t\right],\\
&\text{если } \sigma_i^{(n)} - \sigma_s(T, \varepsilon_i^{p(n)}) < -m;\\
&\psi^{(n+1)} = \psi^{(n)}, \text{ если } -m < \sigma_i^{(n)} - \sigma_s(T, \varepsilon_i^{p(n)}) < m;\\
&\psi^{(n+1)} = \psi^{(n)} \frac{\sigma_i^{(n)}}{\sigma_s(T, \varepsilon_i^{p(n)})},\\
&\text{если } \sigma_i^{(n)} - \sigma_s(T, \varepsilon_i^{p(n)}) > m,
\end{aligned}\right\} \quad (6.45)$$

который заканчивается, когда

$$|\psi^{(n+1)}/\psi^{(n)} - 1| < \delta. \quad (6.46)$$

Здесь (n) и $(n+1)$ — номера итераций; $0 \leqslant p < 1$, $m \ll \sigma_s(T, \varepsilon_i^{p(n)})$ и $\delta \ll 1$ — параметры итерационного процесса, определяющие его сходимость и точность получаемых результатов [1].

Изложенный путь сведения задачи термопластичности к совокупности последовательно решаемых на каждом шаге прослеживания линейных задач типа задач теории упругости, но с переменными параметрами упругости (переменным модулем сдвига, равным $1/2\psi$) и дополнительными деформациями тензорного типа b_{ij}, определяемыми выражениями (6.42), не является единственным. Например, в работах [21, 22] используется несколько иной подход к линеаризации задач такого типа. В этих работах уравнения связи типа (6.42) построены относительно приращений деформаций и напряжений таким образом, чтобы вся нелинейность содержалась в дополнительных деформациях, уточняемых итерационным путем. При этом упрощается решение краевой задачи с постоянными параметрами упругости, но ухудшается сходимость итерационного процесса при развитых пластических деформациях. Следует отметить, что самым сложным в данном алгоритме является решение линеаризированной задачи, учитывая в общем случае пространственную многомерность сварочного нагрева. Однако здесь в значительной степени могут быть использованы современные разработки в решении задач теории упругости и строительной механики, основанные на широком использовании численных методов.

Общий подход к решению линеаризированной задачи. Выпишем основные соотношения, определяющие на каждом шаге прослеживания итераций по ψ краевую задачу по типу упругой, но с переменными параметрами упругости и дополнительными деформациями. При этом воспользуемся приемом сокращенной записи в тензорной форме.

1. Уравнения равновесия запишем в виде

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (i, j = x, y, z), \quad (6.47)$$

где запятая в индексе означает операцию ковариантного дифференцирования по следующему за запятой индексу. К уравнению (6.47) следует присоединить также условия статики на той части поверхности рассматриваемого тела S_P, где заданы внешние усилия P проекциями P_i $(i = x, y, z)$, т. е. уравнения (6.15). В сокращенной форме уравнения (6.15) имеют вид

$$\sigma_{ij} n_i = P_i \text{ на } S_P, \quad (6.48)$$

где n_i — единичный вектор нормали к поверхности S_P.

2. Геометрические соотношения между деформациями и перемещениями (6.17) в приращениях представим в виде

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\Delta u_{i,j} + \Delta u_{j,i}) \quad (i, j = x, y, z), \quad (6.49)$$

где Δu_i — компоненты вектора приращений перемещения. Деформации $\Delta\varepsilon_{ij}$ связаны друг с другом уравнениями неразрывности (совместности), которые сокращенно можно записать следующим образом [1]:

$$\gamma_{pni}\gamma_{ljm}\Delta\varepsilon_{ij,mn} = 0 \quad (p, n, i, l, j, m = x, y, z), \quad (6.50)$$

где γ_{pni}, γ_{ljm} — альтернативные тензоры [1]; для простоты принято, что тело односвязное.

Приращения Δu_i должны удовлетворять краевым условиям на части поверхности S_u рассматриваемого тела, где задан компонент вектора перемещений на S_u

$$\Delta u_i = \Delta u_i^0. \quad (6.51)$$

3. Уравнения связи (6.42) сокращенно можно представить в виде

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \psi\sigma_{ij} + \delta_{ij}(K - \psi)\sigma - b_{ij}, \quad (6.52)$$

где $b_{ij} = (\sigma_{ij}/2G)^* + \delta_{ij}\left[\left(K - \frac{1}{2G}\right)\sigma - \Delta\varphi\right]$ $(i, j = x, y, z)$;

δ_{ij} — единичный тензор, или символ Кронекера, $\delta_{ij} = 0$, если $i \neq j$, и $\delta_{ij} = 1$, если $i = j$.

Уравнения (6.52) можно разрешить относительно напряжений:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\psi}\left(\Delta\varepsilon_{ij} + \delta_{ij}\frac{\psi - K}{K}\Delta\varepsilon\right) + Y_{ij}. \quad (6.53)$$

Здесь $Y_{ij} = \frac{1}{\psi}\left(\frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G}\right)^* + \delta_{ij}\left(\frac{(K\sigma)^* - \Delta\varphi}{K}\right)$.

Соотношения (6.47) — (6.53) полностью определяют краевую задачу, которую нужно решать на данном шаге прослеживания и данной итерации по ψ. Это так называемая дифференциальная (локальная) формулировка рассматриваемой задачи. Очень важно, особенно для численных методов решения (методов конечных элементов, вариационно-разностных методов и т. д.), иметь и эквивалентные вариационные формулировки. Они находят широкое применение в механике сплошных сред в виде так называемых принципов. Наиболее известными вариационными принципами являются принцип Лагранжа и принцип Кастилиано. В теории упругости они определяют экстремальные свойства перемещений и напряжений, отвечающих заданным внешним силам и перемещениям.

Для рассматриваемой задачи (6.47) — (6.53) можно сформулировать вариационные принципы Лагранжа и Кастилиано следующим образом [1].

Принцип Лагранжа. Абсолютный минимум выражения

$$\Theta_1 = -\frac{1}{2}\int_V (\sigma_{ij} + Y_{ij})\Delta\varepsilon_{ij}dV + \int_{S_P} P_i\Delta u_i dS_P, \quad (6.54)$$

определенного для всех возможных приращений перемещений Δu_i в области V и на поверхности S_P, удовлетворяющих условиям (6.49) — (6.51), отвечает при заданных ψ и b_{ij} действительному распределению вектора Δu_i, который является решением краевой задачи (6.47) — (6.53), т. е. рассматриваемый вариационный принцип эквивалентен уравнениям статики (6.47), (6.48) в краевой задаче (6.47) — (6.53).

Принцип Кастилиано. Абсолютный минимум выражения

$$\Theta_2 = \frac{1}{2}\int_V (\Delta\varepsilon_{ij} - b_{ij})\sigma_{ij}dV - \int_{S_n} \Delta u_i P_i dS_n, \quad (6.55)$$

определенного для всех статически возможных распределений напряжений, отвечает при заданных ψ и b_{ij} действительному распределению напряжений σ_{ij}, являющемуся решением краевой задачи (6.47) — (6.53), т. е. рассматриваемый вариационный принцип эквивалентен уравнениям (6.49) — (6.51) в краевой задаче (6.47) — (6.53).

Естественно, что описанный подход исследования сварочных напряжений и деформаций методами теории термопластичности является не единственным. Возможны определенные упрощения и обобщения. Значительные упрощения имеют место в случае одноосного напряженного состояния, которое приближенно реализуется в сварных конструкциях балочного типа при сварке поясных швов. В этом случае применение балочных гипотез (одноосное напряженное состояние, плоские сечения) существенно упрощает задачу [1]. В работе Г. А. Николаева и Н. О. Окерблома [6] еще в 30-е годы предложено на основе такого подхода решение для сварки узких полос быстро движущимся источником тепла. В этом случае использовался графоаналитический метод нахождения решения на каждом шаге прослеживания. Обычно при этом кроме начального состояния рассматриваются только два шага. Первый соответствует моменту наибольшей по ширине полосы проникновения температуры T_*, при которой можно считать, что $\sigma_т(T_*) \approx 0$ (для стали $T_* \approx 600$ °С). Второй шаг соответствует моменту полного выравнивания температур. Конечно, при этом точность решения невысока, однако качественная картина распределения продольных сварочных напряжений и деформаций в полосе достаточно реальная. В работе Н. О. Окерблома [10], а затем в работах Н. М. Гатовского графоаналитический метод использовался также и при более детальном прослеживании развития сварочных напряжений и деформаций, т. е. для получения информации о временных напряжениях и деформациях в свариваемых полосах. Наглядность и простота графоаналитического метода определения продольных сварочных напряжений и деформаций при сварке полос обусловили его популярность, особенно в учебных целях (метод вошел во многие учебные пособия, изданные в различных странах).

С появлением мощной вычислительной техники резко увеличился объем использования методов теории термопластичности для исследования сварочных напряжений и деформаций [1, 4 и др.]. Наряду с задачами на одноосное напряженное состояние рассматриваются задачи для плоского напряженного состояния применительно к пластинам и отдельным случаям сварки тонкостенных оболочек, а также для трехосного напряженного состояния, но в рамках гипотезы плоской деформации [1, 5]. Тем не менее трудоемкость таких решений достаточно велика, поэтому для сложных сварных узлов и конструкций пока еще нереально применение подходов, основанных на методах теории термопластичности.

В определенной степени для относительно сложных конструкций и узлов более перспективны методы второй группы, не требующие кропотливой процедуры прослеживания развития упруго-пластических деформаций.

6.2.2. Расчетные методы, основанные на заданной усадке от каждого сварного шва

Одной из первых работ, где используется метод расчета остаточных сварочных напряжений и деформаций на основе функции усадки, является работа Е. О. Патона с сотрудниками [9], опубликованная в 1936 г. В ней проведено комплексное исследование сварочных остаточных напряжений в цилиндрических сосудах от кольцевых и продольных швов, а также в случае приварки днища, вварки патрубков и т. д. Эта работа и в настоящее время не потеряла своего научного и практического интереса. Предложенная в ней идея расчетной оценки методами теории упругости остаточных напряжений по заданной величине усадочных продольных деформаций, определяемых из простых опытов, находит применение в целом ряде последующих и даже современных работ.

Естественно, что различные исследователи по-разному подходят к описанию усадочных явлений, вызванных сваркой, при расчетах остаточных сварочных напряжений и деформаций. Соответственно и названия их методик достаточно разные: метод так называемой фиктивной усадочной силы (И. П. Трочун [11], В. А. Винокуров [3, 6] и др.), метод фиктивных температур (В. С. Игнатьева [12]), метод условных дислокаций (К. Мацубуши [8], В. М. Прохоренко [13]), метод условных пластических деформаций (Я. С. Подстригач с сотрудниками [14], А. Я. Недосека [15]), метод заданных зон равномерной усадки (Т. Б. Талыпов [16]), метод заданных объемов укорочения при сварке (Н. О. Окерблом [10], С. А. Кузьминов [17], И. П. Байкова [18] и др.) и т. д. Остановимся на некоторых из перечисленных методов.

Метод фиктивной усадочной силы. Рассмотрим длинную пластину — полосу со сварным швом посередине (рис. 6.12). В этом случае $l \gg B$. На длине l можно замерить укорочение пластины $\Delta_{пр}$, вызванное сваркой. При этом для фиктивной усадочной силы получим зависимость

$$P_{ус} = E \frac{\Delta_{пр}}{l} 2BS, \tag{6.56}$$

где S — толщина пластины; E — модуль упругости.

Используя численные данные о $P_{ус}$, полученные в указанном опыте, можно приближенно определить остаточное напряженное состояние, если задать закон распределения остаточных напряжений в активной зоне (в зоне указанных процессов при сварке). Например, если принять, что эти напряжения в активной зоне распределены равномерно по толщине пластины и по ширине зоны $-b < y < b$, то получим следующую эпюру остаточных напряжений (рис. 6.12, *б*). В активной зоне $-b < y < b$ фиктивная усадочная сила дает активные напряжения $\sigma_{xx} = P_{ус}/2bS$. В периферийной зоне $|y| > b$ из условий равновесия $\sigma_{xx} = -P_{ус}/2(B-b)S$. Если теперь на том же режиме нужно нанести сварной шов не посередине полосы, а со смещением на величину y_0 (рис. 6.13, *а*), то при допущении, что усадочная сила не меняется, можно определить не только укорочение $\Delta_{пр}$, но и кривизну c полосы, а также новое распределение остаточных напряжений.

Полагая, что усадочная сила действует по линии $y = y_0$, получаем

$$\Delta_{пр} = P_{ус} l/2EBS; \quad c = -3P_{ус}y_0/2ESB^3. \tag{6.57}$$

На длине l стрелка прогиба $f = cl^2/8$.

При распределении остаточных напряжений также следует задать закон распределения напряжений в активной зоне. Если сохранить предыдущее допущение о равномерном распределении, получим $y_0 - b < y < y_0 + b$, $\sigma_{xx} = P_{ус}/2bS$.

В периферийной зоне $-B < y < y_0 - b$ распределение напряжений определяется линейным законом, т. е.

$$\sigma_{xx} = E(\varepsilon^- + cy), \tag{6.58}$$

аналогично в зоне $y_0 + b < y < B$

$$\sigma_{xx} = E(\varepsilon^+ + cy), \tag{6.59}$$

где ε^- и ε^+ определяются из условий равновесия

$$\begin{gathered}\int_{-B}^{y_0-b}(\varepsilon^- + cy)\,dy + \int_{y_0+b}^{B}(\varepsilon^+ + cy)\,dy = \frac{P_{ус}}{ES};\\ \int_{-B}^{y_0-b}(\varepsilon^- + cy)\,ydy + \int_{y_0+b}^{B}(\varepsilon^+ + cy)\,ydy = \frac{P_{ус}y_0}{ES}.\end{gathered} \tag{6.60}$$

Из (6.58), (6.59) получим систему

$$\varepsilon^-(B + y_0 - b) + \varepsilon^+(B - y_0 - b) = \frac{P_{ус}}{ES} \times$$

$$\times\left(1 - 3\frac{y_0^2 b}{B^3}\right);$$

$$\varepsilon^-[(y_0 - b)^2 - B^2] + \varepsilon^+[B^2 - (y_0 + b)^2] =$$

$$= \frac{P_{ус}y_0}{2ES}\left[3 - \frac{2b(b^2 - 3y_0^2)}{B^3}\right],$$

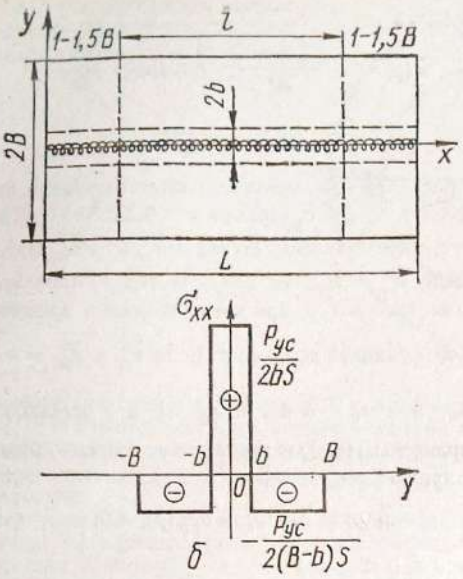


Рис. 6.12. Схемы полосы со сварным швом по оси полосы (*а*) и распределения продольных остаточных напряжений σ_{xx} (*б*).

решение которой дает значения ε^- и ε^+. В итоге получим расчетное распределение остаточных напряжений, как показано на рис. 6.13, *б*. Размеры активной зоны $2b$ можно в какой-то степени уточнять из условия, что $P_{ус}/2BS \leqslant \sigma_т$.

Однако в общем случае размер $2b$ и распределение напряжений в активной зоне являются достаточно неоднозначными в методе фиктивной усадочной силы, что требует определенной осторожности в его применении. Кроме того метод фиктивной усадочной силы затруднительно применять, когда напряженное состояние явно не одноосное, как, например, на рис. 6.14.

Метод условных пластических деформаций. Рассмотрим сущность метода на достаточно простом примере. На рис. 6.14 приведена схема вварки круглого элемента диаметром $2r_0$ в достаточно больших размеров пластину. Если свариваемые элементы достаточно тонкостенные, то остаточные напряжения достаточно хорошо соответствуют плоскому напряженному состоянию. Если принять еще условие осевой симметрии, то главными направлениями здесь будут радиальное и окружное. Соответственно тензор напряжений будет иметь две отличные от нуля компоненты σ_{rr} и $\sigma_{\beta\beta}$, а тензор деформаций — две независимые компоненты ε_{rr} и $\varepsilon_{\beta\beta}$.

Уравнение равновесия

$$\sigma_{\beta\beta} = \frac{\partial}{\partial r}(r\sigma_{rr}). \tag{6.61}$$

Геометрические соотношения

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u}{\partial r}; \quad \varepsilon_{\beta\beta} = \frac{u}{r}; \quad \varepsilon_{rr} = \frac{\partial}{\partial r}(r\varepsilon_{\beta\beta}), \tag{6.62}$$

$u = u(r)$ — радиальные перемещения.

В соответствии с методом условных пластических деформаций

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E}(\sigma_{rr} - \nu\sigma_{\beta\beta}) + \bar{\varepsilon}^p_{rr}; \quad \varepsilon_{\beta\beta} = \frac{1}{E}(\sigma_{\beta\beta} - \nu\sigma_{rr}) + \bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta}, \tag{6.63}$$

где $\bar{\varepsilon}^p_{rr}$ и $\bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta}$ — некоторые условные пластические деформации, обеспечивающие хорошее согласование расчета величин $\sigma_{rr}(r)$, $\sigma_{\beta\beta}(r)$, $u(r)$ с опытом. Из (6.63) с учетом (6.62) следует

$$\sigma_{rr} = \frac{E}{1-\nu^2}\left[\frac{\partial u}{\partial r} + \nu\frac{u}{r} - (\bar{\varepsilon}^p_{rr} + \nu\bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta})\right];$$

$$\sigma_{\beta\beta} = \frac{E}{1-\nu^2}\left[\frac{u}{r} + \nu\frac{\partial u}{\partial r} - (\bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta} + \nu\bar{\varepsilon}^p_{rr})\right]. \tag{6.64}$$

Подставив (6.64) в уравнение (6.61), получим разрешающее уравнение относительно перемещений $u(r)$

$$\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(ru)\right] = \frac{\partial}{\partial r}(\bar{\varepsilon}^p_{rr} + \bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta}\nu) + \frac{1-\nu}{r}(\bar{\varepsilon}^p_{rr} - \bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta}), \tag{6.65}$$

которое следует решать при условиях

$$r = 0, \; u = 0; \tag{6.66}$$

$r = r_0$, u — ограниченная величина.

Из (6.65) с учетом (6.66) и условия, что $\bar{\varepsilon}^p_{rr}$ и $\bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta}$ — ограниченные функции от r, стремящиеся к нулю при $r \to \infty$, следует

$$\left.\begin{aligned}
u(r) &= \frac{1+\nu}{2r}\int_0^r(\bar{\varepsilon}^p_{rr} + \bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta})\,r\,dr + \\
&+ \frac{r(1-\nu)}{2}\int_r^\infty\frac{\bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta} - \bar{\varepsilon}^p_{rr}}{r}\,dr; \\
\sigma_{rr} &= \frac{E}{2}\left[\int_r^\infty\frac{\bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta} - \bar{\varepsilon}^p_{rr}}{r}\,dr - \right. \\
&\left. - \frac{1}{r^2}\int_0^r(\bar{\varepsilon}^p_{rr} + \bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta})\,r\,dr\right]; \\
\sigma_{\beta\beta} &= \frac{E}{2}\left[\int_r^\infty\frac{\bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta} - \bar{\varepsilon}^p_{rr}}{r}\,dr + \right. \\
&\left. + \frac{1}{r^2}\int_0^r(\bar{\varepsilon}^p_{rr} + \bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta})\,r\,dr - 2\bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta}\right].
\end{aligned}\right\} \tag{6.67}$$

Таким образом, если известны функции $\bar{\varepsilon}^p_{rr}$ и $\bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta}$, то из (6.67) получим данные относительно перемещений $u(r)$ и остаточных напряжений $\sigma_{rr}(r)$ и $\sigma_{\beta\beta}(r)$. Обычно используют различные приближенные представления для величины условных пластических деформаций. В частности, возможно следующее приближение:

$$\bar{\varepsilon}^p_{rr} = -\frac{\Delta_{поп}}{2b}; \quad |\bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta}| \ll \bar{\varepsilon}^p_{rr} \quad (r_0 - b < r < r_0 + b), \tag{6.68}$$

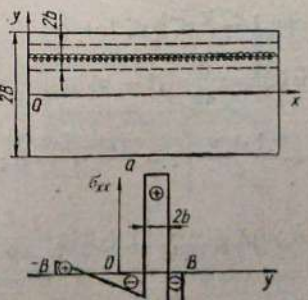


Рис. 6.13. Схема полосы со сварным швом, смещенным от оси, (*а*) и распределение остаточных напряжений σ_{xx} (*б*).

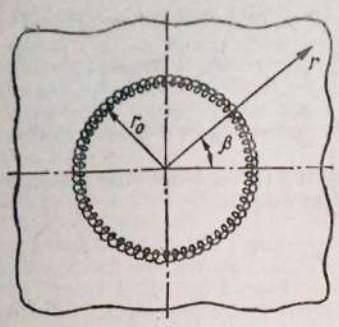


Рис. 6.14. Схема вварки круглого элемента в тонкую пластину.

в остальной части пластины $\bar{\varepsilon}^p_{rr} = \bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta} = 0$. Соответственно, подставив (6.68) в (6.67), получим: при $0 \leqslant r \leqslant r_0 - b$

$$u(r) = \frac{\Delta_{\text{поп}}}{4b}(1-\nu)\, r \ln\frac{r_0+b}{r_0-b}; \qquad (6.69а)$$

$$\sigma_{rr}(r) = \frac{E\Delta_{\text{поп}}}{4b}\ln\frac{r_0+b}{r_0-b};\ \sigma_{\beta\beta}(r) = \sigma_{rr}(r);$$

при $r_0 - b \leqslant r \leqslant r_0 + b$

$$\left.\begin{aligned} u(r) &= \frac{\Delta_{\text{поп}} r}{4b}\left[(1-\nu)\ln\frac{r_0-b}{r} - \frac{1+\nu}{2}\times\right.\\ &\left.\times\frac{r^2-(r_0-b)^2}{r^2}\right];\\ \sigma_{rr}(r) &= \frac{E\Delta_{\text{поп}}}{8b}\left[1+2\ln\frac{r_0+b}{r} - \frac{(r_0-b)^2}{b^2}\right];\\ \sigma_{\beta\beta}(r) &= \frac{E\Delta_{\text{поп}}}{8b}\left[-1+2\ln\frac{r_0+b}{r} + \frac{(r_0-b)^2}{b^2}\right]; \end{aligned}\right\} \qquad (6.69б)$$

при $r \gg r_0 + b$

$$u(r) = \frac{-\Delta_{\text{поп}}(1+\nu)}{2}\frac{r_0}{r}; \qquad (6.69в)$$

$$\sigma_{rr}(r) = \frac{E\Delta_{\text{поп}} r_0}{2r^2};\quad \sigma_{\beta\beta}(r) = -\frac{E\Delta_{\text{поп}} r_0}{2r^2}.$$

Введем безразмерные характеристики

$$\rho = r/r_0;\quad \bar{b} = b/r_0;\quad \bar{u} = \frac{u}{\Delta_{\text{поп}}}; \qquad (6.70)$$

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_{rr} r_0}{E\Delta_{\text{поп}}};\quad \bar{\sigma}_{\beta\beta} = \frac{\sigma_{\beta\beta} r_0}{E\Delta_{\text{поп}}}.$$

Получим: при $0 \leqslant \rho \leqslant 1 - \bar{b}$

$$\bar{u}(\rho) = \frac{\rho}{4\bar{b}}(1-\nu)\ln\frac{1+b}{1-b}; \qquad (6.71а)$$

$$\sigma_{rr}(\rho) = \frac{1}{4\bar{b}}\ln\frac{1+b}{1-b} = \sigma_{\beta\beta}(\rho);$$

при $1 - \bar{b} \leqslant \rho \leqslant 1 + \bar{b}$

$$\left.\begin{aligned} \bar{u}(\rho) &= \frac{\rho}{4\bar{b}}\left\{(1-\nu)\ln\frac{1+\bar{b}}{\rho} -\right.\\ &\left.-\frac{1+\nu}{2}\left[1-\frac{(1-\bar{b})^2}{\rho^2}\right]\right\};\\ \bar{\sigma}_{rr}(\rho) &= \frac{1}{8\bar{b}}\left[1+2\ln\frac{1+\bar{b}}{\rho} - \frac{(1-\bar{b})^2}{\rho^2}\right];\\ \bar{\sigma}_{\beta\beta}(\rho) &= \frac{1}{8\bar{b}}\left[-1+2\ln\frac{1+\bar{b}}{\rho} + \frac{(1-\bar{b})^2}{\rho^2}\right]; \end{aligned}\right\} \qquad (6.71б)$$

при $\rho > 1 + b$

$$\bar{u}(\rho) = -\frac{1+\nu}{2\rho};\quad \bar{\sigma}_{rr}(\rho) = \frac{1}{2\rho^2};$$

$$\bar{\sigma}_{\beta\beta}(\rho) = -\frac{1}{2\rho^2}. \qquad (6.71в)$$

На рис. 6.15 приведены результаты расчетов по (6.71) величин $\bar{u}(\rho)$, $\bar{\sigma}_{rr}(\rho)$, $\bar{\sigma}_{\beta\beta}(\rho)$ при $\nu = 0{,}3$ и $\bar{b} = 0{,}1$. Возможны и другие представления функций $\bar{\varepsilon}^p_{rr}(r)$ и $\bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta}(r)$. В частности, если $\bar{\varepsilon}^p_{rr} = \bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta}$, то получим так называемый метод фиктивных температур, при котором усадка представляется скалярной функцией координат. Если $\bar{\varepsilon}^p_{rr} = \bar{\varepsilon}^p_{\beta\beta} = -\frac{\bar{\Delta}_{\text{поп}}}{2b}$, $\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{2}$, при $r_0 - b < r < r_0 + b$, а в остальной части равны нулю, то из (6.67) следует при указанных выше обозначениях: при $0 \leqslant \rho \leqslant 1 - \bar{b}$

$$\bar{u}(\rho) = \bar{\sigma}_{rr}(\rho) = \bar{\sigma}_{\beta\beta}(\rho) = 0; \qquad (6.72а)$$

при $1 - \bar{b} < \rho < 1 + \bar{b}$

$$\bar{u}(\rho) = -\frac{\rho}{8\bar{b}}(1+\nu)\left(1-\frac{(1-\bar{b})^2}{\rho^2}\right);$$

$$\bar{\sigma}_{rr}(\rho) = \frac{1}{8\bar{b}}\left(1-\frac{(1-\bar{b})^2}{\rho^2}\right),$$

$$\bar{\sigma}_{\beta\beta}(\rho) = \frac{1}{8\bar{b}}\left(1+\frac{(1-\bar{b})^2}{\rho^2}\right); \qquad (6.72б)$$

при $\rho > 1 + \bar{b}$

$$\bar{u}(\rho) = -\frac{1+\nu}{2\rho},\quad \bar{\sigma}_{rr}(\rho) = \frac{1}{2\rho^2} = -\bar{\sigma}_{\beta\beta}(\rho). \qquad (6.72в)$$

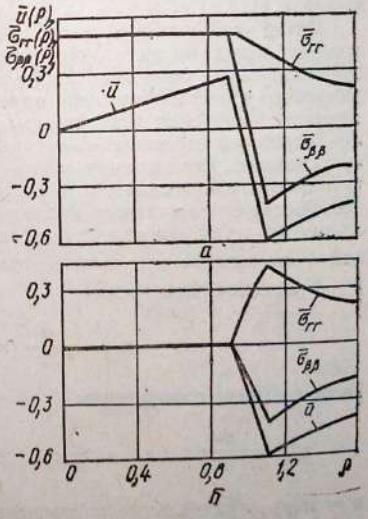


Рис. 6.15. Результаты расчета относительных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{rr}$ и $\bar{\sigma}_{\beta\beta}$ по (6.71) (*а*) и по (6.72) (*б*).

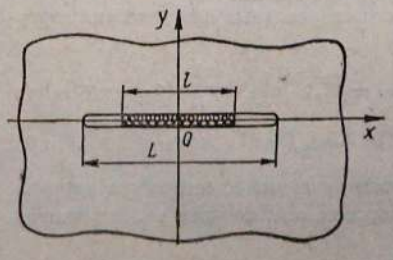
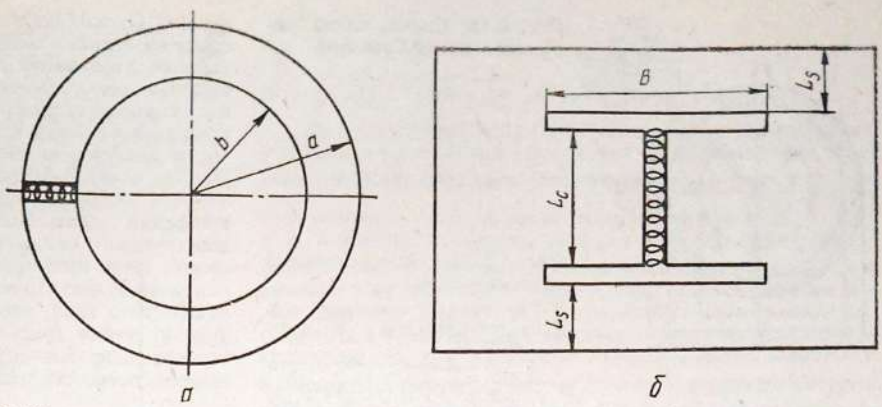


Рис. 6.16. Неограниченная пластина со стыковым швом длиной L.



а *б*

Рис. 6.17. Технологические пробы с регламентированной жесткостью: *а* — кольцевой образец; *б* — Н-образец

Сопоставление зависимостей (6.72) и (6.71), а также данных на рис. 6.15, *а*, *б* показывает, что методы условных пластических деформаций и фиктивных температур при надлежащем выборе параметров Δ и $\bar{\Delta}$ могут давать достаточно близкие результаты.

Метод условных дислокаций. Метод условных дислокаций основан на использовании математического аппарата теории трещин. Например, в случае заварки в неограниченной пластине стыкового шва длиной l, как показано на рис. 6.16, формирование остаточных напряжений можно имитировать приложением к берегам трещины длиной $2L$ напряжений (усилий), обеспечивающих закрытие трещины на величину $2v(x)$. В этом случае поперечные напряжения σ^0_{yy} по линии $y = 0$ определяются зависимостью [8]

$$\sigma^{0(x)}_{yy} = \frac{E}{4\pi} \int\limits_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{x - x'} \left(\frac{d\,[v]}{dx} \right) dx'. \qquad (6.73)$$

Если на участке $x_1 < x < x_2$ длиной l к берегам трещины приложены постоянные напряжения $\sigma^0_{yy} = \sigma_0$, то между величиной σ_0 и средним значением $[\bar{v}]_l$ на длине l имеется зависимость [7]

$$\sigma_0 = K_s\,[\bar{v}]_l, \qquad (6.74)$$

где K_s — коэффициент податливости,

$$K_s = \frac{\pi}{2} \frac{E}{L} \frac{l}{L} \frac{1}{F};$$

$$F = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\int\limits_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\theta \sin n\theta d\theta \right)^2; \quad \theta = \arccos \frac{2x}{L}.$$

При $l \to L$ $F \to \pi^2/4$ и $K_s = \frac{2E}{\pi L}$, т. е. $\sigma_0 = \frac{2E}{\pi L} [\bar{v}]_L$. В [7] предложены зависимости для величины K_s для характерных случаев заварки стыкового шва в соответствующих технологических испытаниях. На рис. 6.17 приведены две такие пробы. Для кольцевого образца (см. рис. 6.17, *а*)

$$K_s = \frac{E}{4\pi} \frac{1}{b - a} \left(\ln \frac{b}{a} - \frac{b^2 - a^2}{b^2 + a^2} \right); \qquad (6.75)$$

для Н-образца (см. рис. 6.17, *б*)

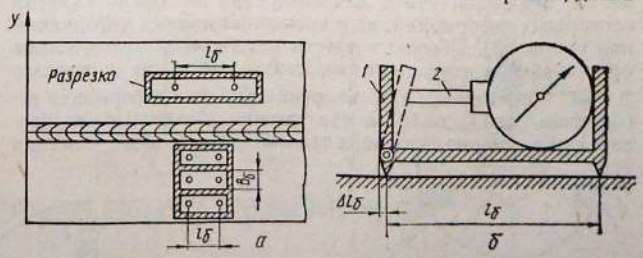
$$K_s = E/B \left(1 + \frac{L_c}{2L_s} \right). \qquad (6.76)$$

6.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СВАРКЕ

Вопросам измерения сварочных напряжений и деформаций уделяется много внимания в работах различных исследователей [3, 8, 26]. Наиболее разработаны методы измерения остаточных напряжений и деформаций. Значительно меньше работ (и методов) для получения информации экспериментальным путем о временных напряжениях и деформациях, что объясняется большими экспериментальными трудностями [6]. Поэтому основное внимание здесь уделено методам измерения остаточных сварочных напряжений и деформаций. Условно можно выделить три направления исследований в зависимости от конечной задачи измерения: получение информации относительно остаточных упругих деформаций и напряжений после сварки, относительно полных остаточных деформаций с выделением упругой и пластической составляющих и относительно искажения формы и размеров свариваемого изделия. Первое направление привлекает наиболее пристальное внимание как исследователей, так и разработчиков сварных конструкций и технологии их изготовления. Используются различные методы, основанные на полном или частичном разрушении (освобождении) соответствующего участка конструкции, — механические методы, а также неразрушающие методы измерения остаточных упругих деформаций, основанные на зависимости физических свойств материалов от упругих деформаций,— физические методы.

6.3.1. Механические методы

В этих методах упругие остаточные деформации измеряются во время разгрузки напряженных объемов металла при их освобождении путем полного или частичного разрушения (разрезки) исследуемого участка. По измеренным деформациям при разрезке, используя соответствующие зависимости теории упругости, вычисляют остаточные напряжения. Существует много методов такого типа, определяемых степенью и характером разрушения (разрезки) исследуемого участка (способом измерения освобождающихся упругих деформаций). В практике экспериментальных исследований упругих деформаций в конструкциях широкое распространение получили измерения с помощью механических, электрических и оптических тензометров. В зависимости от сложности исследуемой конструкции, требуемой точности измерений, диапа-



а *б*

Рис. 6.18. Расположение баз для измерения упругих остаточных деформаций в зоне сварного шва (*а*) и механического тензометра (*б*):
1 — рычаг; *2* — стержень индикатора.

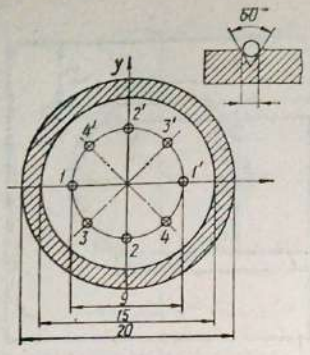


Рис. 6.19. Схема, иллюстрирующая метод Гуннерта.

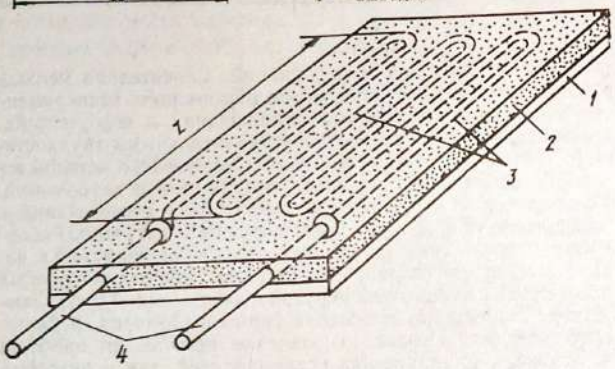


Рис. 6.20. Приклеиваемый тензорезистор:
1 — подложка; *2* — клеевой слой; *3* — чувствительная решетка; *4* — выводы.

зона измеряемых величин разработаны различные типы тензометров, которые различаются как внешним оформлением, так и конструктивно [26]. В основе их лежит один и тот же принцип — определение изменения размеров базы, фиксируемой тензометром. Величина и расположение баз выбираются в каждом конкретном случае в зависимости от характера измеряемого напряженного состояния, размеров изделия, способа и порядка разрезки и т. д.

Для одноосного напряженного состояния при сварке, которое обычно имеет место при сварке элементов из узких длинных полос, для определения продольных остаточных упругих деформаций (напряжений) измерительные базы располагаются вдоль сварного шва (рис. 6.18, *а*). Длина $l_б$ и ширина $b_б$ базы выбираются в зависимости от ожидаемого градиента напряжений в соответствующих направлениях. Обычно для одноосного напряженного состояния градиент напряжений вдоль сварного шва невелик, поэтому особых ограничений на величину $l_б$ нет и успешно могут быть использованы тензометры механического типа. Схема простейшего такого тензометра с индикаторной головкой приведена на рис. 6.18. Принцип работы его достаточно прост. Точность тензометра определяется его конструктивной схемой и точностью используемого индикатора; иногда может быть повышена изменением соотношения плеч рычага. На этом принципе созданы тензометры, предназначенные для измерения не только упругих остаточных деформаций, но и временных полных деформаций при сварке [3]. Обычно точность механических тензометров при измерении изменения линейных размеров не превышает $2 \cdot 10^{-3}$ мм, поэтому при измерении упругих деформаций необходима база $l_б > 10$ мм при условии абсолютного воспроизведения позиционирования тензометра до и после разрезки детали. Однако погрешность позиционирования обычно достаточно велика, поэтому необходимая точность измерения упругих деформаций достигается при $l_б \approx 40...100$ мм, что ограничивает применение механических тензометров в условиях больших градиентов изменения напряжений, например, в зонах возможных концентраций напряжений. Здесь в качестве исключения следует отметить методику Р. Гуннерта [8], при которой благодаря повышению общей точности измерения деформаций (до 0,5 мкм) использовалась малая база измерения — 9 мм. Эта методика основана на использовании конструкции механического тензометра, который имеет восемь точек позиционирования с помощью шариковых наконечников диаметром 2 мм и соответствующих им отверстий конического типа, расположенных по окружности на исследуемой детали (рис. 6.19). По показаниям тензодатчика в четырех направлениях *1—1'*, *2—2'*, *3—3'* и *4—4'* определяются соответствующие упругие остаточные деформации

$$\varepsilon_{xx} = -\varepsilon_{11'}; \quad \varepsilon_{yy} = -\varepsilon_{22'}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2}(\varepsilon_{33'} - \varepsilon_{44'}) \tag{6.77}$$

и остаточные напряжения

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_{xx} + \nu\varepsilon_{yy}); \quad \sigma_{yy} = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_{yy} + \nu\varepsilon_{xx});$$

$$\sigma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)}\varepsilon_{xy}. \tag{6.78}$$

При измерениях двухосных остаточных упругих деформаций (напряжений) на относительно небольшой базе обычно вместо механических тензометров используют более чувствительные и малогабаритные электрические тензорезисторы сопротивления. В основу работы тензорезистора положен тензорезистивный эффект, т. е. изменение удельного сопротивления проводника под действием растягивающих или сжимающих деформаций в направлении измерений. Коэффициент тензочувствительности тензорезистора определяется отношением

$$S = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l}, \tag{6.79}$$

где R — омическое сопротивление; l — длина проводника; ρ — удельное сопротивление. Значения S определяются экспериментально и могут существенно изменяться в зависимости от используемых материалов. Различают тензорезисторы сопротивления проволочные, фольговые и полупроводниковые. В отечественной тензометрической технике наибольшее распространение получили тензорезисторы из специальной константановой тензометрической проволоки диаметром 0,012—0,5 мм. Коэффициент тензочувствительности этой проволоки $S \approx 2{,}0$ и не изменяется от деформации вплоть до разрушения.

Схема приклеиваемого тензорезистора показана на рис. 6.20. Чувствительный элемент тензорезистора выполняется в виде петлеобразной решетки из тонкой проволоки (проволочный тензорезистор) или фольги и располагается на подложке (основе) тензорезистора, которая электрически изолирует решетку от материала испытываемой детали. Одной из основных характеристик тензорезистора является его база l. Различают тензорезисторы с малой ($l < 6$ мм), средней ($l = 10...30$ мм) и большой ($l > 30$ мм) базами. При измерениях плоского напряженного состояния используют розетки из нескольких тензорезисторов. Если известны направления главных деформаций, для определения значения последних

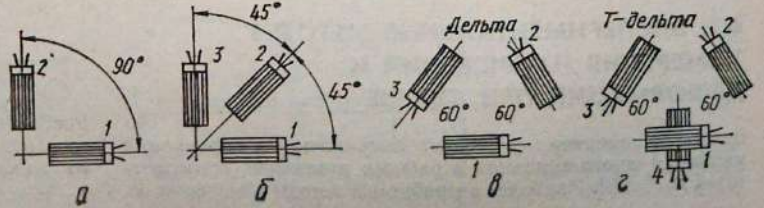


Рис. 6.21. Варианты использования тензорезисторов для измерения плоского напряженного состояния, если направления главных напряжений известны (*а*) и неизвестны (*б*, *в*, *г*).

обычно наклеивается прямоугольная розетка, состоящая из двух тензорезисторов, расположенных под углом 90° и наклеенных по этим направлениям (рис. 6.21, *а*). Если главные направления неизвестны, в измерениях применяются трехэлементные, или дельта-розетки, а также розетки, состоящие из четырех тензорезисторов (рис. 6.21, *б, в, г*), и др. При этом используются следующие зависимости для пересчета показаний тензорезисторов ε_j (j = I, II, III, IV) в упругие остаточные деформации по главным направлениям 1, 2:

$$
\begin{aligned}
&\text{а)}\ \varepsilon_1 = -\varepsilon_{\mathrm{I}},\quad \varepsilon_2 = -\varepsilon_{\mathrm{II}},\ \text{если}\ \varepsilon_{\mathrm{I}} < \varepsilon_{\mathrm{II}};\\
&\text{б)}\ \varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2}\{-(\varepsilon_{\mathrm{I}} + \varepsilon_{\mathrm{III}}) \pm\\
&\pm \sqrt{(\varepsilon_{\mathrm{I}} - \varepsilon_{\mathrm{III}})^2 + [2\varepsilon_{\mathrm{II}} - (\varepsilon_{\mathrm{I}} - \varepsilon_{\mathrm{III}})]^2}\};\\
&\text{в)}\ \varepsilon_{1,2} = -\frac{1}{3}(\varepsilon_{\mathrm{I}} + \varepsilon_{\mathrm{II}} + \varepsilon_{\mathrm{III}}) \pm\\
&\pm \sqrt{\left(\varepsilon_{\mathrm{I}} - \frac{\varepsilon_{\mathrm{I}} + \varepsilon_{\mathrm{II}} + \varepsilon_{\mathrm{III}}}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{\mathrm{II}} - \varepsilon_{\mathrm{III}}}{\sqrt{3}}\right)^2};\\
&\text{г)}\ \varepsilon_{1,2} = -\frac{1}{2}(\varepsilon_{\mathrm{I}} - \varepsilon_{\mathrm{II}}) \pm\\
&\pm \frac{1}{2}\sqrt{(\varepsilon_{\mathrm{I}} - \varepsilon_{\mathrm{IV}})^2 + \frac{4}{3}(\varepsilon_{\mathrm{II}} - \varepsilon_{\mathrm{III}})^2}.
\end{aligned}
\qquad (6.80)
$$

Соответственно главные напряжения

$$
\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2),\quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1). \qquad (6.81)
$$

Необходимые сведения о выборе типа тензорезисторов, технологии наклейки их на изделие и измерении показаний можно получить в специальной литературе, например в [26].

Одним из существенных недостатков механических методов измерения остаточных напряжений является необходимость в определенной степени разрушать участок детали, где происходит измерение. Поэтому естественно стремление исследователей разработать методы с минимальным разрушением. В этом отношении весьма показательным является метод Матара [8]. Сущность этого метода заключается в следующем. Если в тонкой пластине в зоне остаточных напряжений просверлить сквозное отверстие с центром в точке $\bar{x} = 0$, $\bar{y} = 0$ (рис. 6.22, *а*), то произойдет частичная релаксация остаточных напряжений в окрестности отверстия. Ее можно зафиксировать с помощью тензодатчиков, установленных соответствующим образом в зоне отверстия (рис. 6.22, *б*). По значениям радиальной деформации ε_{rr}^j (j = I, II, III), фиксируемым тензорезисторами, определяются главные остаточные напряжения в центре отверстия по зависимостям

$$
\sigma_{1,2} = -\frac{E\lambda^2}{1+\nu}\left\{A \pm \frac{\lambda^2(1+\nu)B}{4\lambda^2 - 3(1+\nu)}\right\}, \qquad (6.82)
$$

где $\lambda = r/a$; $A = \frac{1}{3}(\varepsilon_{rr}^{\mathrm{I}} + \varepsilon_{rr}^{\mathrm{II}} + \varepsilon_{rr}^{\mathrm{III}})$;

$B = \sqrt{(\varepsilon_{rr}^{\mathrm{I}} - A)^2 + \delta^2}$; $\delta^2 = (\varepsilon_{rr}^{\mathrm{II}} - \varepsilon_{rr}^{\mathrm{III}})^2/3$.

Диаметр отверстия $2a$ характеризует точность измерения остаточных напряжений, поскольку в основу расчетных зависимостей (6.82), определяющих значение $\sigma_{1,2}$ в точке $x = \bar{y} = 0$, положено условие, что на поверхности $r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} = a$ радиальные напряжения $\sigma_{rr} = 0$. В случае значительных градиентов напряжений, когда в пределах радиуса $r = a$ возможно их существенное изменение, такое допущение может привести к заметным погрешностям. Уменьшение же величины a резко снижает чувствительность метода (пропорционально a^2), т. е. возрастает требовательность к точности измерения деформаций $\varepsilon_{rr}^{\mathrm{I}}$, $\varepsilon_{rr}^{\mathrm{II}}$ и $\varepsilon_{rr}^{\mathrm{III}}$, величины которых примерно пропорциональны a^2/r^2. В связи с этим для измерений остаточных напряжений методом Матара был предложен целый ряд эффективных методов измерения радиальных деформаций в зоне относительно небольших отверстий, для которых тензорезисторы оказываются недостаточно чувствительными. Наиболее эффективны в этом отношении методы оптически чувствительных покрытий и голографической интерферометрии.

Метод оптически чувствительных покрытий (ОЧП) основан на свойстве оптически чувствительных материалов при деформировании менять степень оптической анизотропии.

Оптическую анизотропию среды можно полностью охарактеризовать эллипсоидом показателей преломления — эллипсом Френеля [26]. Три главных коэффициента преломления в произвольной точке n_1, n_2, n_3 образуют три полуоси эллипсоида, направления которых совпадают с направлениями главных осей эллипсоида (тензора) напряжений. Связь главных показателей преломления с главными напряжениями σ_1, σ_2, σ_3 выражается уравнениями

$$
\begin{aligned}
n_1 - n_0 &= c_1\sigma_1 + c_2(\sigma_2 + \sigma_3);\\
n_2 - n_0 &= c_1\sigma_2 + c_2(\sigma_1 + \sigma_3);\\
n_3 - n_0 &= c_1\sigma_3 + c_2(\sigma_1 + \sigma_2),
\end{aligned}
\qquad (6.83)
$$

где n_0 — коэффициент преломления для ненапряженного тела; c_1, c_2 — оптические коэффициенты, характеризующие для данного материала зависимость между двойным лучепреломлением и напряжениями. В тонком покрытии, нагруженном в своей плоскости, главное напряжение $\sigma_3 \equiv 0$. Для света, падающего перпендикулярно к поверхности покрытия, уравнения (6.83) принимают вид

$$
n_1 - n_0 = c_1\sigma_1 + c_2\sigma_2;\quad n_2 - n_0 = c_1\sigma_2 + c_2\sigma_1. \qquad (6.84)
$$

Из (6.84) следует

$$
n_1 - n_2 = c(\sigma_1 - \sigma_2), \qquad (6.85)
$$

где $c = c_1 - c_2$ — относительный оптический коэффициент напряжений.

При входе в покрытие, находящееся в плосконапряженном состоянии, поляризованный луч света разлагается на два луча, которые проходят через оптически чувствительный

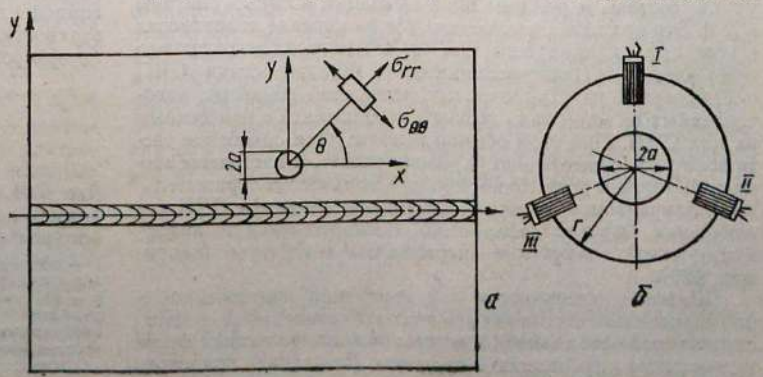


Рис. 6.22. Применение метода Матара для тонкой пластины (*а*) и схема расположения датчиков в зоне отверстия (*б*).

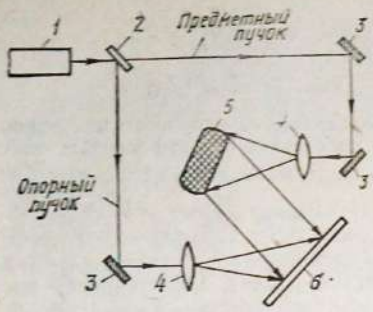


Рис. 6.23. Запись голограмм с наклонным опорным пучком:

1 — лазер; *2* — светоделитель; *3* — отражающее зеркало; *4* — распределитель излучения; *5* — предмет голографирования; *6* — фотопластина.

материал со скоростями v_1 и v_2, отличными от скорости света в вакууме v_0:

$$v_1 = v_0/n_1; \quad v_2 = v_0/n_2. \tag{6.86}$$

Плоскости поляризации лучей, распространяющихся в нагруженном покрытии, совпадают с плоскостями главных напряжений ε_1, ε_2. Отставание одного луча от другого (линейная разность хода δ) пропорционально разности коэффициентов преломления и толщине слоя $h_п$ покрытия:

$$\delta = h_п (n_1 - n_2). \tag{6.87}$$

Из уравнений (6.85) и (6.87) следует

$$\sigma_1 - \sigma_2 = c \frac{h_п}{\delta}. \tag{6.88}$$

Соотношение (6.88) представляет собой известный закон Вертгейма, который выражает количественную связь между оптическим эффектом и разностью главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$. Величину δ и направления σ_1 и σ_2 определяют с помощью полярископа через поле изохром и изоклин. Если перейти к главным деформациям в покрытии $\varepsilon_1^п$, $\varepsilon_2^п$, то из (6.88) следует

$$\varepsilon_1^п - \varepsilon_2^п = m \frac{\varepsilon^{1,0}}{2h_п}, \tag{6.89}$$

где m — порядок изохромы (полосы), $\varepsilon^{1,0}$ — цена полосы материала покрытия по деформациям. Поскольку применительно к методу ОЧП деформации в покрытии равны деформациям на исследуемой поверхности, то уравнение (6.89) дает зависимости для разности главных деформаций на поверхности исследуемой детали. Если ОЧП нанести на поверхность изделия, исследуемого на остаточные напряжения, а затем просверлить небольшое отверстие, то величины главных остаточных напряжений определяются по (6.82). С учетом того, что величины ε_{rr}^{I}, ε_{rr}^{II}, ε_{rr}^{III} находятся из (6.89) по соответствующим направлениям (см. рис. 6.22) при условии, что $\varepsilon_{rr} = -\varepsilon_{\beta\beta}$,

$$\varepsilon_{rr}^{(j)} = m^{(j)} \frac{\varepsilon^{1,0}}{4h_п} \quad (j = \text{I, II, III}). \tag{6.90}$$

В качестве материалов покрытий обычно используются материалы на основе эпоксидных смол или полиуретановые каучуки, составы и режимы полимеризации которых описаны в [26]. Эти покрытия приклеиваются на плоские поверхности с помощью цианкринового или эпоксидного клея холодного отверждения. Оптико-механические характеристики ОЧП определяются из тарировочных испытаний образцов, изготовленных из материала исследуемого объекта с нанесенным на них ОЧП. При этом обычно используется одноосное растяжение, что существенно упрощает расчет. В настоящее время разработано достаточно большое количество отражательных полярископов, которые используются в методе ОЧП для измерения упругих деформаций. Соответствующую информацию можно получить в специальной литературе (например, [26]).

Широкие возможности для измерения напряженно-деформированного состояния представляет голография — двухступенчатый метод записи и восстановления волнового фронта, несущего информацию о предмете. Для записи волнового фронта используется интерференция двух когерентных пучков света — предметного и опорного, — из которых первый освещает предмет и рассеивается им, а второй создает когерентный фон. Если предметная и опорная волны обладают когерентностью, то разность фаз между ними остается постоянной во времени и создается стационарная интерференционная картина с определенным распределением интенсивностей. Фотографическую запись этой интерференционной картины называют голограммой. Она содержит информацию как об амплитуде, так и о фазе волн, дифрагирующих на предмете. Получение голограммы есть процесс регистрации интерференционной картины. Для восстановления изображения предмета голограмма освещается опорным пучком. Голографический метод записи и восстановления волнового фронта может быть реализован в широком диапазоне электромагнитных, акустических, рентгеновских и других типов волн. Наибольшее практическое применение находит голография в оптическом диапазоне электромагнитного спектра [26].

Известны различные схемы записи голограмм. Широко используется схема с наклонным опорным пучком (рис. 6.23) для получения голограмм объемных изображений диффузионно отражающих объектов. Схема восстановления исходного предметного волнового фронта показана на рис. 6.24. Голограмма освещается волновым фронтом, соответствующим исходному опорному пучку. Восстановление волны позволяет наблюдать действительное и мнимое изображения. Наблюдатель, воспринимающий волну, восстановленную голограммой, видит трехмерное мнимое изображение предмета, расположенное там же, где находился предмет во время записи голограммы. Основное отличие голограммы от объемной фотографии в том, что в ней регистрируется информация и об амплитуде, и о фазе предметной волны, тогда как в фотографии регистрируется лишь распределение освещенности в падающей на нее световой волне.

Одним из наиболее важных практических применений голографии является голографическая интерферометрия. Голографическая интерферометрия по сравнению с обычной оптической имеет ряд преимуществ. Она позволяет исследовать предметы любой сложной формы с диффузно отражающими свет поверхностями. Неправильные формы и шероховатость поверхности не сказываются на интерференционной картине. Это обусловлено тем, что голограмма до фотографической обработки экспонируется дважды: первый раз — когда предмет находится в исходном состоянии, второй — когда он подвергается определенным воздействиям. При освещении обработанной голограммы опорным пучком восстанавливаются две предметные волны одновременно. Они интерферируют между собой, образуя картину интерференционных полос, характеризующую изменение состояния предмета между первой и второй экспозициями. При этом неправильные формы и шероховатость поверхности не сказываются на интерференционной картине, так как обе интерферирующие волны в одинаковой степени ими искажены. Голографическая интерферограмма диффузно отражающего предмета несет информацию о перемещениях точек его поверхности по всем трем координатам, поэтому процесс их расшифровки сводится к получению по интерференционной картине компонентов векторов перемещений точек исследуемой поверхности. Разработке методик анализа голографических интерферограмм уделяется большое внимание [26].

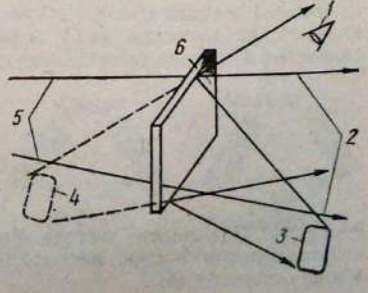


Рис. 6.24. Восстановление исходного предметного волнового фронта:

1 — наблюдатель; *2* — пучок нулевого порядка; *3* — действительное изображение; *4* — мнимое изображение, *5* — волна восстановления; *6* — голограмма.

Применительно к измерению остаточных напряжений по методу Матара голографическая интерферометрия получила достаточно широкое распространение [27, 38]. Разработаны переносные голографические приборы, позволяющие достаточно оперативно получать информацию в поверхностных точках конструкций указанным способом без виброизоляции исследуемого объекта.

6.3.2. Неразрушающие методы определения остаточных напряжений

Эти методы основаны на изменении тех или иных физических свойств материала в зависимости от степени упругого деформирования. Известен целый ряд методов такого типа, однако практически используются очень немногие.

Ультразвуковой метод. Широкое применение для оценки одноосных и двухосных напряженных состояний конструктивных элементов получил метод, основанный на использовании зависимости скорости распространения сдвиговых ультразвуковых волн в твердом теле с напряжениями от значения этих напряжений.

При известных физико-механических характеристиках материала определение напряжений сводится к измерению скорости распространения двух сдвиговых ультразвуковых волн, которые направлены перпендикулярно плоскости действия главных напряжений и поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях, соответствующих направлениям главных напряжений, которые рассчитываются по формуле ($\sigma_3 \equiv 0$) [26]

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \left(\frac{c_{s1} - c_{s0}}{c_{s0}} - \frac{c_{s2} - c_{s0}}{c_{s0}} \right) A;$$
$$\sigma_1 + \sigma_2 = \left(\frac{c_{s1} - c_{s0}}{c_{s0}} + \frac{c_{s2} - c_{s0}}{c_{s0}} \right) B, \qquad (6.91)$$

где σ_1 и σ_2 — определяемые главные напряжения; c_{s1}, c_{s2} — скорости распространения сдвиговых волн, поляризованных в соответствующих главных плоскостях, в нагруженном объекте; c_{s0} — скорость сдвиговой волны в ненагруженном объекте.

Коэффициенты пропорциональности A и B определяются экспериментально при тестовых испытаниях материала объекта.

При оценке двухосного напряженного состояния ультразвуковым методом необходимо знать направления главных напряжений, в плоскости которых осуществляется поляризация сдвиговых волн. Если главные направления в данном объекте заранее неизвестны, то их определяют по максимальной разности скоростей или по характеру нескольких последовательных отражений ультразвукового сигнала. При измерениях этим методом неоднородных полей напряжений получают усредненные напряжения на базе, которая определяется размерами измерительных датчиков. При измерении по толщине деталей с помощью сдвиговых ультразвуковых волн также получают усредненные значения напряжений по толщине [28]. В определенной степени усреднения напряжений по толщине изделия можно избежать, если использовать поверхностные волны Рэлея. Для этих волн уравнения (6.91) сохраняются, только вместо A и B следует подставить A^R и B^R, соответствующие распространению волн Рэлея в данном материале. Измерение скоростей распространения ультразвуковых волн в исследуемом объекте проводится с помощью различных приборов. Главная трудность состоит в том, что изменения параметров упругой волны вследствие действия напряжений весьма малы, поэтому на выбор метода измерения скорости распространения упругой волны в этих приборах накладывается условие обеспечения точности измерения с погрешностью не более $(1...3) \cdot 10^{-5}$. Используются, в основном, импульсные методы. Указанной выше чувствительностью обладает метод автоциркуляции импульса. Двухканальный измеритель скорости ультразвуковых волн с чувствительностью не хуже 10^{-6} описан в работе [28]. Важную роль в измерении скорости упругих волн играет акустический контакт пьезоэлектрического преобразователя и исследуемого тела. Существенные помехи могут внести в результаты измерений структурные и фазовые превращения в металле при сварке, поскольку при этом заметно меняются параметры упругой волны, что значительно маскирует эффект от остаточных напряжений.

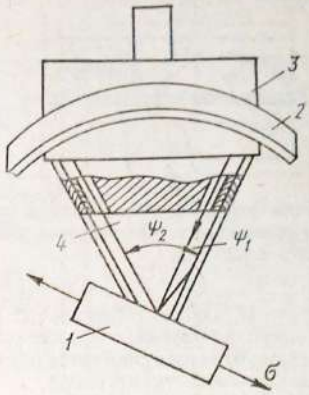


Рис. 6.25. Схема рентгеновского фотометода для измерения остаточных напряжений:
1 — контролируемое изделие; *2* — кассета с рентгеновской пленкой; *3* — двухканальная рентгеновская трубка; *4* — коллимационное устройство.

Рентгеновский метод определения остаточных напряжений базируется на измерении деформаций контролируемого объекта путем практического измерения величины межплоскостных расстояний кристаллической решетки металла изделия. Различают два рентгеновских способа определения макронапряжений, основанных на дифракции рентгеновских лучей: рентгенографический метод с использованием рентгеновской пленки (фотометод) и дифрактометрический метод с использованием гониометра и рентгенографического датчика для точной регистрации углов дифракции. Второй метод находит ограниченное применение из-за больших габаритных размеров, значительной массы дифрактометра и необходимости в охлаждении рентгеновской трубки водой. Рентгеновский фотометод нашел более широкое применение в практике, вплоть до создания портативных установок определения величины и распределения остаточных напряжений [8].

Рассмотрим один из подходов реализации фотометода, использованный в портативной аппаратуре [30]. Выбранный в работе [30] способ наклонных рентгеносъемок предусматривает получение от контролируемого участка изделия не менее двух рентгеновских снимков при различных ψ_1 и ψ_2 углах падения рентгеновских лучей (рис. 6.25) относительно нормали к контролируемой поверхности. Одновременно на ту же рентгеновскую пленку получают рентгенограмму от эталонного порошка, тонкий слой которого наносится на контролируемый участок перед рентгеносъемкой. Дифракционная линия эталонного вещества на рентгенограмме служит для точного определения расстояния объект — пленка.

При наклонной съемке дифракционные кольца на рентгенограмме напряженного состояния изделия не будут круглыми. Это обусловлено тем, что деформация вдоль нормали к отражательной плоскости меняется тем сильнее, чем больше угол ψ (см. рис. 6.25). Для эталонного порошка дифракционный конус всегда круглый, так как материал находится в напряженном состоянии. Компоненты напряжений на поверхности изделия в направлении наклона рентгеновских лучей можно определить по рентгенограммам, полученным при двух значениях угла ψ с последующим промером расстояний $\Delta L^{д}$ между дифракционными линиями на детали эталона:

$$\sigma_{\psi\psi} = -\frac{E}{1+\nu} \frac{\operatorname{ctg}\theta^{д} \sin^2(\pi - 2\theta^{э})}{2\Delta L_1^{э}(\sin^2\psi_2 - \sin^2\psi_1)} (\Delta L_2^{д} - \Delta L_1^{д}). \qquad (6.92)$$

Здесь E и ν — упругие характеристики материала детали; $\Delta L_1^{д}$ и $\Delta L_2^{д}$ — расстояния между дифракционными линиями на детали; $\Delta L_1^{э}$ и $\Delta L_2^{э}$ — то же, на эталоне при $\psi_1 = 10°$ и

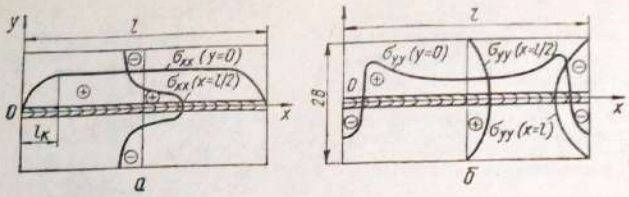


Рис. 6.26. Типичные эпюры распределения продольных (*а*) и поперечных (*б*) остаточных сварочных напряжений в тонкой пластине.

$\psi_2 = 60°$ соответственно; $0^д$ и $0^э$ — углы дифракции для материала детали и эталонного порошка. Точность рентгеновского метода снижается при больших деформациях и крупнозернистой структуре.

Электромагнитные методы определения остаточных напряжений основаны на зависимости внешнего электромагнитного поля от механического поля исследуемого твердого тела [29]. В последнее время привлекает внимание магнитошумовой метод для оценки напряжений в ферромагнитных материалах, включая и аморфные [31]. Интерес к этому методу обусловлен высокой магнитоупругой чувствительностью параметров шума Баркгаузена, отсутствием магнитоупругого гистерезиса, возможности контроля изделий сложной формы. Разработаны различные типы приборов для реализации метода. Тем не менее имеются факторы, ограничивающие точность измерения напряжений по этому методу. Это различие вклада поверхностных слоев различной глубины в сигнал преобразователя, зависимость параметров шума от угла разориентации между направлениями внешнего переменного магнитного поля и главных напряжений, различие во влиянии на параметры шума нормальных и касательных напряжений. Известны и другие электромагнитные методы, обладающие в той или иной степени теми же недостатками, что в общем делает их пока малоприменяемыми для измерения остаточных сварочных напряжений.

Моделирование сварочных напряжений (деформаций). Из изложенного выше следует, что существующие расчетные и экспериментальные методы определения сварочных напряжений достаточно сложны и не всегда могут быть применены к реальному объекту. В этой связи определенного внимания заслуживают и методы физического моделирования напряженного состояния при сварке [26]. Подобие термомеханических процессов в модели и натуре имеет место, если одновременно соблюдаются критерии геометрического, теплового и механического подобия.

В случае сварочного нагрева достаточно сосредоточенным подвижным источником теплоты двух геометрически подобных изделий (модель и натура) критерии теплового подобия формулируются следующим образом:

$$\mathrm{Fo} = \frac{\lambda t}{c\gamma l^2} = \mathrm{idem}; \quad \mathrm{Pe} = \frac{vl}{\lambda} c\gamma = \mathrm{idem};$$

$$\mathrm{Bi} = \frac{\alpha_к l}{\lambda} = \mathrm{idem}; \quad \mathrm{Ki} = \frac{q}{vl^2 T_a c\gamma} = \mathrm{idem}, \tag{6.93}$$

где Fo — критерий Фурье; $c\gamma$ — объемная теплоемкость; l — характерный линейный размер; Pe — критерий Пекле; v — скорость движения источника теплоты; $\alpha_к$ — коэффициент поверхностной теплоотдачи; Ki — критерий Кирпичева; q — эффективная мощность источника нагрева; T_a — характерная температура для материала.

Для идеального упруго-пластического материала при условии, что T_a определяет температурную границу, ниже которой предел текучести и модуль упругости материала можно принять постоянными и равными соответственно $\sigma_т^0$ и E, а выше T_a — примерно равными нулю, критерий механического подобия для сварочных напряжений будет следующим:

$$\sigma_т^0 / E\alpha T_a = \mathrm{idem}, \tag{6.94}$$

где α — средний коэффициент относительного температурного удлинения материала при $T < T_a$. Условия подобия (6.93), (6.94) соответствуют достаточно идеализированным материалам, для которых влиянием температуры на теплофизические свойства, а также на величины α и $\sigma_т$ можно пренебречь в достаточно широком диапазоне температуры. Наличие структурных превращений в материале шва или околошовной зоны, кинетика которых определяется скоростями охлаждения (нагрева), серьезно усложняет проблему моделирования сварочных напряжений даже на модели из того же материала, что и изделие. Для приближенной оценки сварочных напряжений в металлических конструкциях используют методы моделирования на оптически чувствительных материалах [26].

Материалы сваривают также плавлением. В процессе нагрева и охлаждения регистрируются визуально или фотокиносъемкой характерные картины светлых и темных полос, возникающих на поверхности модели при облучении ее источником монохроматического света. По этим картинам определяют как временные, так и остаточные напряжения.

6.4. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Многообразие сварных конструкций, узлов и соединений обусловливает и многообразие распределений остаточных сварочных напряжений. Тем не менее имеются характерные признаки, по которым можно провести определенное обобщение различных видов напряженных состояний. Одним из таких признаков является степень многоосности напряженного состояния. При сварке тонкостенных изделий компонентами тензора напряжений на площадках с нормалью, направленной по толщине изделия, обычно пренебрегают, т. е. в этих случаях можно говорить о плоском напряженном состоянии для остаточных напряжений. На рис. 6.26 приведены типичные эпюры распределения продольных σ_{xx} и поперечных σ_{yy} напряжений по двум характерным сечениям — $y = 0$, $x = l/2$ и $y = 0$, $x = l$ при сварке напроход тонких пластин из низкоуглеродистой стали в свободном состоянии. Основные особенности этих эпюр следующие.

1. Напряжения σ_{xx} самоуравновешены в сечениях $x = \mathrm{const}$, а напряжения σ_{yy} — в сечениях $y = \mathrm{const}$. В случае, когда толщина пластины переменная, т. е. $S = S(x, y)$, уравнения равновесия (6.14) можно представить в виде

$$\frac{\partial}{\partial x}(S\sigma_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(S\sigma_{xy}) = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(S\sigma_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(S\sigma_{yy}) = 0; \tag{6.95}$$

$$x = 0,\ x = l : \sigma_{xx} = \sigma_{xy} = 0;$$

$$y = \pm B : \sigma_{yy} = \sigma_{xy} = 0,$$

откуда следует

$$\int_{-B}^{B} S\sigma_{xx}dy = 0; \quad \int_{-B}^{B} S\sigma_{yy}dx = 0, \tag{6.96}$$

т. е. в этом случае уравновешенными будут произведения напряжений на толщину S.

2. Продольные остаточные напряжения σ_{xx} в зоне шва — растягивающие и по максимальной величине близки к пределу текучести материала, у свободных торцов $x = 0$, $x = l$ напряжение $\sigma_{xx} = 0$. На рис. 6.27 приведены экспериментальные и расчетные данные [23] о распределении относительных остаточных продольных напряжений $\bar{\sigma}_{xx} = \sigma_{xx}/\sigma_т^0$ ($\sigma_т^0$ — предел текучести материала при комнатной температуре) в сечении $x = l/2$ в пластинах из низкоуглеродистой и нержавеющей сталей и алюминиевого сплава различных размеров, а также различных удельных тепловложений, опреде-

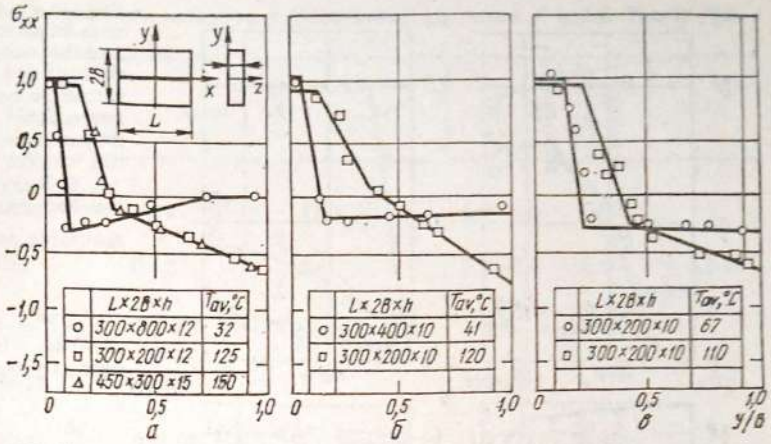


Рис. 6.27. Распределение продольных остаточных напряжений в сечении $x = l/2$ в зависимости от y/B и T_{av} для низкоуглеродистой стали (*а*), нержавеющей стали (*б*) и алюминиевого сплава (*в*) [23].

ляемых значением условной температуры (°C) $T_{av} = q_n/2c\gamma SB$. Из этих данных следует, что эпюру распределения продольных остаточных напряжений σ_{xx} для случая сварки пластины с симметричным швом можно схематизировать, как показано на рис. 6.28. Характерными точками этой эпюры являются точки y_1, y_2, y_3, σ_1^*, σ_2^*, σ_3^*, с помощью которых эпюра напряжений достаточно хорошо аппроксимируется отрезками прямых линий. На рис. 6.29 приведены значения y_1/B, y_2/B, y_3/B, $\sigma_1^*/\sigma_т$, $\sigma_2^*/\sigma_т$, $\sigma_3^*/\sigma_т$ из [23] для рассмотренных трех классов материалов: низкоуглеродистой стали, нержавеющей (аустенитной) стали и алюминиевого сплава в зависимости от величины T_{av}. Характеристики этих материалов приведены в табл. 6.2. Приближенные зависимости для величин y_1, y_2, y_3, $\sigma_1^*/\sigma_т$, $\sigma_2^*/\sigma_т$ и $\sigma_3^*/\sigma_т$ [23] приведены в табл. 6.3. Из этих данных видно, что с увеличением удельных тепловложений T_{av} монотонно возрастают величины y_1 и y_2, характеризующие активную зону растягивающих остаточных продольных напряжений. Величина y_3 также растет с увеличением T_{av}, но значительно быстрее, пока не достигнет величины B (при $T_{av} \approx 40°$ C). При $y_3 < B$ величина $\sigma_3^* = 0$, а затем достаточно резко возрастает по абсолютной величине. Величина σ_2^* по абсолютной величине не превышает (0,25...0,3) $\sigma_т$. Из условий равновесия при заданных y_1, y_2, y_3, σ_1^*, σ_3^*

$$\sigma_2^* = -\sigma_1^* \frac{y_1 + y_2}{y_3 - y_1} - \sigma_3^* \frac{y_3 - y_2}{y_3 - y_1}. \qquad (6.97)$$

Эти данные показывают, что для случая сварки пластин, когда ширина $2B$ соизмерима с длиной l, гипотеза плоских сечений для остаточных продольных напряжений в среднем сечении $x = l/2$ выполняется только в узком диапазоне значений T_{av}, когда $\sigma_2^* = \sigma_3^*$ (см. рис. 6.29). За пределами этого диапазона указанная гипотеза приближенно удовлетворяется раздельно для каждой половинки пластины.

Приведенное на рис. 6.27 распределение продольных остаточных напряжений характерно только для симметричного относительно продольных кромок пластины сварочного нагрева и $S = \text{const}$. При смещении линии нагрева относительно плоскости $y = 0$ имеет место несимметричное распределение (рис. 6.30).

Если ширина $2b$ — достаточно ограниченная величина ($2b \ll l$), то для распределения напряжений при несимметричном нагреве можно приближенно использовать локальные характеристики распределения по рис. 6.29, т. е. $2b \approx 2y_1$, $2b_1 \approx 2y_2$, $\overline{\sigma}_2^* + \overline{\overline{\sigma}}_2^* \approx 2\sigma_2^*$, $\overline{\sigma}_1^* = \sigma_1^*$. Для распределения напряжений σ_{xx} в зоне $-B < y < y_0 - y_2$, $y_0 + y^2 < y < B$ получим приближенную зависимость

$$\sigma_{xx} = ay + d, \qquad (6.98)$$

где

$$a = \frac{\sigma_1^* B y_0 (y_1 + y_2)}{\frac{1}{3}(B^3 - y_2^3)(y_1 + y_2 - 2B) + By_0^2 (y_1 + y_2)};$$

$$d = \frac{\frac{1}{3}\sigma_1^* (B^3 - y_2^3)(y_1 + y_2)}{\frac{1}{3}(B^3 - y_2^3)(y_1 + y_2 - 2B) + By_0^2 (y_1 + y_2)}.$$

Здесь y_1 и y_2 определяются по рис. 6.29 либо по табл. 6.3.

3. В случае прямолинейных швов на плоских элементах со свободными кромками поперечные напряжения σ_{yy} в зоне шва относительно невелики по сравнению с продольными σ_{xx}, особенно вдали от свободных торцов ($x = 0$, $x = l$). Вблизи свободных кромок распределение остаточных напряжений σ_{yy} достаточно характерное и обусловлено специ-

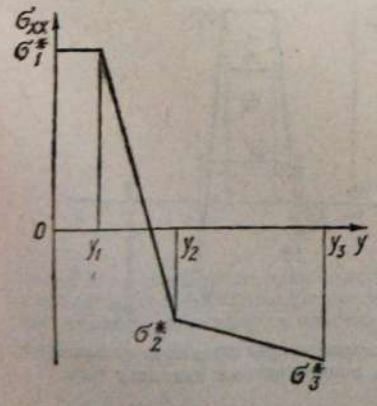


Рис. 6.28. Характерные точки эпюры относительных продольных остаточных напряжений в сечении $x = l/2$ при симметричном расположении сварного шва.

Таблица 6.2. **Физические и механические свойства материалов**

Материал	Предел текучести, МПа	Объемная теплоемкость, Дж/(см³·°C)	Коэффициент температурного удлинения, °C⁻¹
Сталь:			
низкоуглеродистая	300	4,16	$1{,}2 \cdot 10^{-5}$
нержавеющая	270	4,0	$1{,}75 \cdot 10^{-5}$
Алюминиевый сплав	145	2,5	$2{,}38 \cdot 10^{-5}$

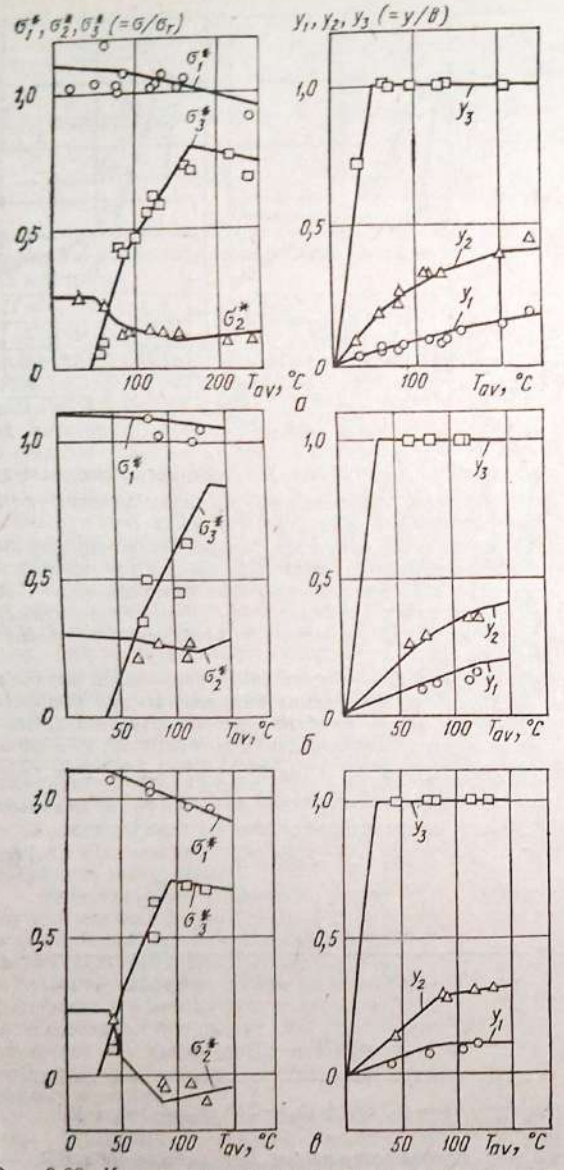


Рис. 6.29. Координаты характерных точек эпюры продольных остаточных напряжений для низкоуглеродистой стали (*а*), нержавеющей стали (*б*) и алюминиевого сплава (*в*) [23].

фическим влиянием свободной кромки (зона концевого эффекта). В этой зоне остаточные поперечные напряжения изменяются от растягивающих до значительных сжимающих напряжений (см. рис. 6.26, *б*), а продольные напряжения плавно уменьшаются вдоль оси x до нулевых на свободной кромке.

Протяженность зоны концевого эффекта (величина $l_к$ на рис. 6.26, *а*) определяется шириной активной зоны укорочения, т. е. величиной y_1, и примерно равна (10...15) y_1 (см. рис. 6.28). При малых длинах пластины зоны концевых эффектов противоположных торцевых кромок сливаются, что сказывается на величинах как продольных, так и поперечных напряжений. На рис. 6.31 приведены экспериментальные данные [2, 8] по измерению остаточных сварочных напряжений σ_{xx} и σ_{yy} вдоль сварного шва при сварке пластин толщиной 25,4 мм из низкоуглеродистой стали с двух сторон под слоем флюса. Режим I = 1050 А, $U_д$ = 32 В, $v_{св}$ = 0,5 см/с. Варьировалась длина L_x свариваемых пластин шириной 900 мм каждая. Видно, что при данных тепловложениях и толщинах зона концевого эффекта с каждого торца $l_к \approx 200$ мм, а продольные напряжения достигают максимума (около 310 МПа) только при длине $L_x > 500$ мм. Поперечные напряжения также возрастают с увеличением L_x, но быстрее достигают предельных значений: примерно 60 МПа в зоне растяжения на некотором удалении от торца и 180 МПа — на торцевой кромке.

4. В случае закрепления продольных кромок на поперечные напряжения σ_{yy} типа показанных на рис. 6.31, *б* накладываются дополнительно реактивные напряжения $\sigma^{р}_{yy}$:

$$\sigma^{р}_{yy} \cong \frac{\Delta u_п}{2B} E, \qquad (6.99)$$

где $\Delta u_п$ — поперечная усадка сварного шва при сварке в свободных условиях. Согласно [17]

$$\Delta u_п \approx \mu_п \frac{\alpha}{c\gamma} \frac{q_п}{S}, \qquad (6.100)$$

где α — коэффициент относительного температурного удлинения материала в зоне шва; $c\gamma$ — объемная теплоемкость материала; $q_п/S$ — погонная тепловая энергия сварки на единицу толщины; $\mu_п$ — эмпирический коэффициент, равный примерно 0,5—1,0 при малых $q_п/S$ и 1,0 при больших $q_п/S$. При многопроходной сварке величины $\Delta U_п$ суммируются от каждого прохода. Из (6.98), (6.99) следует, что реактивные поперечные напряжения $\sigma^{р}_{yy}$ могут быть значительными при малых B и больших тепловложениях $q_п/S$. В случае непрямолинейных сварных швов поперечные напряжения могут быть более высокими. На рис. 6.32 приведены данные относительно продольных $\sigma_{\beta\beta}$ и поперечных σ_{rr} напряжений при электронно-лучевой сварке кругового шва в пластине из низкоуглеродистой стали [24]. Кривые на рис. 6.32 соответствуют трем вариантам геометрических размеров свариваемых круговых дисков и режимов сварки, приведенных в табл. 6.4.

Видно, что уменьшение радиуса R_1 и увеличение R_2 (и вместе с ним жесткости) способствует увеличению поперечных напряжений σ_{rr}. При малой жесткости (вариант 16) уменьшаются не только напряжения σ_{rr}, но и продольные напряжения $\sigma_{\beta\beta}$. При очень малых R_1 (точечная сварка) напряжения σ_{rr} и $\sigma_{\beta\beta}$ в зоне сварки одинаковые и достигают в ряде случаев предела текучести материала (для стальных пластин), как это показано на рис. 6.33. Область напряженного состояния в пластине в зоне коротких швов занимает промежуточное положение между длинным швом (см. рис. 6.26) и точечным швом (см. рис. 6.33). На рис. 6.34, по данным [8], показаны эпюры продольных и поперечных напряжений в пластине из низкоуглеродистой стали толщиной 25 мм при многослойной заварке всей стыковой разделки, длиной 200 мм (*а*) и 150 мм (*б*), частичной заварке стыковой разделки длиной 400 мм в средней части швом длиной 150 мм (*в*), полной заварке разделки длиной 350 мм двумя блоками (*г*), полной заварке стыковой разделки длиной 500 мм тремя блоками (*д*). Видно, что увеличение длины шва L_x снижает поперечные растя-

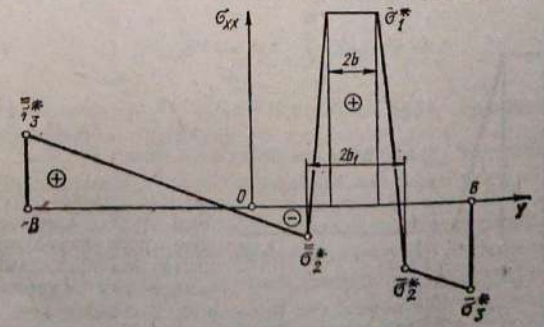


Рис. 6.30. Характерные точки эпюры продольных напряжений при несимметричном расположении сварного шва.

Таблица 6.3. **Характеристика распределения продольных остаточных напряжений в сечении $x = l/2$ (рис. 6.26) [23]**

Материал	Ширина пластины, мм	y_1, см	y_2, см	y_3, см	$\sigma_1^*/\sigma_т$	$\sigma_2^*/\sigma_т$ по формуле	$\sigma_3^*/\sigma_т$
Низкоуглеродистая сталь ($\sigma_т$ = 300 МПа)	$B > 10^{-2}\frac{q_п}{S}$	$0{,}6\cdot10^{-3}\frac{q_п}{S}$	$2\cdot10^{-3}\frac{q_п}{S}$	$11\cdot10^{3}\frac{q_п}{S}$	1,0—1,1	(6.97)	0
	$B \leqslant 0{,}33\cdot10^{-2}\frac{q_п}{S}$	$0{,}18B$	$0{,}4B$	B	0,9—1,0	(6.97)	—0,8
Нержавеющая сталь ($\sigma_т$ = 270 МПа)	$B \geqslant 2{,}5\cdot10^{-2}\frac{q_п}{S}$	$1{,}0\cdot10^{-3}\frac{q_п}{S}$	$2{,}2\cdot10^{-3}\frac{q_п}{S}$	$15\cdot10^{-3}\frac{q_п}{S}$	1,0—1,1	(6.97)	0
	$B \leqslant 0{,}4\cdot10^{-2}\frac{q_п}{S}$	$0{,}22B$	$0{,}45B$	B	1,0—1,1	(6.97)	—0,9
Алюминиевый сплав ($\sigma_т$ = 145 МПа)	$B \geqslant 2{,}7\cdot10^{-2}\frac{q_п}{S}$	$0{,}8\cdot10^{-3}\frac{q_п}{S}$	$2{,}3\cdot10^{-3}\frac{q_п}{S}$	$18\cdot10^{-3}\frac{q_п}{S}$	0,9—1,0	(6.97)	0
	$B \leqslant 0{,}9\cdot10^{-2}\frac{q_п}{S}$	$0{,}12B$	$0{,}33B$	B	0,85—0,9	(6.97)	—0,7

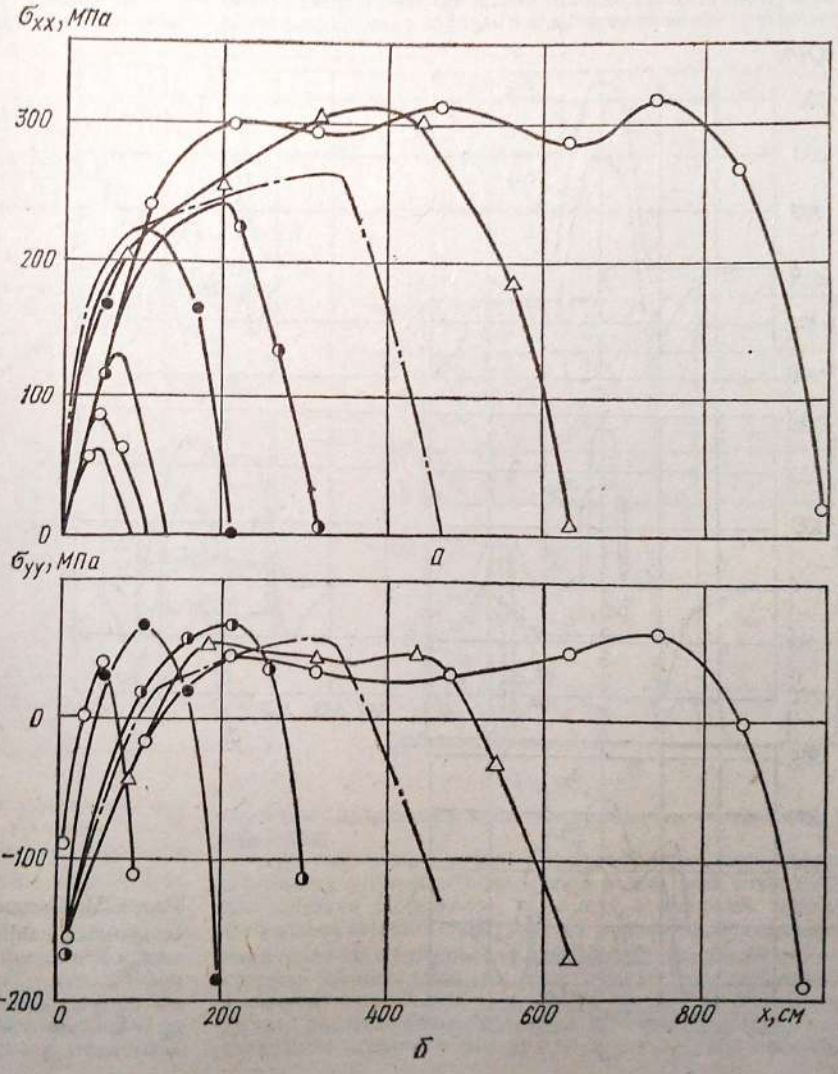


Рис. 6.31. Зависимость продольных (*а*) и поперечных (*б*) остаточных напряжений отдлины свариваемых пластин [7].

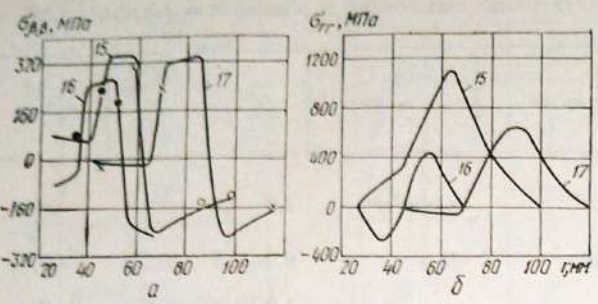
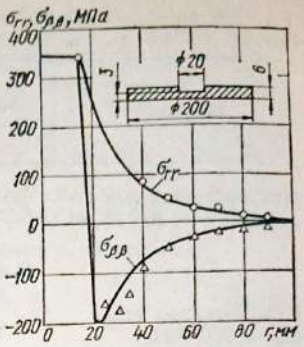


Рис. 6.32. Эпюры окружных $\sigma_{\beta\beta}$ (*а*) и радиальных σ_{rr} (*б*) остаточных напряжений в пластине при ЭЛС кольцевых швов [24]. Номер кривой соответствует номеру варианта по табл. 6.4.

Рис. 6.33. Распределение остаточных напряжений σ_{xx} и σ_{yy} в тонкой пластине при точечном шве.



гивающие напряжения σ_{yy} по оси шва с 250 МПа при $L_x =$ = 100 мм до 100 МПа при $L_x = 300$ мм.

На распределение остаточных сварочных напряжений в тонкостенных элементах сварных конструкций значительное влияние оказывают изгибные деформации. На рис. 6.35 [1] приведены изолинии остаточных сварочных напряжений в зоне кольцевого шва тонкостенных труб из различных материалов (табл. 6.5). Из таблицы видно, что даже в весьма тонкостенных трубках из материала с высокой теплопроводностью, обеспечивающей достаточно равномерный нагрев по толщине, напряженное состояние по толщине в зоне шва меняется весьма существенно, что связано с изгибными деформациями. Эти деформации возникают вследствие продольной усадки активной зоны, приводящей как бы к уменьшению диаметра соответствующего участка трубы (рис. 6.36). Поперечные остаточные напряжения σ_{xx} на внутренней поверхности трубы могут превышать максимальные продольные напряжения $\sigma_{\beta\beta}$. В стальной трубе максимальные напряжения σ_{xx} и $\sigma_{\beta\beta}$ на внутренней поверхности достигают предела текучести.

В трубах из других материалов, указанных в табл. 6.5, максимальные остаточные напряжения ниже предела текуче-

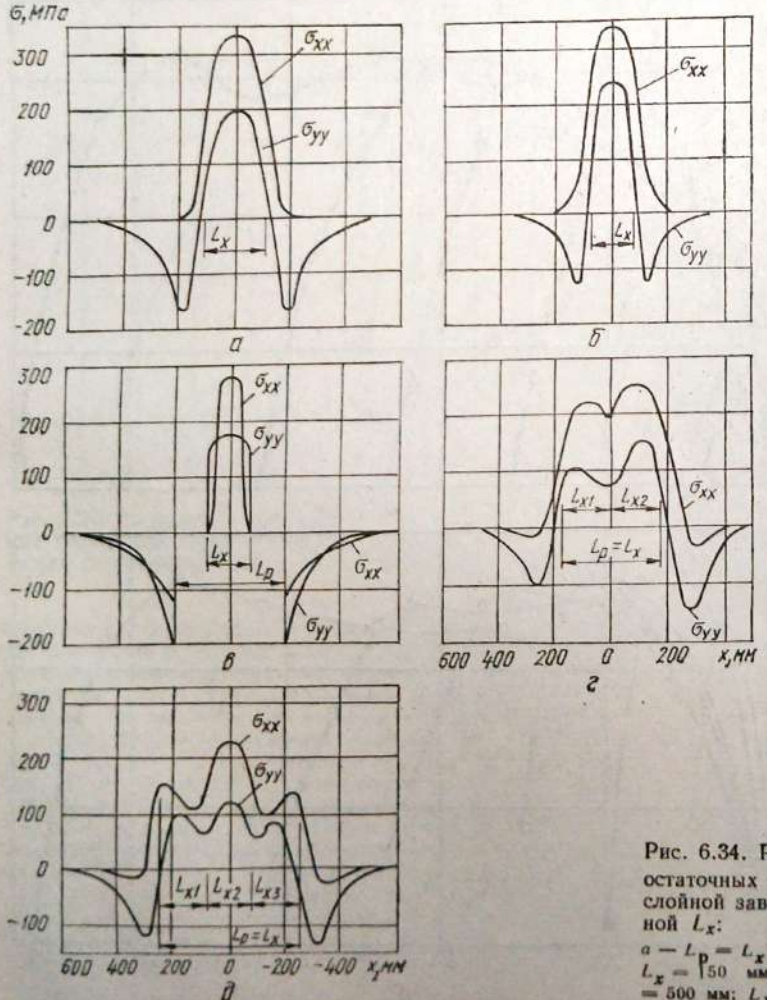


Рис. 6.34. Распределение продольных σ_{xx} и поперечных σ_{yy} остаточных напряжений при различных вариантах многослойной заварки стыковой разделки длиной L_p швами длиной L_x:

а — $L_p = L_x = 200$ мм; *б* — $L_p = L_x = 150$ мм; *в* — $L_p = 400$ мм; $L_x = 150$ мм; *г* — $L_p = 350$ мм; $L_{x1} = L_{x2} = L_p/2$; *д* — $L_p =$ = 500 мм; $L_{x1} = L_{x2} = L_{x3} = L_p/3$.

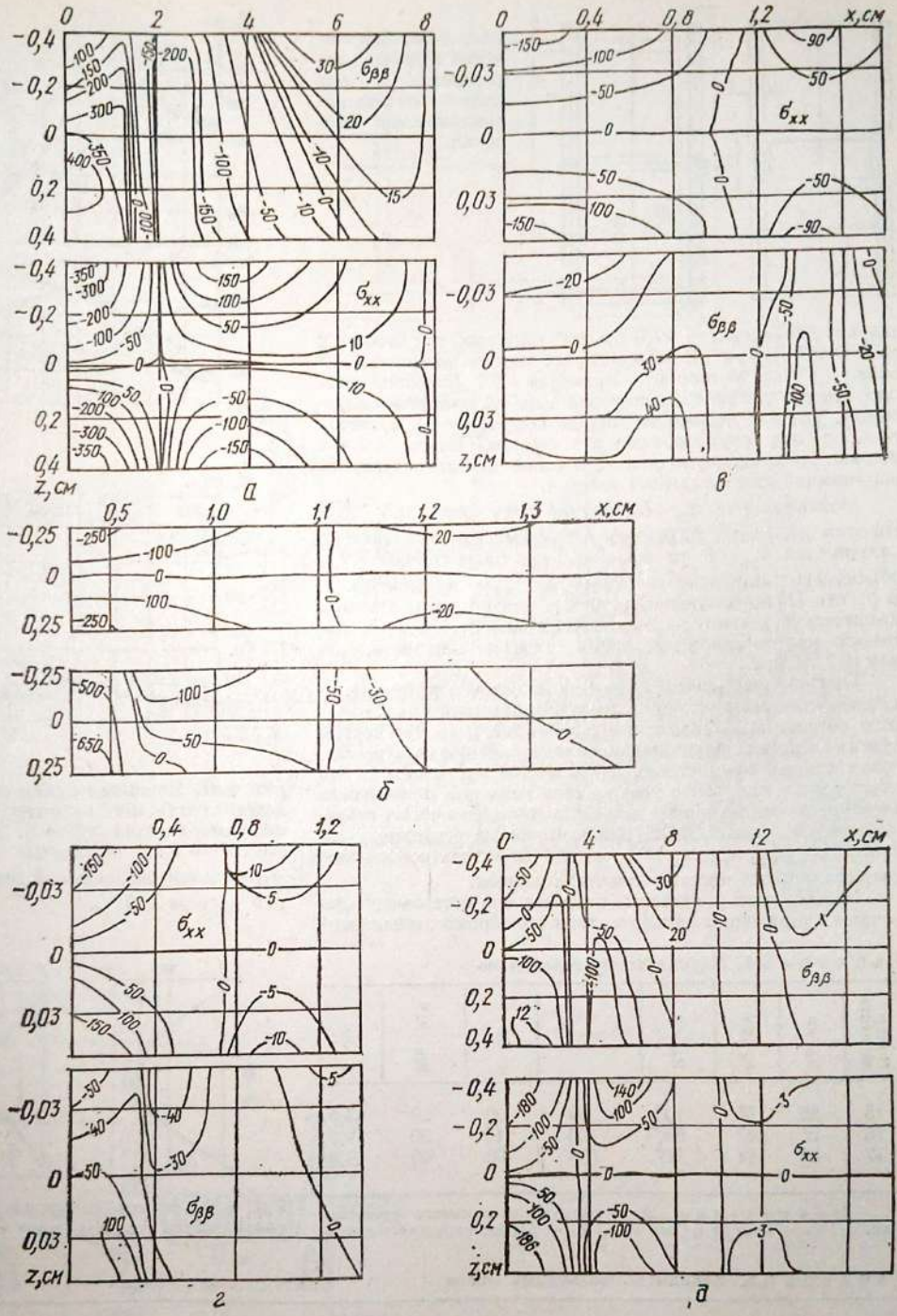


Рис. 6.35. Изолинии остаточных напряжений (МПа) в зоне кольцевого шва тонкостенных труб из различных материалов (см. табл. 6.5).

сти. На наружной поверхности поперечные напряжения σ_{xx} распределены так же, как на внутренней, но имеют другой знак. Продольные напряжения $\sigma_{\beta\beta}$ на наружной поверхности обычно существенно ниже, чем на внутренней. С увеличением параметра $\sqrt{RS}$ при одинаковых тепловложениях q_n/S происходит выравнивание остаточных напряжений σ_{xx} и $\sigma_{\beta\beta}$ по толщине, т. е. напряженное состояние приближается к таковому в тонкой пластине без изгибных деформаций.

Характерно, что в случае сварки продольных швов в цилиндрических тонкостенных оболочках, когда изгибные деформации не столь существенны, распределение остаточных сварочных напряжений мало чем отличается от такового в пластинах.

При сварке толстостенных конструкций в распределении остаточных сварочных напряжений в зоне шва появляется определенная особенность, связанная с наличием третьей нормальной составляющей σ_{zz}, направленной по толщине. Величина этой составляющей в стыковых швах зависит от отношения ширины зоны активных пластических деформаций к толщине изделия. На рис. 6.37 [1] приведены результаты расчета распределения остаточных напряжений в зоне однопроходного стыкового шва при двух характерных способах

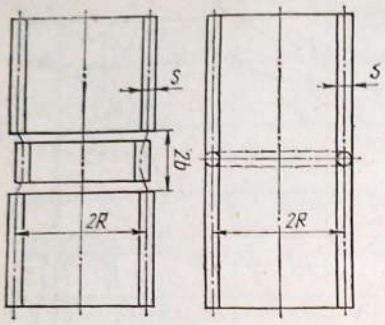


Рис. 6.36. Образование изгибных деформаций в зоне кольцевого шва цилиндрической оболочки.

сварки: ЭЛС с $q_п/S = 87{,}6$ Дж/мм² и дуговой под флюсом с $q_п/S = 220$ Дж/мм². В первом случае ширина шва составляет около 0,4 S, а во втором — примерно 1,2S. Шириной шва оперировать удобнее, чем шириной зоны пластических деформаций, так как последняя хорошо коррелирует с шириной шва, но сама трудно поддается измерению. Видно, что при ширине однопроходного шва $< 0{,}4\,S$ объемность остаточных напряжений уже достаточно заметна.

Максимальные σ_{zz} составляют примерно 0,5 σ_{xx}^{max}. На этом же уровне находятся и максимальные поперечные напряжения σ_{yy}. В то же время при ширине более 1,2 S объемность напряженного состояния уже незначительна. В работе [1] предлагается принимать для стальных пластин критическую ширину однопроходного шва, при которой объемность напряженного состояния можно не учитывать, равной (0,8...1,0) S.

При обычных способах сварки достаточно редко реализуются указанные условия получения объемного напряженного состояния. Исключение составляют лучевые способы сварки с «кинжальным» проплавлением, а также электрошлаковая сварка толстостенных (свыше 100 мм) изделий. Это объясняется тем, что с увеличением толщины свариваемых электрошлаковой сваркой деталей ширина шва растет незначительно. На рис. 6.38 [25] показаны эпюры остаточных напряжений σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{zz} в зоне шва при электрошлаковой сварке стальных пластин большой толщины.

Изложенные результаты относительно остаточных сварочных напряжений касались, главным образом, соединений

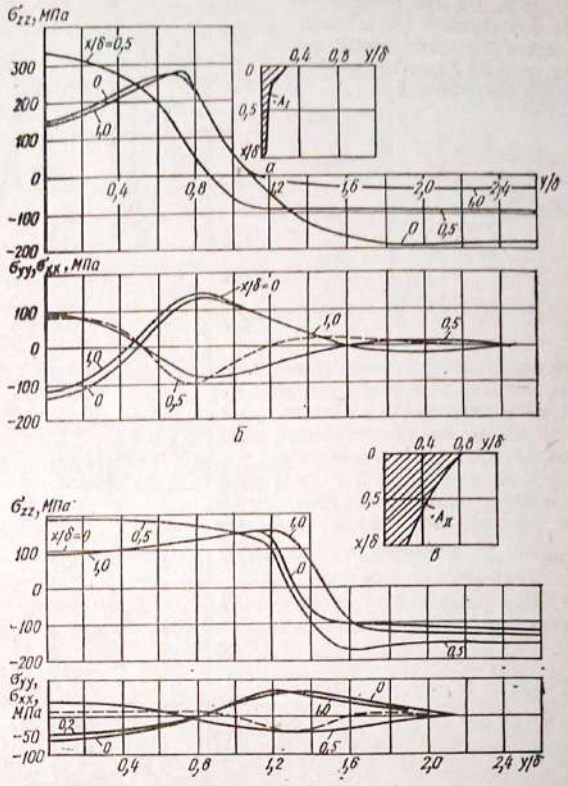


Рис. 6.37. Влияние сечения сварочного шва (*а*, *в*) на распределение остаточных напряжений (*б*, *г*) в пластине на свободных поверхностях ($x/\delta = 0$, $x/\delta = 1{,}0$) и в средней плоскости ($x/\delta = 0{,}5$); штриховые линии — значения σ_{xx}; A_I и A_{II} — точки околошовной зоны с максимальной температурой нагрева 850 °С.

Таблица 6.4. **Варианты круговых швов**

Номер варианта	R_0, мм	R_1, мм	R_2, мм	$U_{уск}$, кВ	I, мА	$v_{св}$, м/ч	S, мм
15	26	55	100	60	90	29	13,5
16	26	47	68,5	60	116	30	19,5
17	45	81	117	100	90	40	19,0

Примечание. R_0 — радиус центрального отверстия в диске. R_1 — радиус по оси шва, R_2 — радиус наружного диска.

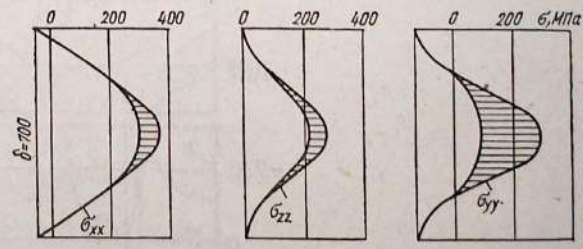
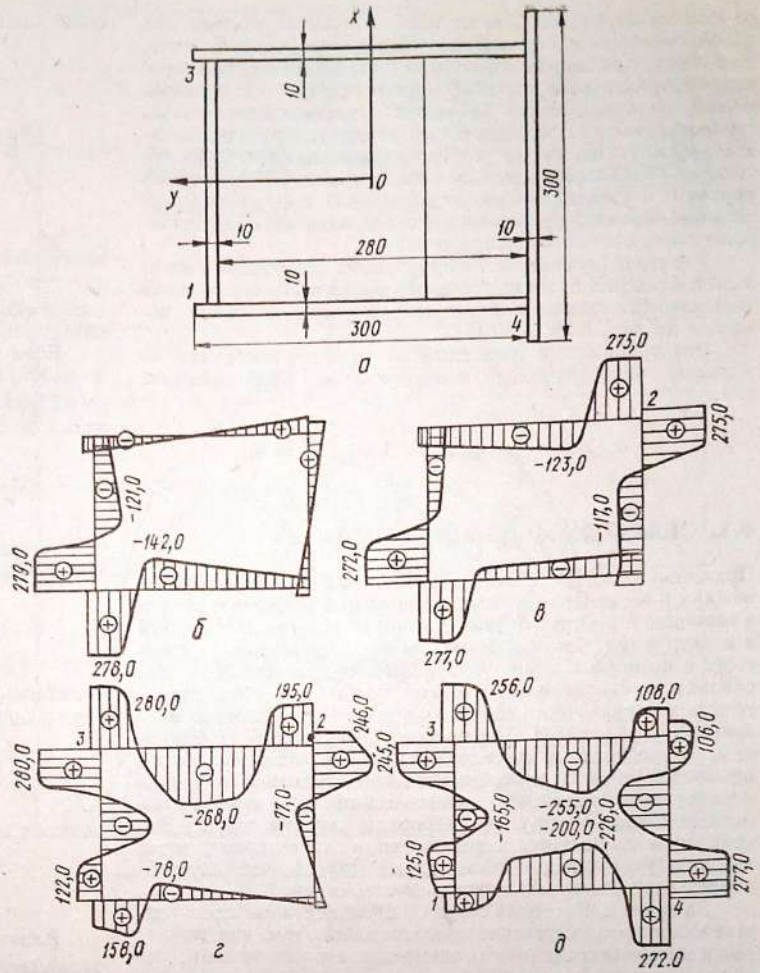


Рис. 6.38. Эпюры остаточных напряжений при электрошлаковой сварке стальных плит толщиной $\delta = 700$ мм [25].

Таблица 6.5. **Варианты кольцевых швов**

Номер варианта	Позиция рис. 6.35	Материал	$2R$, мм	S, мм	$v_{св}$, м/ч	$q_п/S$, Дж/мм²	Способ сварки
1	*а*	Сталь ($\sigma_т = 350$ МПа)	155	8	20,5	125	Дуговая ручная
2	*б*	Титановый сплав ($\sigma_т = 800$ МПа)	85	5	19,0	42,5	ЭЛС
3	*в*	Молибден ($\sigma_т = 440$ МПа)	28	1	—	104	»
4	*г*	Ниобиевый сплав ($\sigma_т = 240$ МПа)	28	1	7,2	64,5	»
5	*д*	АМг6 ($\sigma_т = 162$ МПа)	155	8	—	125	»

Рис. 6.39. Сечение стальной коробчатой балки (*а*) и распределение напряжений (МПа) в ее стенках после сварки первого (*б*), второго (*в*), третьего (*г*) и четвертого (*д*) швов [1].



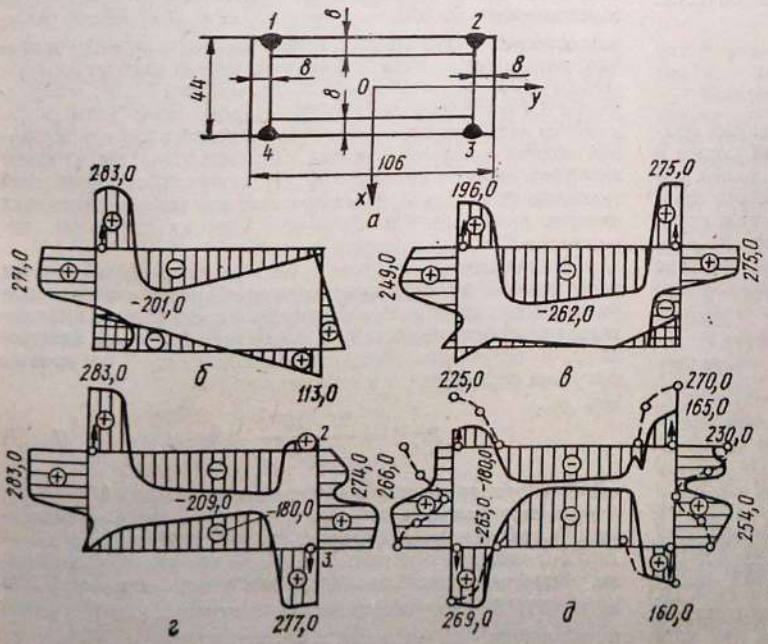


Рис. 6.40. Сечение стальной коробчатой балки небольших размеров (*а*) и распределение напряжений (МПА) после сварки первого (*б*), второго (*в*), третьего (*г*) и четвертого (*д*) швов [1]. Штриховая кривая и значки — экспериментальные результаты.

со стыковыми швами. Тем не менее многое из отмеченного можно перенести и на сварные соединения другого типа. Например, при сварке соединений с угловыми швами сохраняются практически все особенности сварки со стыковыми швами, за исключением небольших участков самого шва, где геометрические особенности могут давать некоторые местные эффекты. При сварке угловыми швами изделий из тонкостенных узких полос вдали от начала и конца полосы в свариваемых элементах реализуется одноосное напряженное состояние, характеризуемое явным преобладанием продольных остаточных сварочных напряжений.

Типичное распределение продольных остаточных напряжений в сечении балок коробчатого профиля, полученных из тонкостенных элементов путем сварки угловыми швами, показано на рис. 6.39, 6.40 [1].

Эти напряжения соответствуют средним значениям по толщине соответствующих элементов. Они уравновешены, т. е.

$$\int_F \sigma_{xx} dF = \int_F \sigma_{xx} y dF = \int_F \sigma_{xx} z dF = 0.$$

6.5. СВАРОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

Приведенные в 6.4 сведения об остаточных сварочных напряжениях в элементах сварных конструкций позволяют судить о величине и распределении остаточных упругих деформаций в конструкции. Такие деформации обычно представляют интерес с позиций размерной стабильности конструкции, поскольку их релаксация в процессе эксплуатации может приводить к искажениям размеров и формы конструкций за пределы допустимых [32]. Однако для многих типов конструкций, в том числе и строительных, более распространенной проблемой является проблема искажения размеров и формы конструкции, связанная с пластическими или суммарными (пластическими и упругими) деформациями при сварке. Это искажение выражается перемещениями характерных точек изделия (узла) по отношению одна к другой, что обусловливает соответствующие формоизменения (см. 6.1).

За время применения сварки в промышленном производстве накопилось достаточно много сведений о том, как геометрия и материал соединяемых элементов, а также способы, режимы и условия сварки влияют на величину основных характеристик формоизменения [3, 8, 17, 18 и др.]. Ниже рассматриваются обобщения различных исследований в этой области.

6.5.1. Формоизменение, обусловленное поперечной усадкой

Поперечная усадка при сварке — весьма существенный фактор, способный приводить к заметным искажениям формы и размеров свариваемых изделий. Механизм образования поперечной усадки на примере однопроходного стыкового сварного шва иллюстрирует схема на рис. 6.41 [8]. На этой схеме показано сечение однопроходного шва с равномерным проплавлением. Предполагается, что реактивное сопротивление поперечным деформациям от уже заваренных участков шва (прихваток), оснастки и т. п. можно представить «упругой» реакцией, как показано на рисунке, т. е.

$$\sigma_{yy} = -K_s u_y (L), \qquad (6.101)$$

где $u_y(L)$ — перемещение в направлении y торца $y = L$; K_s — коэффициент жесткости реактивного сопротивления. Поскольку величина $\sigma_{yy} = \text{const}$ на участке $0 < y < L$, то, пока существует жидкая сварочная ванна, можно считать, что $\sigma_{yy} = 0$, $u_y(L) = 0$. Обозначим через t_s момент времени, когда исчезает последний объем жидкого металла в сварочной ванне в результате выравнивания температуры по сечению образца и теплоотдачи в окружающую среду. В момент $t = t_s$ температурное поле в рассматриваемом сечении $T = T(y, t_s)$. При $t > t_s$ охлаждение твердого металла от температуры $T(y, t_s)$ сопровождается укорочением вдоль оси y; при этом выполняются соотношения

$$\left.\begin{aligned} \sigma_{yy} &= -K_s u_y = -K_s \int_0^l \varepsilon_{yy} dy; \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\sigma_{yy}}{E} + \alpha T(y, t) - \alpha T(y, t_s) + \varepsilon_{\text{пл}}(y, t); \\ \sigma_{yy} &\leqslant \sigma_s (T, \varepsilon_{\text{пл}}), \end{aligned}\right\} \qquad (6.102)$$

где ε_{yy} — полная деформация в точке y в момент t; $\varepsilon_{\text{пл}}$ — пластическая деформация в этой же точке; α — коэффициент температурного удлинения; $\sigma_s(T, \varepsilon_{\text{пл}})$ — поверхность допустимых состояний по напряжениям из условия текучести материала.

Если на стадии охлаждения жесткость K_s нулевая, то из (6.102) следует, что $\sigma_{yy} = 0$, $\varepsilon_{\text{пл}} = 0$, $\varepsilon_{yy} = \alpha T(y, t) - \alpha T(y, t_s)$ и величина свободной поперечной усадки в момент $t > t_s$ (см. рис. 6.41, *в*) определяется как

$$\Delta l = 2\Delta u_y = 2\int_0^L [\alpha T(y, t) - \alpha T(y, t_s)]\, dy. \qquad (6.103)$$

Соответственно при $t \to \infty$ $T(y, \infty) \to 0$ и остаточная свободная поперечная усадка (см. рис. 6.41, *г*)

$$\Delta l = 2\Delta u_y^{\text{ост.св}} = -2\int_0^L \alpha T(y, t_s)\, dy. \qquad (6.104)$$

Подставив вместо $T(y, t_s)$ выражение для мощного быстродвижущегося источника [19]

$$T(y, t_s) = \frac{q_{\text{п}}/S}{2c\gamma\sqrt{\pi a t_s}} \exp\left(-\frac{y^2}{4at_s}\right), \qquad (6.105)$$

получим для $\frac{L}{2\sqrt{at_s}} = \beta_s$ и $\alpha \approx \text{const}$

$$2u_y^{\text{ост.св}} = \frac{\alpha q_{\text{п}}}{Sc\gamma} \operatorname{erf}(\beta_s). \qquad (6.106)$$

Влияние отличного от нуля коэффициента K_s на стадии охлаждения должно приводить к уменьшению величины $u_y^{\text{ост}}$ под влиянием пластических деформаций растяжения, имеющих место при t, близких к t_s, когда высокие температуры обусловливают низкие значения $\sigma_s(T, \varepsilon_{\text{пл}})$ в рассматриваемом сечении. В [10, 18] это влияние, а также прочие упрощения, связанные с описанной моделью, учитываются эмпирическим коэффициентом $\mu_{\text{п}} \leqslant 1{,}0$ в выражении (6.106), как указано в 6.4 (зависимость (6.100)). Кроме этой зависимости известен целый ряд расчетных зависимостей для приближенной оценки поперечной усадки. В частности, заслуживают внимания зависимости Капеля [8], полученные обработкой экспериментальных данных при сварке стыковым швом двух пластин размерами 508 × 152 × 6,4 мм из алюминия, нержавеющей и углеродистой сталей.

Свариваемые кромки имели V-образную разделку с углом раскрытия 60° без притупления. Алюминиевые пластины сваривались неплавящимся электродом в среде аргона, а для остальных использовалась ручная сварка покрытыми электродами. В результате обработки экспериментальных данных получена следующая зависимость:

$$2u_y^{\text{ост}} = \frac{W \cdot 10^{-5}}{v_{\text{св}} S} A \text{ (см)}, \qquad (6.107)$$

где W — электрическая мощность на дуге, Дж, $W = U_{\text{д}} I_{\text{д}}$; S — толщина слоя наплавленного металла, см; A — эмпирический коэффициент, равный 0,340 для алюминия, 0,371 — для нержавеющей стали и 0,290 — для углеродистой стали. Нетрудно увидеть аналогию между выражениями (6.106) и (6.107). В этих зависимостях величина $2u_y^{\text{ост}}$ прямо пропорциональна удельным тепловложениям $q_{\text{п}}/S$. Имеются

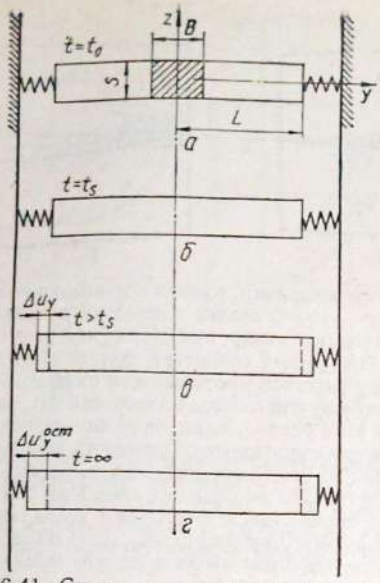


Рис. 6.41. Схема, иллюстрирующая образование поперечной усадки при сварке:
а — начальное состояние ($t = t_0$); *б* — состояние полной кристаллизации зоны шва ($t = t_s$); *в* — состояние охлаждения при $t > t_s$; *г* — полное остывание ($t \to \infty$).

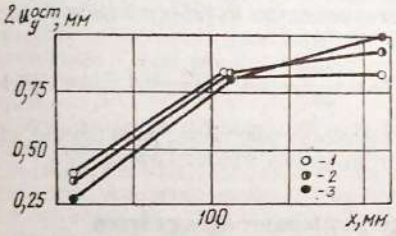


Рис. 6.42. Распределение поперечной усадки $2u_y^{ост}$ по длине сварного шва при сварке в свободном состоянии [3]:
1 — $S = 4$ мм; *2* — $S = 6$ мм; *3* — $S = 8$ мм.

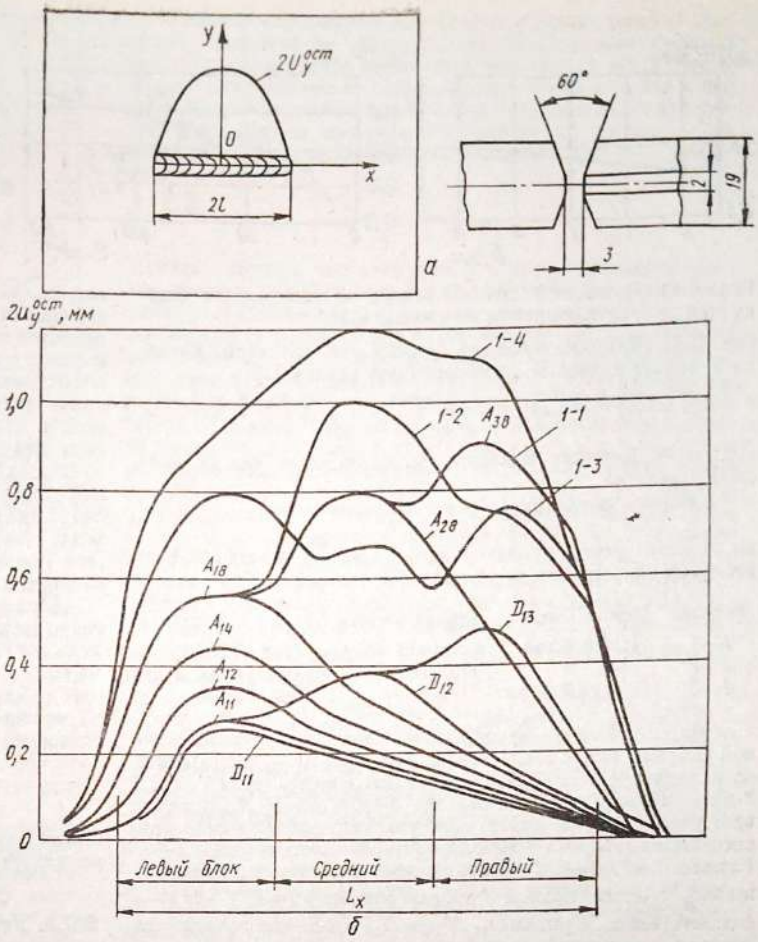


Рис. 6.43. Шов, свариваемый в несвободном состоянии (*а*), и распределение поперечной усадки $2u_y^{ост}$ вдоль шва при различных условиях сварки и на разных стадиях заполнения разделки (*б*). Номер кривой соответствует номеру образца; кривой $A_{m,n}$ обозначен результат при заварке в образце *1—1* *m*-го блока и *n*-го слоя; кривой $D_{1,k}$ обозначен результат для образца *1—4* после заварки *k*-й части шва.

работы, где показано, что эта линейная зависимость не достаточно точно отражает экспериментальные данные. Так, при сварке пластин из алюминиевых сплавов экспериментальные результаты [33] хорошо отражает эмпирическая зависимость

$$2u_y^{ост} = 2{,}5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{q_п}{S} \right)^{0{,}606}, \qquad (6.108)$$

где $u_y^{ост}$ выражено в мм, $q_п/S$ в кДж/см².

В ряде случаев применяют зависимости, в которых вместо энергетических характеристик сварки используются величины площади сечений наплавленного металла. Такие зависимости считаются более конструктивными при наличии значительных скосов кромок под сварку. Например, Спараген и Эттингер [8] предложили следующую эмпирическую зависимость на основе обобщения большого количества экспериментальных данных:

$$2u_y^{ост} = 0{,}508 \frac{FW}{S} + 0{,}127b, \qquad (6.109)$$

где F — площадь сечения шва, мм²; S — толщина листов, мм; b — зазор, мм.

Распределение поперечной усадки вдоль сварного шва зависит от целого ряда факторов. Для достаточно коротких пластин, свариваемых в свободном состоянии, распределение поперечной усадки вдоль шва достаточно близко к равномерному. Однако с увеличением длины шва в определенной степени за счет поворота пластин относительно друг друга наблюдается неравномерное распределение поперечной усадки. На рис. 6.42 приведены данные из [33], иллюстрирующие сказанное на примере сварки пластин длиной 220 мм, шириной 125 мм и толщиной 4—8 мм из алюминиевого сплава 4043.

В случае заварки стыкового шва в виде щели ограниченной длины в большой пластине (рис. 6.43, *а*) распределение поперечной усадки вдоль шва весьма неравномерное. На рис. 6.43, *б* приведены экспериментальные данные [8] о величине $2u_y^{ост}(x)$ для пластины из углеродистой стали размерами 19 × 800 × 1200 мм с подготовленной для заварки в средней части щелью длиной $l = 500$ мм. Форма разделки кромок показана на рис 6.43, *а*. Сварка велась вручную покрытыми электродами. Каждая кривая на рис. 6.43, *б* соответствует определенным условиям сварки либо стадии заполнения разделки. Номер кривой определяет номер образца. Образцы *1—1*, *1—2*, *1—3* соответствуют варианту заварки щели блочным методом. Длина блоков составляет $l/3 = 167$ мм. Завар-

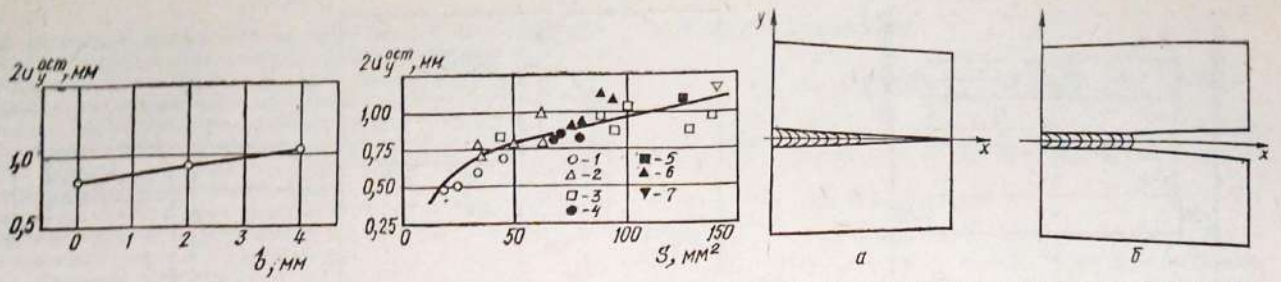


Рис. 6.44. Влияние величины зазора на поперечную усадку при сварке алюминиевого сплава [33].

Рис. 6.45. Влияние площади сечения наплавленного металла и формы разделки на поперечную усадку [33]:
1 — $S = 4$ мм²; $\theta = 60°$; *2* — $S = 6$ мм², $\theta = 60°$; *3* — $S = 8$ мм², $\theta = 60°$; *4* — $S = 6$ мм², $\theta = 30°$; *5* — $S = 6$ мм², $\theta = 90°$; *6* — $S = 6$ мм², $\theta = 60°$; *7* — $S = 6$ мм², $\theta = 120°$.

Рис. 6.46. Влияние поворота на поперечную усадку концевого участка:
а — в сторону уменьшения; *б* — в сторону увеличения.

ка каждого блока производилась за восемь проходов. При этом очередность заварки блоков была следующей:

Образец	Первая очередь	Вторая очередь	Третья очередь
1—1	Левый блок	Средний блок	Правый блок
1—2	» »	Правый блок	Средний блок
1—3	Средний блок	» »	Левый блок

Для образца (*1—4*) сварной шов заваривался многослойной сваркой напроход. Кривые A_{11}, A_{12},..., A_{18} показывают распределение поперечной усадки после завершения 1, 2,..., 8-го слоя в первом блоке образца *1—1*. Кривая A_{28} показывает распределение поперечной усадки после 8-го слоя второго блока, A_{38} — то же для третьего блока образца *1—1*. Кривые *1—2*, *1—3*, *1—4* показывают распределение величины $2u_y^{ост}$ после полной заварки образцов *1—2*, *1—3*, *1—4* соответственно. Кривые D_{11}, D_{12} и D_{13} соответствуют заварке первого слоя первой, второй и третьей частей шва для образца *1—4*. В рассматриваемом достаточно характерном примере распределение поперечной усадки шва меняется в процессе выполнения сварки. Однако конечные результаты меняются мало, несмотря на существенное изменение порядка сварки, и в основном определяются объемом наплавленного металла.

Некоторое влияние на величину поперечной усадки оказывает зазор между кромками при сварке стыковых швов, что иллюстрирует рис. 6.44 по данным [33] для сварки встык пластин из алюминиевого сплава. По данным этой же работы на рис. 6.45 показано влияние формы разделки кромок на величину $2u_y^{ост}$ в зависимости от объема наплавленного металла. Достаточно однозначно проявляется главная линия влияния площади сечения наплавленного металла при различных толщинах и разделках кромок. Значительное влияние на распределение и величину поперечной усадки при сварке протяженных стыковых швов оказывает поворот свариваемых элементов друг относительно друга, как показано на рис. 6.46. Перемещения поворота могут как уменьшать (*а*), так и увеличивать (*б*) поперечную усадку в концевых участках сварного шва. Обычно первое наблюдается при малых скоростях сварки (например, ручная или электрошлаковая сварка), а второе — при больших скоростях заполнения разделки шва напроход (например, при сварке под флюсом на мощных режимах). При малых скоростях сварки существенное остывание первых участков протяженного стыкового шва приводит к тому, что впередилежащий зазор как бы уменьшается на величину этой усадки. Если же зазор отсутствует, то последующие участки свариваются в условиях поперечного сжатия от остывших предыдущих участков, т. е. поперечная усадка нарастает по мере выполнения шва. При больших скоростях сварки остывание шва и поперечная усадка происходят одновременно на большой длине шва, но с определенным температурным градиентом вдоль шва, что приводит к раскрытию впередилежащих кромок.

Поперечная усадка от угловых швов происходит аналогично рассмотренному для стыковых швов. Например, для таврового соединения (рис. 6.47), соединяющего ребра жесткости с обшивкой, поперечную усадку от приварки отдельного ребра с одним швом, выполненным на погонной энергии $q_п$, можно оценить по зависимости (6.106) с поправкой на долю тепла, уходящего в ребро, т. е.

$$2u_y^{ост} = \frac{\alpha q_п}{Sc\gamma}\,\mu\,\frac{2\delta_0}{\delta_р + 2\delta_0}. \qquad (6.110)$$

Общее поперечное укорочение полотнища равно сумме поперечных укорочений от приварки каждого ребра.

6.5.2. Угловые деформации при сварке

Угловые деформации при сварке возникают обычно вследствие неравномерного нагрева соединения по толщине и, следовательно, неравномерной поперечной усадки по толщине соединяемых деталей.

При сварке стыковых швов угловые деформации особенно часто проявляются при заполнении разделок шва, когда объемы наплавленного металла достаточно большие. На рис. 6.48, *б* [8] приведены результаты измерения угловых деформаций, зависящих от заполнения разделки стыкового шва кругового образца из углеродистой стали толщиной 19 мм (рис. 6.48, *а*). Рассмотрены пять вариантов разделки, определяемых величинами h_1 и h_2 при $h_3 = 2$ мм:

Вариант	
1	$h_1 = 8{,}5$ мм, $h_2 = 8{,}5$ мм
2	$h_1 = 11$ мм, $h_2 = 6$ мм
3	$h_1 = 13$ мм, $h_2 = 4$ мм
4	$h_1 = 15$ мм, $h_2 = 2$ мм
5	$h_1 = 17$ мм, $h_2 = 0$

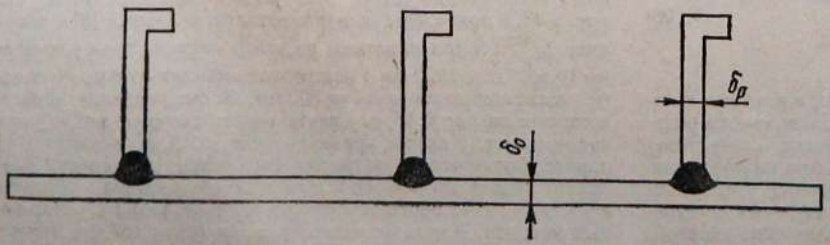


Рис. 6.47. Тавровое соединение с угловыми швами, соединяющими ребра жесткости с обшивкой.

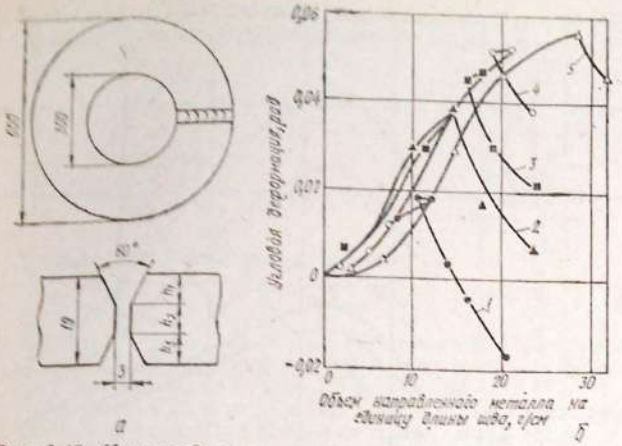


Рис. 6.48. Круговой образец со стыковым швом (*а*) и результаты измерения угловых деформаций (*б*) для различных вариантов сочетания размеров h_1, h_2, h_3 в зависимости от объема наплавленного металла на единицу длины шва. Номер кривой соответствует номеру варианта [8].

Видно, что разделка менялась от симметричной по толщине X-образной до явно несимметричной Y-образной. Сначала разделка заполнялась со стороны h_1, а затем со стороны h_3. Сварка велась вручную покрытыми электродами. Симметричная разделка не обеспечивает минимальные угловые деформации, если сначала полностью заваривается одна сторона, а затем другая. Вклад заварки второй стороны более существен. Деформации минимальны при размерах разделки, близких к приведенным в варианте 2, когда $h_1/h_2 = 1{,}5...2{,}0$. Это отношение изменяется в зависимости от толщины свариваемых элементов.

Интенсивная программа исследований угловых деформаций при сварке стыковых швов проведена судостроительной ассоциацией Японии [8]. На рис. 6.49 приведены рекомендации относительно оптимальных соотношений между объемами наплавленного с одной и другой стороны металла (на единицу длины шва) W_1/W_2 при сварке в свободном и закрепленном состояниях в зависимости от толщины свариваемых листов в случае двусторонней разделки кромок. Видно, что сварка основного шва в закрепленном состоянии требует меньшей компенсации с обратной стороны для устранения угловых деформаций, т. е. бо́льших отношений W_1/W_2.

Угловые деформации при сварке угловых швов — достаточно характерное явление при изготовлении сварных конструкций, особенно панельного типа (рис. 6.50). Угловые деформации обшивки от сварных швов присоединения к ней ребер жесткости вызывают типичное искажение формы панели в виде местных прогибов обшивки между ребрами. При расстоянии между ребрами a максимальный прогиб в центре между ребрами [7]

$$f = \frac{1}{4}\beta a. \qquad (6.111)$$

Следует отметить, что величина β в рассматриваемой конструкции меньше величины β_0, соответствующей сварке таврового соединения в свободном состоянии, поскольку изгибная жесткость обшивки действует аналогично реактивному сопротивлению для поперечной усадки. Экспериментальные исследования и обобщения легче выполнить относительно β_0, поэтому имеющийся экспериментальный материал связан главным образом с этой величиной. Типичные результаты из [8] представлены на рис. 6.51 для стали и на рис. 6.52 — для алюминиево-магниевого сплава. Здесь в качестве аргументов выступают масса наплавленного металла углового шва на единицу длины W и толщина свариваемого элемента обшивки. Используют и другие представления. В частности, в работах [17, 18] вместо размеров сечения наплавленного металла используют энергетические характеристики сварочного нагрева с учетом толщины S изгибаемой обшивки. Зависимость β_0 от величины $q_п/S^2$ и скорости сварки $v_{св}$ для стальных изделий приведена на рис. 6.53. В [8] предложена аналитическая зависимость

$$\beta_0 = c_1 (I_{св}/S\sqrt{v_{св}S})^{m+1} \exp(-c_2 I_{св}/S\sqrt{v_{св}S}) \text{ (рад)}, \qquad (6.112)$$

где S — толщина пластины, см; c_1, m, c_2 — характеристики, определяемые типом применяемых электродов. В частности, для ильменитовых электродов диаметром 4 мм $c_1 = 0{,}0885 \times \times 10^{-6}$, $c_2 = 6 \cdot 10^{-3}$, $m = 1{,}5$. Переход от величины β_0 к β в реальных соединениях обычно осуществляется на основе опытных данных. Применительно к конструктивным элементам, представленным на рис. 6.50, К. Мацубуши предложил зависимость

$$\beta = \beta_0 \frac{1}{1 + ES^3/\sigma(1-\nu^2)ac}, \qquad (6.113)$$

где c — так называемый коэффициент податливости для угловых деформаций, имеющий размерность (Н · мм)/мм и

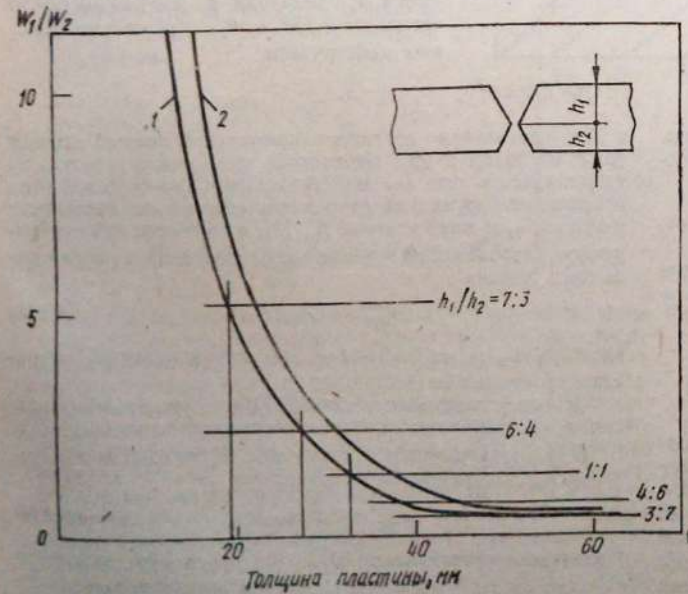
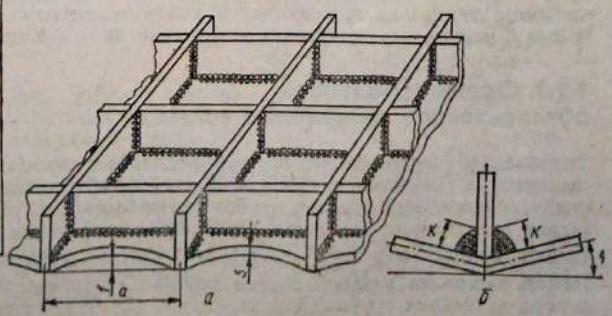
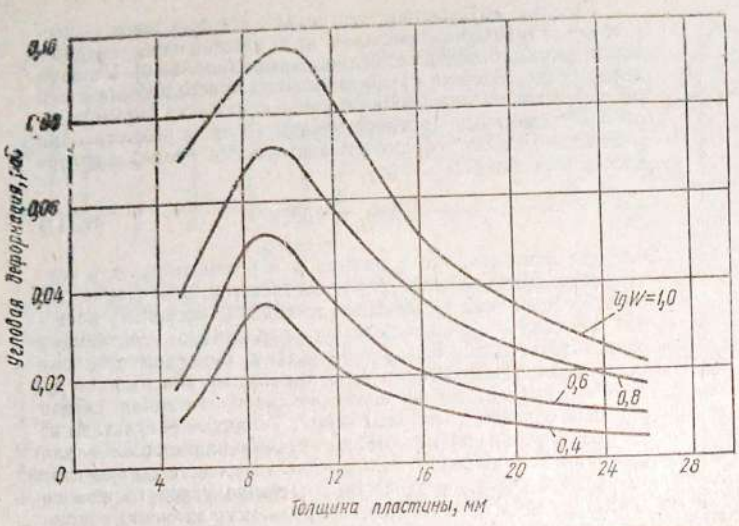
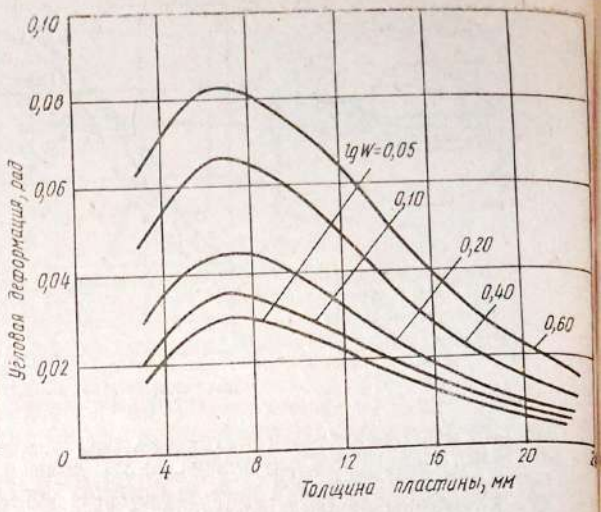


Рис. 6.49. Рекомендации относительно оптимальных отношений W_1/W_2 в зависимости от толщины свариваемых пластин в свободном (*1*) или закрепленном (*2*) состоянии [8].

Рис. 6.50. Конструкция панельного типа (*а*) и схема угловых деформаций от приварки ребер к обшивке (*б*).







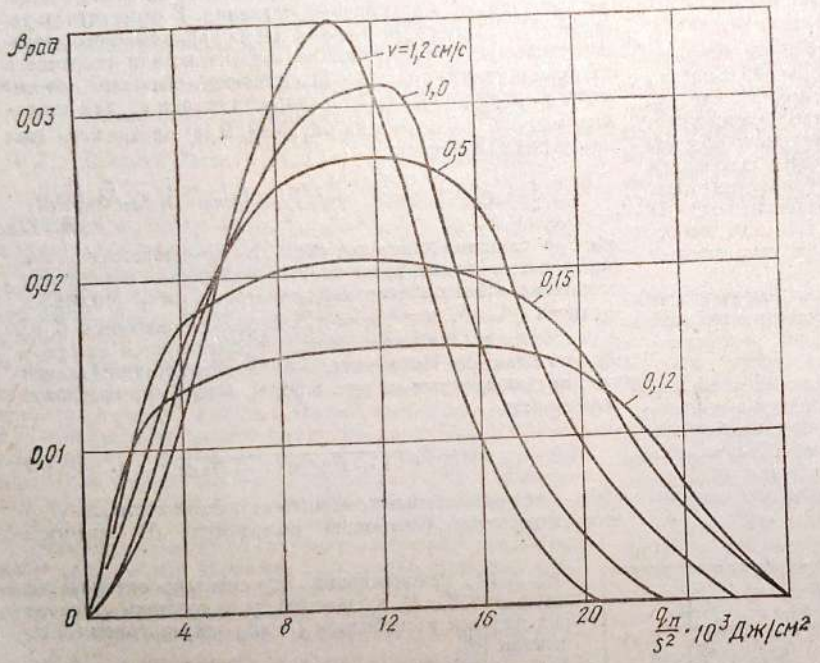


Рис. 6.51. Значения угловых деформаций в зависимости от толщины стальной пластины и массы наплавленного металла W на единицу длины углового шва [8].

Рис. 6.52. Значения угловых деформаций в зависимости от толщины обшивки из алюминиево-магниевого сплава и массы наплавленного металла W на единицу длины углового шва [8].

Рис. 6.53. Значения β_a в зависимости от величины $q_п/S^2$ и $v_{св}$ при сварке стальных конструкций.

определяемый экспериментально для данных условий сварки и толщины пластин. Для низкоуглеродистой стали в [8] предлагается следующая эмпирическая зависимость:

$$c = \frac{9{,}8S^4}{1 + 0{,}2W} \text{ (Н)}, \qquad (6.114)$$

где W — масса наплавленного металла углового шва на один сантиметр длины шва, г. Величину W в зависимости от катета шва K (мм) можно определить по формуле $W = 0{,}058K^2$.

6.5.3. Формоизменение, обусловленное продольной усадкой

С продольной усадкой обычно связано продольное укорочение свариваемых элементов, а также различные изгибные деформации, обусловленные смещением оси шва от плоскостей симметрии свариваемых элементов. Продольное укорочение на единицу длины шва $\varepsilon_{xx}^{ост}$ является обычно функцией свойств материала, режимов сварки, формы и величины поперечного сечения свариваемых элементов. Для соединений с угловыми швами с достаточно компактной формой сечения (сварные балки и пр.) продольное укорочение (усадка) на единицу длины шва для конкретного материала может быть представлено функцией отношения сечений наплавленного металла A_W и всего сечения A_p [8], в частности при симметричном расположении швов относительно центра рассматриваемого сечения

$$\varepsilon_{xx}^{ост} = cA_W/A_p, \qquad (6.115)$$

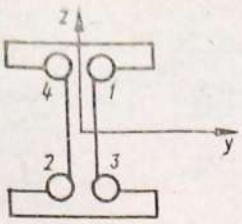
где c при $A_W/A_p < 0{,}05$ является обычно константой материала. Для стали $c \approx 0{,}025$.

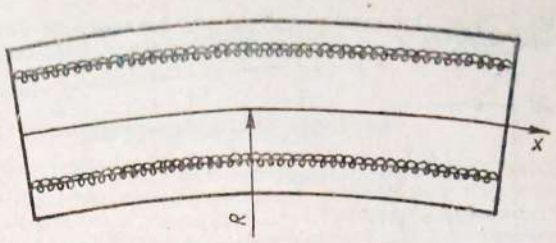
Имеются зависимости типа (6.115), основанные на энергетических параметрах процесса сварки вместо площади A_W. В [17, 18] используется понятие объема продольного укорочения $V_{ук}$, определяемого выражением

$$V_{ук} = 0{,}29\alpha q_п/c\gamma. \qquad (6.116)$$

Продольное укорочение $\varepsilon_{xx}^{ост}$ (при условии, что центр тяжести сечения совпадает с центром объема укорочения) с

Рис. 6.54. Схема сварной двутавровой балки с четырьмя поясными швами.





помощью этого параметра выражается как

$$\varepsilon_{xx}^{\text{ост}} = V_{\text{ук}}/A_p. \qquad (6.117)$$

На основе данных об объеме укорочения (6.116) строятся приближенные зависимости и для оценки не только продольного укорочения, но и изгибных деформаций.

На рис. 6.54 приведена схема сварной балки двутаврового сечения с четырьмя поясными (продольными) швами. Координаты центра объема укорочения для каждого шва z_i, y_i ($i = 1, 2, 3, 4$) примерно совпадают с центром углового шва. Кривизны $\varkappa_z^{\text{ост}}$, $\varkappa_y^{\text{ост}}$ (соответственно в плоскостях Oxz и Oyz), а также удлинение $\varepsilon_{xx}^{\text{ост}}$ по линии $y = z = 0$ определяются из следующих уравнений (F — площадь сечения):

$$\left.\begin{aligned}
&\varepsilon_{xx}^{\text{ост}} \int_F EdF + \varkappa_z^{\text{ост}} \int_F EzdF + \varkappa_y^{\text{ост}} \int_F EydF = \sum_{i=1}^{4} EV_{\text{ук}i};\\
&\varepsilon_{xx}^{\text{ост}} \int_F EzdF + \varkappa_z^{\text{ост}} \int_F Ez^2dF + \varkappa_y^{\text{ост}} \int_F EyzdF =\\
&\qquad = \sum_{i=1}^{4} EV_{\text{ук}i}z_i;\\
&\varepsilon_{xx}^{\text{ост}} \int_F EydF + \varkappa_z^{\text{ост}} \int_F EzydF + \varkappa_y^{\text{ост}} \int_F Ey^2dF =\\
&\qquad = \sum_{i=1}^{4} V_{\text{ук}i}y_i.
\end{aligned}\right\} \qquad (6.118)$$

Уравнения (6.118) учитывают возможность того, что сечение балки состоит из различных материалов, т. е. $E = E(y, z)$ и начало координат $z = y = 0$ выбрано произвольно. В тех случаях, когда $E = \text{const}$ и начало координат совпадает с центром тяжести сечения, уравнения (6.117) существенно упрощаются:

$$\left.\begin{aligned}
&\varepsilon_{xx}^{\text{ост}} = \frac{1}{F}\sum_{i=1}^{4} V_{\text{ук}i};\\
&\varkappa_z^{\text{ост}} = \frac{1}{I_z}\sum_{i=1}^{4} V_{\text{ук}i}z_i,\ I_z = \int_F z^2dF;\\
&\varkappa_y^{\text{ост}} = \frac{1}{I_y}\sum_{i=1}^{4} V_{\text{ук}i}y_i,\ I_y = \int_F y^2dF.
\end{aligned}\right\} \qquad (6.119)$$

Такой подход дает достаточно хорошие результаты при однопроходной сварке. В тех случаях, когда сварные швы (угловые или стыковые) выполняются в несколько проходов, объемы укорочения от каждого прохода не суммируются, поскольку последующий проход в определенной степени релаксирует укорочение от предыдущих. Поэтому независимое суммирование оправдано только в том случае, если зоны термического влияния соседних проходов не перекрывают друг друга, как это показано на рис. 6.54 для поясных швов *1*, *2*, *3*, *4*, достаточно удаленных друг от друга. Для многопроходных швов обычно используется объем укорочения от наиболее мощного прохода. Продольное укорочение при сварке балочных конструкций может сопровождаться крутильными деформациями вокруг оси балки [1, 3, 6]. Последнее связано с неодновременностью процесса сварки вдоль оси балки, что приводит к появлению касательных напряжений и крутящих моментов, вызывающих поворот сечений стержня друг относительно друга. В качестве иллюстрации на рис. 6.55, *б* приведены данные [1] по кинетике изменения во времени угла закручивания $\theta(l)$ концевого сечения $z = l_z$ стержня-балки, состоящего из уголка $50 \times 50 \times 5$ мм, привариваемого к полосе 125×8 мм (рис. 6.55, *а*). Длина стержня 650 мм. Материал — низкоуглеродистая сталь. Эти данные показывают, что для стержней открытого профиля крутильные деформации наиболее значительны на стадии сварки, когда имеют место существенные градиенты деформаций по длине стержня. Параметры режима сварки могут заметно влиять на деформацию кручения, особенно для стержней, у которых центр тяжести сечения расположен вблизи центра нагрева. Определенное представление об этом дает рис. 6.56. Из рисунка видно, что для стержня изменение погонной энергии в пределах 12—40 кДж/см приводит к существенному изменению угла закручивания $\theta(l)$. Вместо положительных значений $\theta(l)$ при малых $q_{\text{п}}$ возникают отрицательные $\theta(l)$ при больших $q_{\text{п}}$, что связано с изменением положения центра пластических деформаций относительно центра тяжести. Увеличение расстояния от центра нагрева до центра тяжести сечения стержня приводит к более монотонному влиянию $q_{\text{п}}$ на величину $\theta(l)$ (рис. 6.57). Из рис. 6.56 видно, что увеличение скорости приводит к снижению остаточных значений $\theta(l)$. Результаты исследований в [1, 3, 6] показывают, что деформации кручения балок от сварки поясных швов, связанные с продольной усадкой, находятся в сложной зависимости от режима и условий сварки.

В отличие от изгибных деформаций крутильные деформации определяются не только местоположением (в пределах сечения) центра объемов продольного укорочения, но и направлением результирующего момента касательных напряжений в каждом сечении в процессе выравнивания температуры. Последнее предсказать (как обычно можно сделать для изгибающих моментов) затруднительно, поэтому трудно оценить не только величину, но и направление крутильных деформаций без конкретных исследований [1, 6].

Следует отметить еще одно характерное проявление формоизменения элементов сварных конструкций, обусловленное продольной усадкой при сварке,— это так называемые деформации корсетности, наблюдаемые при сварке кольцевых швов на замкнутых тонкостенных оболочках вращения (см. рис. 6.36). На рис. 6.58 приведены достаточно характерные

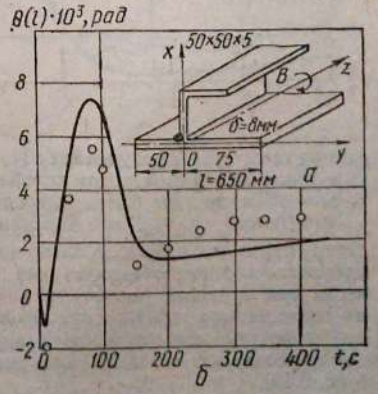


Рис. 6.55. Кинетика изменения угла закручивания концевого сечения $\theta(l)$ стальной балки открытого профиля по расчетным и экспериментальным данным при $q_{\text{п}} = 18{,}5$ кДж/см, $v_{\text{св}} = 21$ м/ч.

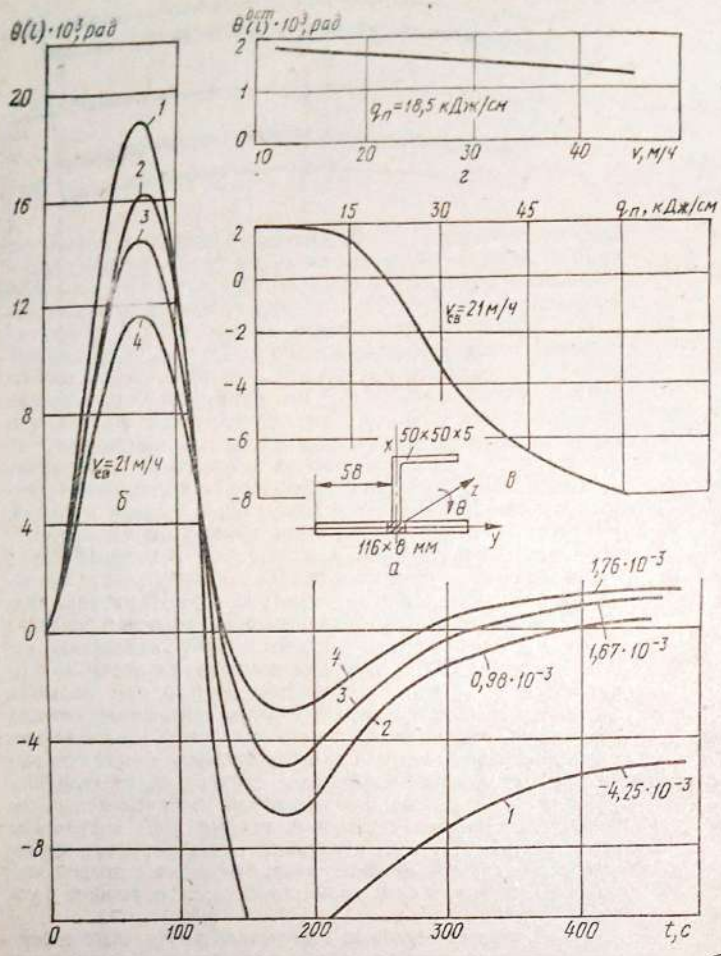
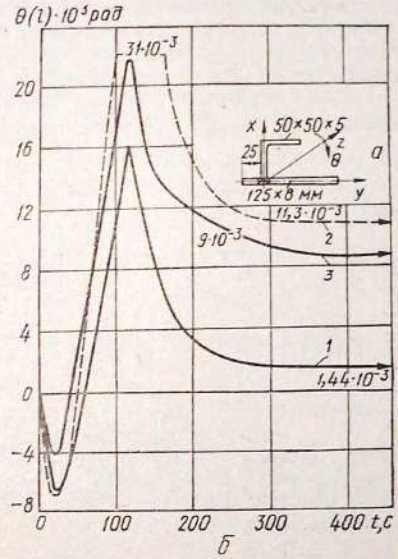


Рис. 6.56. Влияние погонной энергии $q_п$ сварного стержня (*а*) на кинетику угла закручивания θ (*l*) при $v_{св} = 21$ м/ч (*б*) и остаточные значения θ (*l*) в зависимости от $q_п$ (*в*) и $v_{св}$ (*г*) [1]:

1 — $q_п = 27{,}8$ кДж/см; *2* — 20,8 кДж/см; *3* — 18,5 кДж/см; *4* — 13,3 кДж/см.

Рис. 6.57. Влияние погонной энергии $q_п$ сварного стержня (*а*) на кинетику угла закручивания θ (*l*) (*б*) [1]:

1 — $q_п = 18{,}5$ кДж/см; *2* — 37 кДж/см; *3* — $q_п = 9{,}2$ кДж/см.



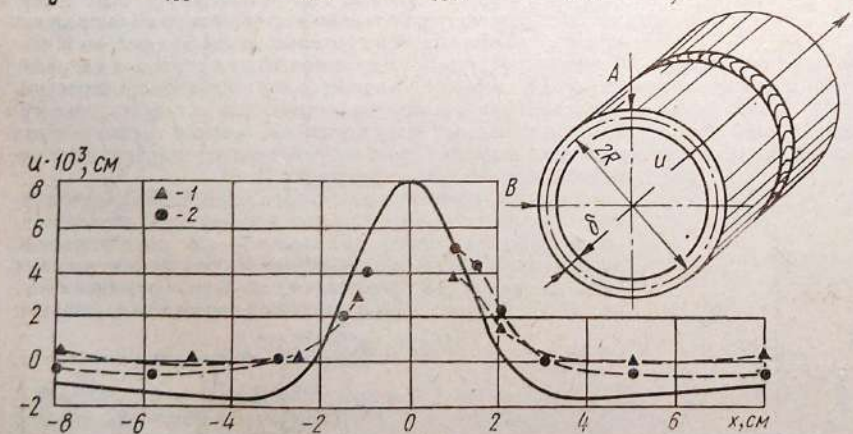
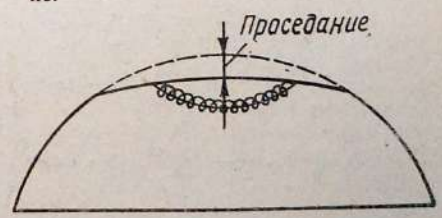


Рис. 6.58. Остаточные радиальные перемещения в цилиндрической оболочке-трубе при сварке кольцевого шва:

1 — в направлении *A*; *2* — в направлении *B*.

Рис. 6.59. Проседание при сварке кольцевого шва в сферической оболочке.



данные такого типа, полученные в [1] для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом кольцевого шва на трубе $2R \times S = 75 \times 5$ мм из низкоуглеродистой стали при $q_п/S = 40$ кДж/см², $v_{св} = 17$ м/ч. В зоне шва оболочка проседает к центру кривизны, что обусловлено продольным и поперечным укорочением от сварочного нагрева. Подобное явление имеет место при приварке различных патрубков, горловин и т. п. на тонкостенных сферических оболочках, когда продольное укорочение кольцевой зоны вокруг кругового шва приводит к проседанию определенного участка оболочки [13, 34] (рис. 6.59).

6.5.4. Формоизменение, обусловленное деформациями выпучивания (потери устойчивости) тонкостенных элементов сварных конструкций

В п. 6.4 отмечалось, что в тонкостенных элементах наряду с остаточными растягивающими сварочными напряжениями всегда имеют место зоны сжатия как для продольных, так и для поперечных напряжений. При малых толщинах в зонах сжимающих напряжений возможна потеря устой-

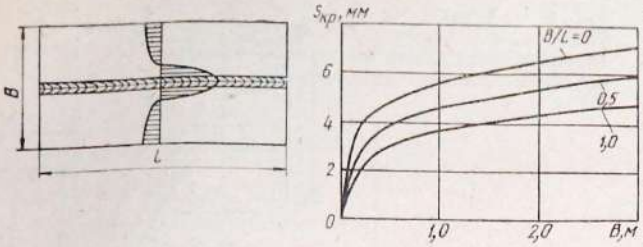


Рис. 6.60. Зависимость значений $S_{кр}$ при сварке стальных пластин (рисунок слева) от B и B/L [8]

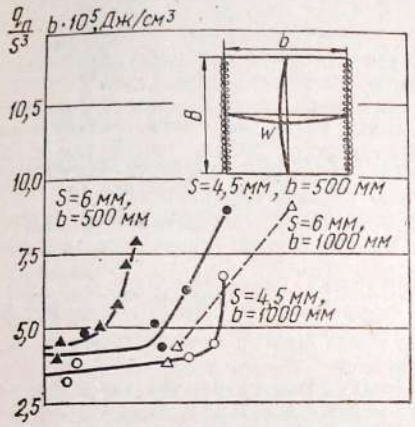


Рис. 6.61. Величина прогиба w в центре панели для различных значений $q_п$, S, b [8].

чивости по той или иной форме с образованием соответствующей бухтиноватости. На рис. 6.60, *б* (по данным Ватанабе и Сато) приведены критические значения толщины $S_{кр}$ стальных листов, свариваемых в полотнище (схема *а*), в зависимости от его длины и ширины. Из этих данных видно, что потеря устойчивости при сварке полотнищ — достаточно реальное явление при толщинах меньше 6—7 мм. Выпучивание также достаточно характерное явление при сварке тонкостенных панелей. Здесь большое значение имеют энергетические характеристики приварки ребер жесткости и размеры ячеек. Такие исследования интенсивно велись в Японии в конце 70-х годов [8, 35]. Приведенные на рис. 6.61 данные для низкоуглеродистой стали [8] показывают влияние погонной энергии сварки $q_п$, толщины панели S и размера ячеек b на величину выпучивания в центре панели w. Экспериментальные данные достаточно компактно укладываются, если относительные значения w/S представлять в зависимости от величины $\frac{q_п}{S^3} b$. Критические тепловложения определяются из условия $\frac{q_п^{кр}}{S^3} b \approx (15...19) \cdot 10^5$ Дж/см³.

6.6. КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ СВАРКЕ

Необходимость регулировать уровень остаточных напряжений в сварных конструкциях, а также формоизменения, связанные со сварочными деформациями, составляют одну из самых характерных проблем производства сварных конструкций. Специалистами накоплен большой опыт в решении различных вопросов этой проблемы. Разработано большое количество методов и приемов для снижения уровня остаточных сварочных напряжений и предупреждения (устранения) формоизменения конструкций от сварочных деформаций. Эти мероприятия делятся на конструктивные и технологические. Следует отметить, что далеко не всегда методы и приемы предупреждения (устранения) сварочных деформаций формоизменения конструкций являются одновременно и методами понижения уровня остаточных сварочных напряжений, и наоборот.

6.6.1. Конструктивные мероприятия

1. При проектировании строительных металлических конструкций необходимо стремиться к уменьшению числа сварных соединений за счет применения многомерного листового и профильного проката и замены конструкций с приваренным набором на гофрированные или из прессованных панелей.

2. Поскольку поперечная усадка на единицу длины сварного шва всегда больше продольной, целесообразно основное количество сварных соединений располагать параллельно тому направлению, в котором желательно иметь минимальные деформации укорочения.

3. Для уменьшения изгибных и крутильных деформаций сварные соединения следует располагать симметрично относительно осей симметрии соответствующих сечений.

4. Для уменьшения объемов укорочения следует использовать сварные соединения с минимальным объемом наплавленного металла, т. е. для стыковых соединений предпочитать Х-образную разделку — V-образной, «глубокую разделку» — Х-образной и многопроходные швы — однопроходным.

5. Для соединений с угловыми швами рекомендуется использовать оптимальные размеры катетов исходя из условий прочности и технологичности.

6. Контактная точечная и шовная сварка вызывает значительно меньший нагрев и, следовательно, меньшие деформации, чем электродуговая сварка. Поэтому необходимо стремиться к увеличению объема применения контактной сварки. По этой же причине следует ограничивать объемы применения газовой сварки и ручную сварку заменять автоматической и полуавтоматической.

7. Если конструкция собирается и сваривается из предварительно сваренных и выправленных узлов, то деформации ее определяются только усадкой при сварке монтажных швов. Поэтому при проектировании сварных конструкций следует предусмотреть возможность разбиения их на отдельные секции и узлы, для которых точность изготовления может быть достигнута достаточно простыми средствами при минимальных затратах труда и времени.

Указанные основные конструктивные мероприятия способствуют снижению деформаций формоизменения конструкций при сварке, но обычно не снижают уровень остаточных сварочных напряжений. Среди имеющихся достаточно огра-

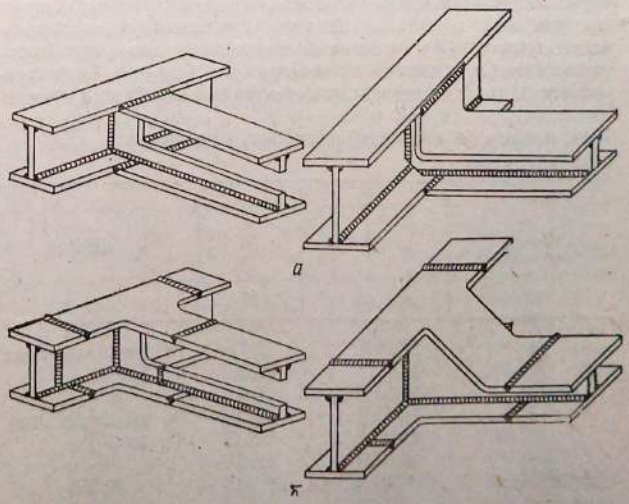


Рис. 6.62. Примеры сложных сварных узлов:
а — сварные швы в зоне геометрических концентраторов напряжений; *б* — сварные швы вынесены из зоны геометрических концентраторов.

ниченных возможностей в этом направлении следует отметить следующие. Необходимо избегать применения сварных узлов, сварка которых приводит к объемному напряженному состоянию, когда условия для релаксации напряжений ограниченные. По этой же причине нежелательно располагать сварные швы вблизи геометрических неоднородностей, обусловливающих концентрацию напряжений в элементах сварной конструкции (рис. 6.62).

6.6.2. Технологические мероприятия

Известные технологические мероприятия по снижению остаточных сварочных напряжений и формоизменения конструкций при сварке можно условно разделить на две группы: мероприятия, не требующие дополнительных компенсационных воздействий, и мероприятия, связанные с дополнительными силовыми или температурными воздействиями на конструкцию.

Основное содержание мероприятий первой группы состоит в рациональном выборе последовательности сборки и сварки конструкции, а также режимов сварки, обеспечивающих качественное формирование швов заданного сечения и минимальные уровни остаточных напряжений и формоизменение конструкции.

Мероприятия второй группы сопряжены с привлечением дополнительных силовых или температурных воздействий, которые, в зависимости от времени их приложения по отношению к времени сварки, можно разделить на дополнительные воздействия до сварки, в процессе сварки и после сварки. С помощью этих мероприятий можно управлять уровнем остаточных напряжений и формоизменением конструкций в широких пределах, однако расходы на их реализацию могут в несколько раз превышать остальные расходы, связанные с изготовлением сварной конструкции. Поэтому в каждом конкретном случае выбор технологических мероприятий требует серьезного внимания при технологической подготовке производства. Большое значение при такой подготовке имеет возможность прогнозирования ожидаемых сварочных деформаций на основе обобщения опытных данных или достаточно надежного расчета. При этом в целом ряде случаев этот прогноз желательно выполнять с учетом реальной стохастичности величин ожидаемых сварочных деформаций, что позволяет более надежно решать вопрос о выборе необходимых технологических мероприятий.

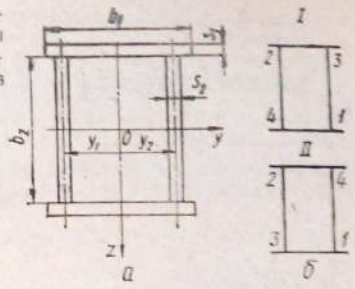
Покажем это на примере изготовления сварной балки коробчатого профиля (рис. 6.63). Обычно сварочные деформации изгиба в таких конструкциях компенсируют путем определенной последовательности выполнения поясных швов. На рисунке показаны две типичные схемы последовательности выполнения четырех поясных швов балки коробчатого сечения с плоскостями симметрии $z = 0$, $y = 0$. Естественно, что полной компенсации деформаций изгиба при этом не

Таблица 6.6. **Средние значения варьируемых характеристик**

Номер варианта	$b_1 = b_2$, см / h_1	$S_1 = S_2$, см / S_1	$y_1 = y_2$, см	$q_п$, кДж/см
1	22	1	7,75	18 (два прохода)
2	44	1	15,5	То же
3	88	1	31,0	»
4	22	1	7,75	36 (один проход)
5	44	1	15,5	То же
6	88	1	31,0	»
Коэффициент вариации	0,010	0,012	0,015	0,060

Примечание. Для всех вариантов $\alpha = 14 \cdot 10^{-6}$ при $\omega_\alpha = 0{,}05$ и $\sigma_т = 300$ МПа при $\omega_\sigma = 0{,}02$.

Рис. 6.63. Коробчатое сечение сварной балки (*а*) и варианты очередности выполнения поясных швов (*б*).



происходит. Следует учитывать, что остаточные кривизны $\varkappa_z$, $\varkappa_y$ на практике являются достаточно случайными величинами вследствие рассеяния в геометрических размерах и свойствах материала заготовок, точностью сборки, отклонениями в режимах сварки. В результате имеется только некоторая вероятность того, что свариваемые балки будут иметь кривизну, не выходящую за пределы заданного допуска.

Приближенно указанная вероятность рассчитывается так [36]:

$$P_\varkappa = \frac{1}{2}\left[1 - \operatorname{erf}\frac{(\bar{\varkappa} - [\varkappa])}{\xi_\varkappa\sqrt{2}}\right] = \frac{1}{2}\left[1 - \operatorname{erf}\frac{1 - B_\varkappa}{\omega_\varkappa\sqrt{2}}\right], \tag{6.120}$$

Здесь $\bar{\varkappa}$ — среднее значение (математическое ожидание) реальной кривизны; $[\varkappa]$ — кривизна, допускаемая техническими условиями; $\xi_\varkappa$ и $\omega_\varkappa = \xi_\varkappa/\bar{\varkappa}$ — соответственно стандарт отклонения и коэффициент вариации кривизны; $B_\varkappa = [\varkappa]/|\bar{\varkappa}|$ — отношение допускаемой величины к математическому ожиданию. В работе [36] применительно к сварным балкам коробчатого сечения изучались величины $\bar{\varkappa}_z$, $\bar{\varkappa}_y$, ω_z, ω_y, характеризующие деформации изгиба в плоскостях $0xz$, $0xy$, а также $\bar{\varepsilon}^0_{xx}$, ω_ε, характеризующие относительное продольное укорочение балки по линии $y = z = 0$. Варьируемыми характеристиками являлись геометрические размеры b_1, b_2, S_1, S_2, y_1, y_2 (см. рис. 6.63), погонная энергия сварки $q_п$, предел текучести материала $\sigma_т$ и температурный коэффициент относительно удлинения α. В табл. 6.6 приведены средние значения указанных характеристик для различных размеров балок и двух величин погонной энергии, соответствующих сварке за два прохода и за один проход. Экспериментальное изучение этих характеристик в условиях судостроительного предприятия показывает, что распределение их величин обычно близко к нормальному закону при коэффициентах вариации, указанных в табл. 6.6. С помощью расчетных методов работы [1] в [36] определяли для каждого варианта из табл. 6.6 значения $\bar{\varkappa}_z$, $\bar{\varkappa}_y$, $\bar{\varepsilon}^0_{xx}$, а также коэффициента вариации этих величин из соотношений

$$\omega_y = \sqrt{\sum_j (A_{jy}\omega_j)^2}; \quad \omega_z = \sqrt{\sum_j (A_{jz}\omega_j)^2};$$

$$\omega_\varepsilon = \sqrt{\sum_j (A_{j\varepsilon}\omega_j)^2}, \tag{6.121}$$

где $A_{jy} = \frac{\partial \varkappa_y}{\partial x_j}\frac{\bar{x}_j}{\bar{\varkappa}_y}$, $A_{jz} = \frac{\partial \varkappa_z}{\partial x_j}\frac{\bar{x}_j}{\bar{\varkappa}_z}$, $A_{j\varepsilon} = \frac{\partial \varepsilon^0_{xx}}{\partial x_j} \times$ $\times \frac{\bar{x}_j}{\bar{\varepsilon}^0_{xx}}$, x_j — варьируемые величины, указанные в табл. 6.6; $\bar{x}_j$ — среднее значение варьируемой величины.

Результаты расчетных исследований приведены в табл. 6.7 для каждого из вариантов, представленных в табл. 6.6, причем рассматривались две схемы последовательности выполнения швов (см. рис. 6.63, *б*). Анализ полученных данных показывает, что средние значения деформаций из-

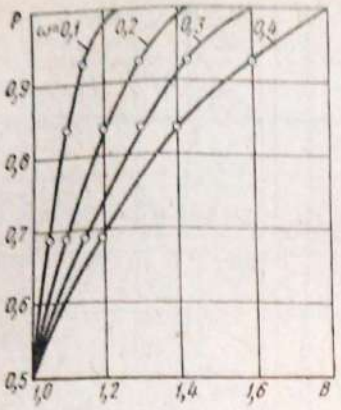


Рис. 6.64. Зависимость вероятности получения точных изделий P от значений ω и $B_\varkappa$.

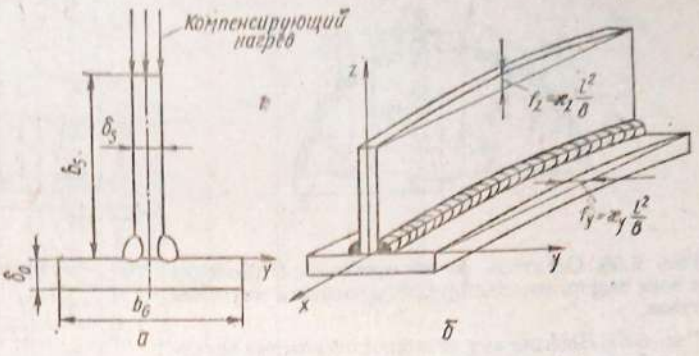


Рис. 6.65. Сечение тавровой балки и место приложения компенсационного нагрева (*а*) для снижения ожидаемых кривизн $\varkappa_z$ (*б*).

гиба (кривизны $\bar{\varkappa}_y$ и $\bar{\varkappa}_z$) существенно зависят от порядка наложения поясных швов, в то время как величина $\bar{\varepsilon}^0_{xx}$ от порядка наложения швов меняется незначительно. Из данных табл. 6.7 видно, что схема I наложения швов более приемлема в тех случаях, когда более высокие требования предъявляются к прямолинейности балки в плоскости Oxz, а схема II — в плоскости Oxy. Видно также, что сварка каждого шва за два прохода дает меньшие деформации, нежели за один проход. Из данных табл. 6.7 следует, что коэффициенты вариации для кривизны изменяются в пределах 0,1—0,5, за исключением отдельных случаев, определяемых большой жесткостью сечения и малыми тепловложениями (варианты 3.I и 3.II), а для $\bar{\varepsilon}^0_{xx}$ — в пределах 0,05—0,13.

Вероятность получения изделий высокой точности при указанных коэффициентах вариации зависит от величины $B_\varkappa = [\varkappa]/|\bar{\varkappa}|$ или $B_\varepsilon = [\varepsilon]/|\bar{\varepsilon}^0_{xx}|$, что достаточно наглядно демонстрирует рис. 6.64, на котором приведены зависимости вероятности получения точных изделий от величин B и ω. Видно, что уменьшение $\omega_\varkappa$, ω_ε и увеличение B_ω, B_ε способствует получению точных изделий и что для получения коробчатых балок в заданном допуске по кривизне с надежностью $P_\varkappa > 0{,}95$ необходимо, чтобы величина $B_\varkappa$ была больше 1,7—1,8.

Обычно допускаемая кривизна сварных балок общего назначения зависит от их длины l и может быть представлена в виде $[\varkappa] = k/l$, где k — нормирующий множитель, равный 0,008—0,010 (соответствует прогибу 1 мм на 1 м длины). При $l = 500$ см значение $[\varkappa] = (16...20) \cdot 10^{-6}$ см$^{-1}$.

В табл. 6.7 приведены значения $P_\varkappa$ по (6.120) для каждого из вариантов. Видно, что условию $P_\varkappa > 0{,}95$ явно не удовлетворяют варианты 1.I, 1.II, 4.I, 4.II, т. е. значительная часть балок этого типа требует дополнительных мероприятий для обеспечения прямолинейности изготовления. Следует отметить, что наличие информации относительно продольного укорочения позволяет более обоснованно на стадии подготовки производства подходить к назначению припуска Δl на длину заготовок, обеспечивающего длину сваренной балки не менее заданной с определенной вероятностью P_ε:

$$\Delta l = -\bar{\varepsilon}^0_{xx} l B_\varepsilon(\omega_\varepsilon, P_\varepsilon), \qquad (6.122)$$

где B_ε при заданных P_ε и ω_ε определяется по рис. 6.64 (в частности, для $P_\varepsilon = 0{,}95$ и $\omega_\varepsilon < 0{,}1$ $B_\varepsilon < 1{,}2$, т. е. здесь роль рассеяния исходных параметров менее значительна, нежели для изгибных деформаций).

В тех случаях, когда прогнозирование показывает, что за счет выбора порядка сборки и сварки невозможно обеспечить заданную точность сварного узла (конструкции), можно заложить в технологию дополнительные воздействия для компенсации сварочных деформаций при сварке. Однако целесообразность таких воздействий в каждом конкретном случае должна быть обоснована как технически, так и экономически. Например, в случае изготовления тавровой балки (рис. 6.65) компенсировать кривизну $\varkappa_z$, вызванную сваркой поясных швов, можно за счет дополнительных воздействий с помощью создания начальной кривизны $\varkappa_н$ или введения в технологический процесс компенсационного нагрева верхней кромки стенки. Естественно, это приводит к дополнительным материальным затратам и технически усложняет процесс изготовления, поэтому целесообразность таких дополнительных воздействий следует в каждом конкретном случае сопоставлять с альтернативным вариантом правки балки после сварки. В [37] показано, что в условиях специализированного производства тавровых балок дополнительный компенсаци-

Таблица 6.7. Деформации при сварке балок коробчатого сечения

Номер варианта	Схема сварки швов	$\bar{\varkappa}_y \cdot 10^6$, см$^{-1}$	ω_y	$\bar{\varkappa}_z \cdot 10^6$, см$^{-1}$	ω_z	$\bar{\varepsilon}^0_x \cdot 10^3$	ω_ε	$P_\varkappa$ при $[\varkappa] = 20 \cdot 10^{-6}$, см$^{-1}$
1	I	—19,05	0,155	5,56	0,255	—0,742	0,057	0,625
	II	8,49	0,142	—16,12	0,145	—0,737	0,059	0,950
2	I	—3,17	0,162	0,35	0,412	—0,431	0,128	0,999
	II	0,37	0,571	—2,47	0,149	—0,431	0,105	0,999
3	I	—0,12	0,281	0,05	1,259	—0,156	0,069	0,999
	II	0,02	2,797	—0,13	0,255	—0,156	0,064	0,999
4	I	—87,70	0,145	24,20	0,178	—1,472	0,089	0,000
	II	46,12	0,168	—70,58	0,131	—1,421	0,090	0,000
5	I	—5,88	0,215	1,7	0,329	—0,70	0,055	0,999
	II	2,79	0,284	—4,9	0,256	—0,706	0,055	0,999
6	I	—1,14	0,227	0,20	0,282	—0,362	0,104	0,999
	II	0,18	0,465	—0,9	0,256	—0,362	0,106	0,999

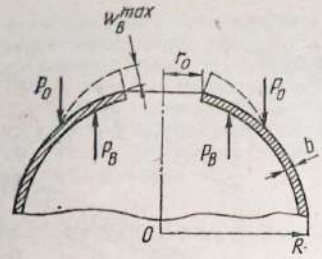


Рис. 6.66. Обратный выгиб сферической оболочки в зоне вварки соответствующего элемента круговым швом.

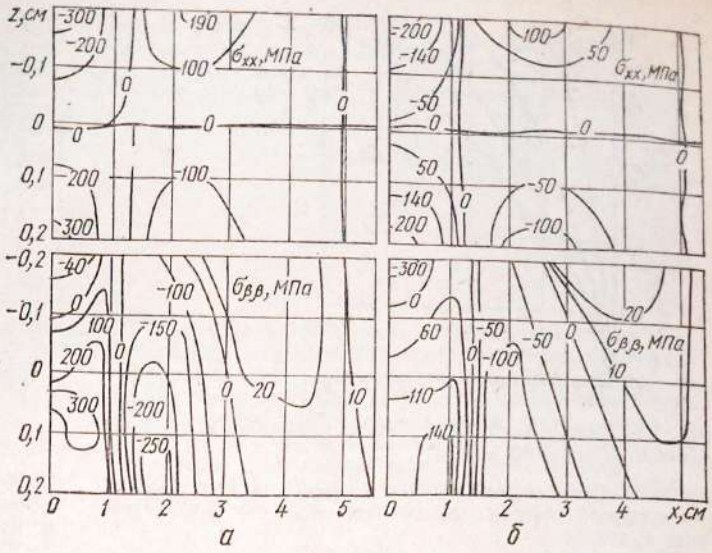


Рис. 6.67. Зависимость изолиний остаточных напряжений σ_{xx} и $\sigma_{\beta\beta}$ в зоне стыка от начальной температуры T_0 свариваемых стальных оболочек-труб: *а* — $T_0 = 20$ °С; *б* — $T_0 = 300$ °С.

онный нагрев в процессе сборки и сварки балки имеет ряд преимуществ перед альтернативными вариантами предварительного обратного выгиба и послесварочной правки. Среди таких преимуществ следует отметить: невысокие энергетические затраты, так как эффективная мощность компенсирующего нагрева для реальных тавровых балок не превышает 30 % эффективной мощности источников сварочного нагрева; высокую технологичность и управляемость процесса, в том числе и адаптивную [37]; широкие возможности для механизации и автоматизации.

Обратный выгиб является весьма эффективным мероприятием для компенсации сварочных деформаций в конструкциях с относительно небольшой изгибной жесткостью, например при вварке в тонкостенные оболочки различных фланцев, патрубков и т. п.

На рис. 6.66 показана схема обратного упругого выгиба сферической оболочки в зоне отверстия перед тем как в это отверстие будет вварена соответствующая деталь (фланец, комингс, патрубок и т. п.). Во многих случаях такое усложнение технологии является более рациональным, нежели последующая после сварки правка конструкции [34].

Предварительный подогрев зоны сварки или всего свариваемого узла является одним из распространенных способов снижения уровня остаточных напряжений. Рис. 6.67 [1] показывает влияние равномерного подогрева зоны стыка стальной (сталь 20) трубы 4 × 104 мм на распределение остаточных напряжений после сварки. Видно, что подогрев до $T_0 = 300°$ С снижает максимальные остаточные напряжения в 1,5 раза, хотя предел текучести этой стали всего лишь на 10 % ниже при 300 °С, чем при 20 °С. Это явление, как уже упоминалось в 6.1, связано с градиентом изменения предела текучести вблизи температуры подогрева. Чем выше этот градиент, тем более эффективно влияние относительно невысокого предварительного подогрева на снижение уровня остаточных напряжений. Последнее весьма характерно для высокопрочных (но не жаростойких) сталей, когда подогрев до 200—300° С приводит к заметному снижению уровня остаточных напряжений (в два и более раз).

Следует отметить, что предварительный подогрев может менять также и характер распределения остаточных напряжений в зоне сварного шва при сварке, например, сталей, чувствительных к закалке. Предупреждая образование закалочных структур, подогрев в ряде случаев приводит к появлению растягивающих остаточных напряжений в зоне шва вместо сжимающих (рис. 6.68).

Предварительный равномерный подогрев обычно увеличивает размеры зоны пластических деформаций, т. е. объемы продольного и поперечного укорочения, и поэтому может увеличивать формоизменение. Дополнительное охлаждение свариваемого изделия, уменьшая продольную и поперечную усадку, способствует снижению сварочных деформаций искажения размеров и формы изделия. На практике дополнительное охлаждение в указанных целях применяется редко из-за технологических трудностей. Тем не менее известны способы уменьшения деформаций тонколистовых изделий путем подачи воды при контактной сварке, обдувом газоводяной смесью при некоторых других способах сварки, использованием охлаждаемых подкладок и накладок в зажимных приспособлениях, теплоотводящих паст и других приемов дополнительного охлаждения [38].

Проколачивание сварных швов является одновременно средством для уменьшения продольных и поперечных напряжений, а также для уменьшения продольной и поперечной усадки зоны сварного шва. На рис. 6.69 по данным [2] приведены эпюры остаточных напряжений при сварке стыкового шва пластин из стали 20Г до и после проколачивания. Видно, что напряжение после проколачивания пневматическим инструментом уменьшилось более чем в четыре раза. Эффективность проколачивания как для снижения уровня остаточных напряжений, так и для уменьшения усадочных явлений при сварке, как, например, показано на рис. 6.70 для угловых деформаций при сварке стыкового шва с V-образной разделкой, была подтверждена целым рядом исследований еще в 40-е годы [39]. Однако наряду с существенными достоинствами этот метод обладает и большим недостатком, состоящим в сильном шуме и потребности в ручном труде. В последние годы получил развитие метод проколачивания с помощью ультразвукового ударного инструмента [40, 41], отличающийся меньшими шумовыми эффектами и более высокими возможностями для управления.

Сварка с силовым растяжением — метод снижения сварочных деформаций тонколистовых конструкций, а также уровня остаточных напряжений — заслуживает особого внимания при сварке набора с полотнищем тонкостенных плоских конструкций из алюминиевых сплавов. Исследования, проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины [42,43], показали, что использование начальных растягивающих напряжений на уровне 70—90 МПа в полотнище и ребрах большой протяженности обеспечивает качественную сборку, прямолинейность ребер и полотнища не хуже 0,5 мм на базе 2 м и зазоры в соединении не более 0,1 мм. При этом резко снижаются деформации бухтиноватости после приварки ребер к полотнищу. Табл. 6.8 [42] достаточно наглядно иллюстрирует эффективность влияния растяжения вдоль сварных швов на деформации после сварки алюминиевых плоскостных секций из полотнища толщиной 9 мм, к которому приваривались электронно-лучевой сваркой ребра сечением 42 × 4 мм через 125 мм. Особенно существенный эффект наблюдается, когда

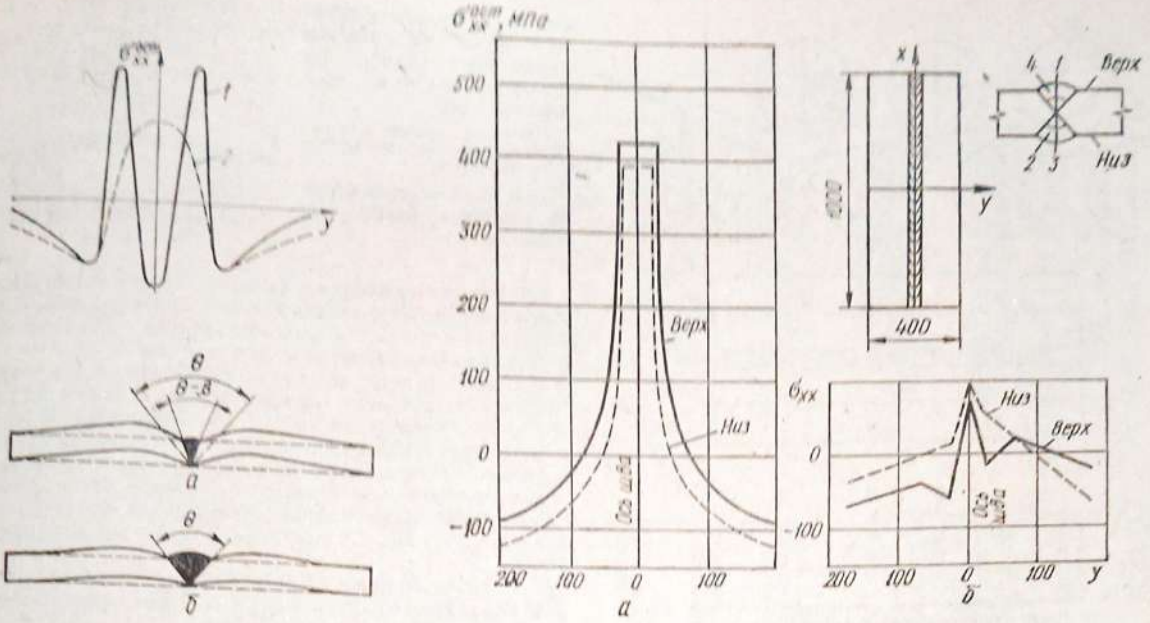


Рис. 6.68. Зависимость распределения остаточных продольных напряжений $\sigma_{xx}^{ост}$ от предварительного подогрева до температуры T_0 при сварке пластин из сталей, чувствительных к закалке:

1 — $T_0 = 20$ °С; *2* — $T_0 = 300$ °С.

Рис. 6.69. Распределение остаточных продольных напряжений $\sigma_{xx}^{ост}$ в свариваемых пластинах без проколачивания (*а*) и с проколачиванием (*б*) [2].

Рис. 6.70. Зависимость угловых деформаций после сварки от проколачивания:

а — без проколачивания; *б* — с проколачиванием.

полотнище растягивается напряжениями порядка 160 МПа, т. е. близкими к предельным остаточным продольным напряжениям в алюминиевых сплавах. Естественно, что разгрузка после сварки приводит к заметному снижению остаточных сварочных напряжений, что хорошо видно на рис. 6.71.

Существенным недостатком этого способа является необходимость в специальном оборудовании для нагружения свариваемых элементов. Однако в условиях специализированного производства капитальные затраты на такое оборудование вполне могут быть компенсированы технологическими преимуществами и техническими возможностями способа.

Правка сварных конструкций. В тех случаях, когда конструктивные и технологические мероприятия, описанные выше, не позволяют по тем или иным техническим или экономическим причинам получить деформации в пределах допуска, прибегают к правке конструкций.

Механизм правки заключается либо в пластическом удлинении волокон укороченных частей конструкции (обычно в зоне сварных соединений), либо в пластическом укорочении волокон участков конструкции, имеющих излишнюю длину.

Правку можно производить холодным методом (механическим воздействием), тепловым безударным и комбинированным методами (кратковременные нагревы с механическим воздействием). Холодный метод правки обычно применяется для удлинения волокон зоны сварных соединений, а тепловой и комбинированный — для укорочения волокон основного металла с целью компенсации укорочения в зоне сварных соединений.

Для сварных полотнищ наиболее эффективным способом правки бухтиноватостей, вызванных стыковыми швами, является холодная правка прокаткой в правильных вальцах (рис. 6.72). Холодная правка сварных профилей обратным изгибом обычно осуществляется под прессом (рис. 6.73) либо прокаткой в соответствующей профилегибочной машине. Холодная правка общих деформаций обратным изгибом под прессом применяется и для различных сварных узлов, секций с достаточно низким набором и т. д.

На рис. 6.74 приведены различные способы нагрева конструкций при тепловой правке местных и общих деформаций. Количество пятен нагрева должно быть выбрано таким обра-

Таблица 6.8. Влияние начальных напряжений на сборочные деформации

Номер секции	Начальные напряжения, МПа		Максимальный прогиб бухтин, мм	Угловые деформации, град
	Лист	Ребро		
1	0	0	43	3,4
2	90	85	9	1,5
3	150	150	7	0,9
4	90	125	9,5	1,3
5	155	125	2,5	1,0
6	165	125	1,5	0,8

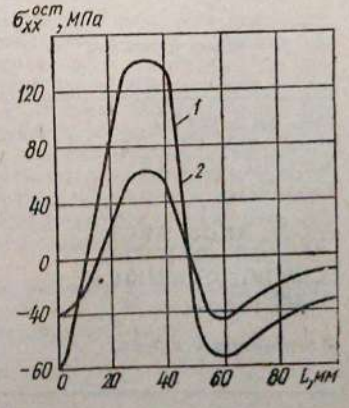


Рис. 6.71. Зависимость распределения остаточных напряжений $\sigma_{xx}^{ост}$ в зоне шва полотнища из алюминиевого сплава от силового растяжения:

1 — без растяжения; верхняя кривая); *2* — с силовым растяжением.

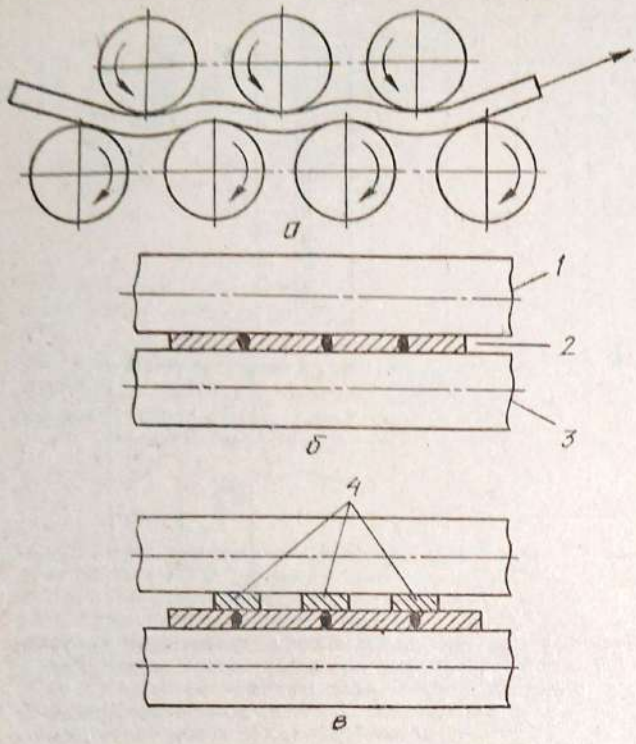


Рис. 6.72. Холодная правка сварного полотнища в правильных вальцах (*а*) без прокладок (*б*) и с прокладками (*в*):

1 — верхние валки; *2* — полотнище; *3* — нижние валки; *4* — прокладки.

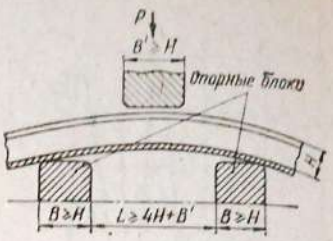


Рис. 6.73. Холодная правка сварных балок под прессом.

зом, чтобы пластические деформации укорочения мест нагрева позволили убрать «лишний материал» бухтиноватости либо компенсировали укорочение при сварке до допустимых величин. Тепловая правка требует большого опыта и мастерства правщика, поскольку ее эффективность зависит от температуры концентрированного нагрева и мощности источника, расположения, размера, формы и количества нагреваемых участков, распределения, остаточных сварочных напряжений, податливости нагреваемых участков конструкции, жесткости внешнего закрепления.

Можно высказать следующие общие рекомендации [17].

1. Правку бухтиноватости и ребристости обшивки тонколистовых секций и узлов конструкции следует производить после установки и сборки их в общую конструкцию, так как предварительная правка не исключает повторной правки после сварки с другими конструкциями. Кроме того, тепловая правка в жестком контуре более эффективна и требует меньшего количества полос или пятен.

2. Правку необходимо начинать с более жестких конструкций и кончать менее жесткими (внутренние переборки, легкие выгородки и т. п.). В самих конструкциях в первую очередь следует править набор, а затем полотнище.

3. Тепловую правку бухтиноватостей на конструкциях, от которых требуется хороший внешний вид, а также всех конструкций толщиной менее 4 мм рекомендуется производить нанесением штрихов длиной 120—150 мм или круглыми пятнами. Размеры видимой части ширины b штрихов либо диаметра d пятен в зависимости от толщины и марки материала можно выбирать по рекомендациям табл. 6.9 [17]. Расстояние между пятнами и полосами нагрева должно быть 75—100 мм.

4. Конструкции с ребристостью, вызванной угловыми деформациями приварки набора, следует править нагревом полос над ребрами (см. рис. 6.74, *г*).

5. Волнистость по свободным кромкам обшивки и по кромкам вырезов рекомендуется править нагревом участков в форме треугольников (клиньев), закрепляя нагреваемые участки против местного выпучивания (см. рис. 6.74, *д*).

6. Набор (сварные балки), а также плоские секции необходимо править нагревом треугольников у верхней кромки набора (см. рис. 6. 74, *е*).

Термическая обработка отпуском в зажимных приспособлениях применяется для одновременного устранения остаточных напряжений и деформаций. С этой целью конструкцию обычно сваривают в жестком приспособлении, которое обеспечивает при сварке сохранение необходимых размеров и формы. Затем производят термообработку конструкции отпуском вместе с приспособлением, в противном случае освобождение конструкции сопровождается определенными упругими деформациями, величины которых в ряде случаев не соответствуют допуску.

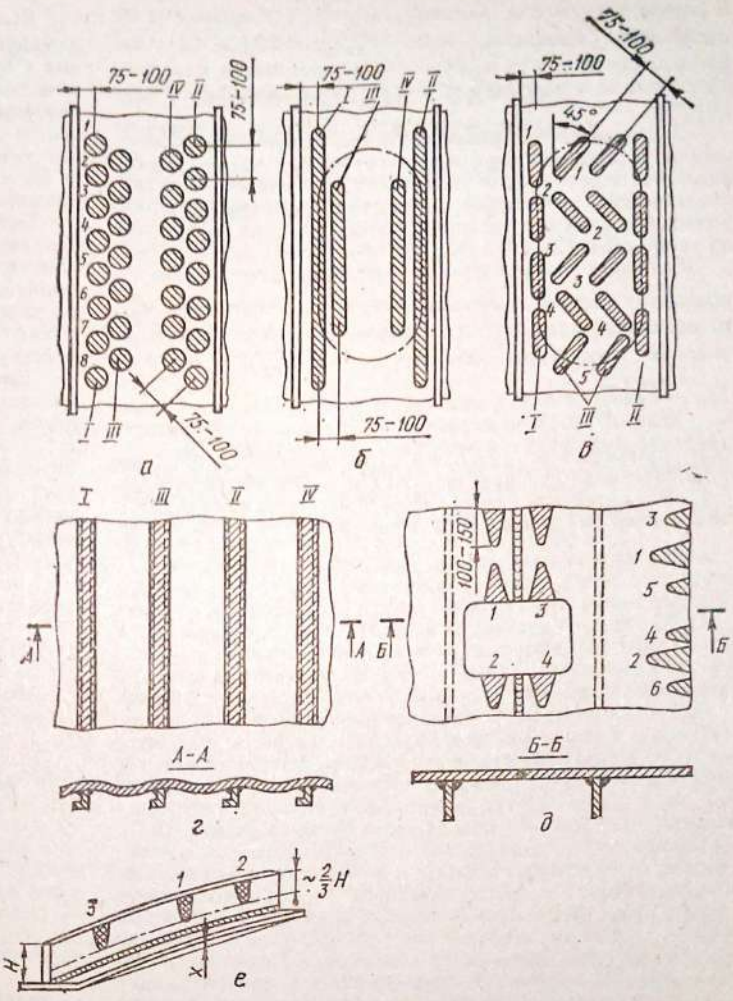
Рациональный режим отпуска следует назначать исходя из рекомендаций по релаксации напряжений для данного материала. Отпуск сварных конструкций является наиболее распространенной операцией для снижения остаточных сварочных напряжений и улучшения структуры и свойств металла с целью повышения эксплуатационных свойств сварных конструкций.

Термообработка отпуском целесообразнее для сварных

Таблица 6.9. **Размеры пятен и полос нагрева при тепловой правке**

Марка материала	Обозначение рекомендуемой величины	S, мм						
		2	3—4	5—6	7—10	11—15	15—20	Более 20
Ст3, 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1Д-35 (МК-35), 10ХСНД, 10Г2С1Д, 10ХГСН1Д	b, мм	8—10	10—15	20—25	25—30	30—35	35—40	$2S$
	d, мм	20—25	30—35	35—40	40—45	45—50	50—60	$3S$
АК-25, АК-28, АК-29, 103Х, Ю3Б, 0Х174710, Х18Н10Т, 0Х18Н10Т, 0Х18Н12Т	b, мм	5—8	8—10	10—12	12—15	15—20	20—25	
	d, мм	10—15	15—20	20—25	25—30	30—35	35—40	$2S$
Алюминиевые сплавы	b, мм	8—10	10—15	15—20	20—25	25—30	30—35	35—40
	d, мм	15—20	20—25	25—30	30—35	35—40	40—45	45—50

Рис. 6.74. Схемы различных способов нагрева конструкций при правке местных (*а*—*д*) и общих (*е*) деформаций.



конструкций, изготовление которых связано с последующей обработкой резанием и повышенными требованиями в отношении точности. Отпуск также необходим, если к сварной конструкции предъявляются повышенные требования стабильности формы и геометрических размеров при эксплуатационном нагружении. Кроме того, отпуск назначают для повышения сопротивления хрупким разрушениям при низких температурах и для получения требуемых свойств. Снижение остаточных напряжений при отпуске происходит за счет двух механизмов: мгновенной пластичности и диффузионной пластичности. Механизм мгновенной пластичности при достаточно равномерном нагреве изделия проявляется в изменении предела текучести материала. Согласно рис. 6.9 при достаточно равномерном нагреве до температуры T_* интенсивность остаточных напряжений $\sigma_i^{ост}$ в любой точке нагреваемого тела не превышает величины $\sigma_т(T_*)$. При плоском и одноосном напряженном состоянии это условие определяет максимальный уровень нерелаксированных остаточных напряжений. Длительная выдержка при температуре T_* дает возможность проявиться второму механизму диффузионной пластичности. Величины σ_i релаксируют в соответствии с кривыми релаксации материала, но при этом в зависимости от характера напряженного состояния в изделии (степени трехосности) максимальные напряжения могут меняться с различной скоростью. Поэтому продолжительность выдержки при температуре отпуска T_* обычно назначается пропорционально толщинам отпускаемых деталей, чтобы гарантированно получить необходимую степень релаксации.

Большие затраты на отпуск крупных сварных конструкций, связанные с необходимостью оснащения предприятий крупными печами, обусловливают применение в целом ряде случаев местного отпуска сварных конструкций, когда зона сварного шва нагревается до температуры отпуска с помощью различных местных нагревательных устройств и достаточно медленно охлаждается. Эффективность такой термообработки в каждом конкретном случае существенно зависит от тщательности проведения операции нагрева и охлаждения термообрабатываемой зоны, а также соответствующего контроля за исполнением.

Статическое нагружение силовой нагрузкой как метод снижения остаточных сварочных напряжений известно достаточно давно [2]. Сущность метода состоит в том, что при силовом нагружении в результате взаимодействия остаточных напряжений с напряжением от внешней нагрузки появляются дополнительные пластические деформации, способствующие релаксации остаточных сварочных напряжений. При этом в зависимости от знака и направления действия внешней нагрузки релаксация остаточных напряжений происходит за счет либо уменьшения пластических деформаций укорочения, вызванных сваркой, либо пластического удлинения периферийных волокон.

В качестве иллюстрации рассмотрим одноосное напряженное состояние в полосе $-B < y < B$, заданное идеализированным распределением следующего вида:

$$-b < y < b \quad \sigma_{xx}^{ост} = \sigma_*; \quad |y| > b \quad \sigma_{xx}^{ост} = -\sigma_* \frac{b}{B-b}.$$

В случае нагружения внешней нагрузкой P вдоль оси Ox релаксация возможна, если $|\sigma_{xx}^{ост} + P/2B| > \sigma_т$. При растяжении ($P > 0$) в первую очередь появляется пластическое течение в зоне $-b < y < b$, а при сжатии — в зоне $|y| > b$.

В первом случае релаксация происходит из-за пластических деформаций растяжения в зоне $-b < y < b$, где имела место деформация укорочения, а во втором — за счет пластических деформаций укорочения в зоне $|y| > b$, что приводит к общему выравниванию пластических деформаций по всему сечению.

Если же внешняя нагрузка приложена в поперечном направлении и задана величиной поперечных напряжений $\sigma_{yy}^{вн}$, то появление пластических деформаций можно оценить по условию текучести Мизеса, т. е. $(\sigma_{xx}^{ост})^2 + (\sigma_{yy}^{вн})^2 - \sigma_{xx}^{ост}\sigma_{yy}^{вн} = \sigma_т^2$.

Если $\sigma_{yy}^{вн} > 0$, то пластическое течение в первую очередь появится в зоне $|y| > b$. При этом растяжение будет в направлении y, а в направлении x — пластическое укорочение, т. е. релаксация напряжений произойдет за счет укорочения зоны $|y| > b$ в направлении x.

Если же $\sigma_{yy}^{вн} < 0$, то пластическое течение появится в первую очередь в зоне $-b < y < b$. При этом в направлении x будут иметь место положительные приращения пластической деформации, что приводит к релаксации остаточных напряжений. Естественно, что в реальных условиях многоосного напряженного состояния условия возникновения пластического течения и релаксации остаточных напряжений более сложны. Однако качественная картина остается подобной описанной выше.

Основным недостатком метода статического нагружения является необходимость в достаточно сложном и громоздком оборудовании. Кроме того, при наличии существенных геометрических неоднородностей трудно добиться необходимого распределения внешних напряжений для эффективного снижения остаточных напряжений в различных участках конструкции.

Импульсное и вибрационное нагружение [44, 45 и др.] находит в последние годы все большее применение для снижения уровня остаточных сварных напряжений. Механизм релаксации здесь во многом подобен механизму релаксации при статическом нагружении, однако эти способы часто являются более технологичными. Невысокая стоимость оборудования и возможность локальной обработки позволяют использовать их в достаточно общих условиях.

ГЛАВА 7

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ. ОСОБЕННОСТИ ИХ РАСЧЕТА ПРИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Многообразие сварных конструкций, способов сварки, применяемых материалов и т. д. определяет достаточно большое многообразие сварных соединений, отличающихся различными геометрическими, технологическими и другими особенностями.

В данной главе рассматриваются классификация сварных соединений, применяемых в строительных конструкциях, вопросы оценки напряженного состояния в различных зонах типовых соединений и узлов, а также существующие подходы к оценке несущей способности соединений при статических нагрузках.

Типы сварных соединений упоминались в гл. 2. Представление классификации сварных соединений в настоящей главе вызвано стремлением к компактности изложения.

7.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Сварные соединения классифицируют по различным признакам. Наиболее распространенными из этих признаков являются следующие: геометрия примыкания соединяемых элементов, тип используемых сварных швов, способ сварки, условия работы, толщины свариваемых элементов, свариваемые материалы.

При производстве строительных конструкций применяется преимущественно электродуговая сварка.

Основные типы, конструктивные элементы и размеры сварных швов и соединений регламентированы следующими стандартами: ГОСТ 8713—79 и ГОСТ 11533—75 — для швов, выполняемых автоматической и полуавтоматической сваркой под флюсом; ГОСТ 14771—76 — для швов, выполняемых сваркой в защитных газах; ГОСТ 5264—80 и ГОСТ 11534—75 — для швов, выполняемых ручной сваркой. В отдельных случаях применяются электрошлаковая сварка по ГОСТ 15164—78, контактная сварка по ГОСТ 15878—79 и дуговая точечная сварка по ГОСТ 14776—79.

В зависимости от геометрии примыкания соединяемых элементов указанными стандартами для дуговой сварки предусмотрены четыре характерных случая (табл. 7.1): стыковое соединение, когда свариваемые элементы лежат в одной плоскости: (1) — (7); угловое соединение, когда две детали соединяются своими торцевыми поверхностями под определенным углом по отношению друг к другу: (8) — (10); тавровое соединение, когда одна деталь примыкает к другой своей торцевой поверхностью: (11) — (16); нахлесточное соединение, когда свариваемые элементы перекрывают друг друга: (17), (18).

В зависимости от типа используемых сварных швов различают соединения со стыковыми швами, соединения с угловыми швами, соединения с точечными швами, соединения с прорезными швами и соединения, образованные комбинацией различных швов.

Стыковые швы используются, в основном, в стыковых соединениях (см. табл. 7.1). Однако возможны варианты их использования в угловых и нахлесточных соединениях.

Стыковой шов характеризуется: глубиной проплавления H (рис. 7.1), шириной l, высотой усиления g, площадью проплавления $F_{пр}$, коэффициентом формы $\psi = H/l$. Важными параметрами являются также радиус перехода R от усиления шва к основному металлу и угол θ в этой зоне.

Стыковые швы могут быть односторонними и двухсторонними, с полным либо частичным проплавлением стыка, без скоса кромок и с различным скосом кромок, могут выполняться на остающейся либо съемной подкладке (см. табл. 7.1).

Угловые швы используются в тавровых, угловых и нахлесточных соединениях. Они имеют характерные размеры (рис. 7.2): K — катет шва, R — радиус перехода в зоне сплавления, H — глубина проплавления. Угловые швы бывают с полным и частичным проплавлением, сплошные и прерывистые, одно- и двухсторонние, одно- и многопроходные, без скоса кромок и со скосом кромок (см. табл. 7.1). Точечные швы применяются только в нахлесточных соединениях (рис. 7.3 и 7.4). Для тонколистового материала используется точечная контактная сварка. В отдельных случаях — при увеличенных толщинах, а также в монтажных условиях — используется дуговая сварка. Точечные швы могут быть однорядными (см. рис. 7.3) и многорядными (см. рис. 7.4), одно- и двухсрезными. В ряде случаев точечные швы при сварке плавлением с присадкой выполняют с предварительным сверлением отверстий в одном из соединяемых элементов. Возможен вариант применения дуговой сварки с соответствующими сквозными прорезями у одного из соединяемых элементов.

7.2. НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В сварных соединениях напряженно-деформированное состояние определяется не только характером внешнего нагружения конструкции, но и геометрической и физической неоднородностью в зоне сварных соединений, а также сварочными остаточными напряжениями и деформациями. Принято различать номинальные напряжения (деформации) в зоне сварного соединения, вызываемые внешней нагрузкой, и локальные напряжения, обусловленные особенностями геометрии соединения и местной физической неоднородностью.

Сведения об остаточных сварочных напряжениях и деформациях приведены в гл. 6. Здесь рассмотрены только основные особенности в описании местного напряженно-деформированного состояния в зоне сварных швов при нагружении типовых сварных соединений (со стыковыми швами, угловыми швами, многоточечными и прорезными швами) и соответствующие подходы к расчету сварных соединений.

Сварные соединения со стыковыми швами, как правило, являются наиболее надежными соединениями, поскольку геометрические особенности стыковых швов способствуют минимальным искажениям силовых потоков. Тем не менее отклонения в распределении местных напряжений (деформаций) в сравнении с номинальными для необработанных швов могут быть достаточно значительными. Наиболее характерным яв-

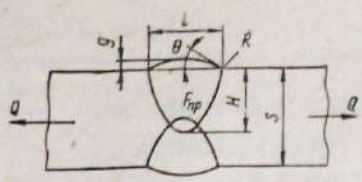


Рис. 7.1. Характерные геометрические параметры стыкового шва.

Рис. 7.2. Характерные геометрические параметры углового шва таврового (*а*) и крестового (*б*) соединений.

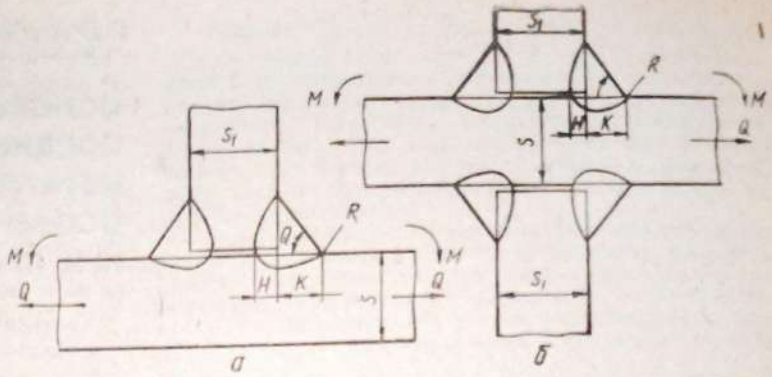


Рис. 7.3. Характерные геометрические параметры соединения внахлестку с однорядным точечным односрезным (*а*) и двухсрезным (*б*) швами.

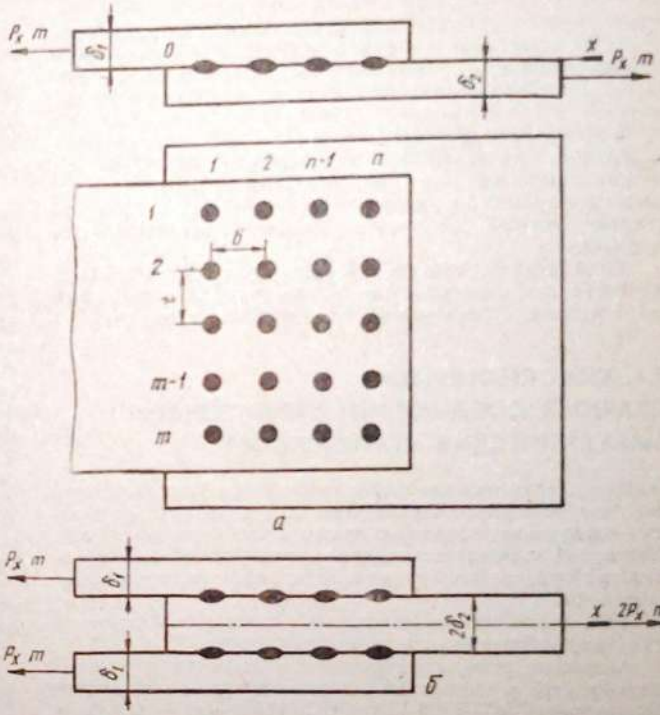


Рис. 7.4. Характерные геометрические параметры соединения внахлестку с многорядным точечным односрезным (*а*) и двухсрезным (*б*) швами.

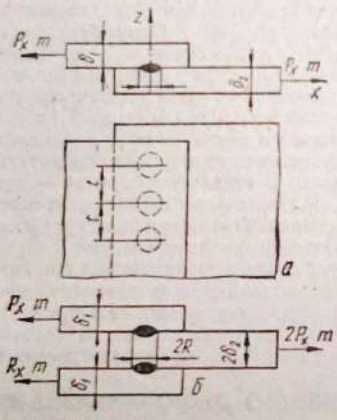


Таблица 7.1. Классификация сварных соединений, выполняемых дуговой сваркой

Вид соединения	Форма подготовки кромок	Характер шва	Схема		Условные обозначения шва сварного соединения (над чертой) и пределы толщин, мм, свариваемых деталей (под чертой) для способов сварки		
					автоматической и полуавтоматической под флюсом (ГОСТ 8713—79)	электродуговой в защитных газах (ГОСТ 14771—76)	ручной электродуговой (ГОСТ 5264—80)
Стыковое	Без скоса кромок	Односторонний на съемной или остающейся подкладке		1	С4 и С5—А / 2—12	С4 и С5—УП / 0,8—8	С4 и С5 / 1—4
		Двухсторонний		2	С7—А / 2—20	С7—УП / 3—12	С7 / 2—5
	Со скосом одной кромки			3	С12—А / 14—20	С12—УП / 3—60	С12 / 3—60
	С двумя симметричными скосами одной кромки			4	С15—А / 20—30	С15—УП / 8—100	С15 / 8—100

Вид соединения	Форма подготовки кромок	Характер шва	Схема	Условные обозначения шва сварного соединения (над чертой) и пределы толщин, мм, свариваемых деталей (под чертой) для способов сварки		
				автоматической и полуавтоматической под флюсом (ГОСТ 8713—79)	электродуговой в защитных газах (ГОСТ 14771—76)	ручной электродуговой (ГОСТ 5264—80)
Стыковое	Со скосом двух кромок	Односторонний на съемной подкладке	5	$\frac{С18—А}{12—30}$	$\frac{С18—УП}{3—60}$	$\frac{С18}{3—60}$
		Двухсторонний	6	$\frac{С21—А}{14—30}$	$\frac{С21—УП}{3—60}$	$\frac{С21}{3—60}$
	С двумя симметричными скосами кромок	»	7	$\frac{С25—А}{18—60}$	$\frac{С25—УП}{6—120}$	$\frac{С25}{8—120}$
Угловое	Без скоса кромок		8	$\frac{У5—А}{4—14}$	$\frac{У5—УП}{8—30}$	$\frac{У5}{2—30}$
	Со скосом одной кромки	Односторонний	9	—	$\frac{У6—УП}{3—60}$	$\frac{У7}{3—60}$
		Двухсторонний	10	$\frac{У7—А}{8—20}$	$\frac{У7—УП}{3—60}$	$\frac{У7}{3—60}$
Тавровое	Без скоса кромок	Односторонний	11	$\frac{Т1—А}{3—40}$	$\frac{Т1—УП}{8—40}$	$\frac{Т1}{2—40}$
		Двухсторонний	12	$\frac{Т3—А}{3—40}$	$\frac{Т3—УП}{8—40}$	$\frac{Т3}{2—40}$
	Со скосом одной кромки	Односторонний	13	—	$\frac{Т6—УП}{3—60}$	$\frac{Т6}{3—60}$
		Двухсторонний	14	$\frac{Т7—А}{8—30}$	$\frac{Т7—УП}{3—30}$	$\frac{Т7}{3—60}$
	С двумя симметричными скосами одной кромки	Двухсторонний с полным проплавлением	15	$\frac{Т8—А}{16—40}$	$\frac{Т8—УП}{6—80}$	$\frac{Т8}{8—100}$
		То же с неполным проплавлением	16	—	$\frac{Т9—УП}{12—100}$	$\frac{Т9}{12—100}$
Нахлесточное	Без скоса кромок	Односторонний	17	$\frac{Н1—А}{1—20}$	$\frac{Н1—УП}{8—60}$	$\frac{Н1}{2—60}$
		Двухсторонний	18	$\frac{Н2—А}{1—20}$	$\frac{Н2—УП}{8—60}$	$\frac{Н2}{2—60}$

ляется случай нагружения тонкостенного элемента конструкции со стыковым швом растягивающей силой Q на единицу длины шва (рис. 7.5), что соответствует номинальным напряжениям $\sigma^{н}_{yy} = Q/S$. Отклонение в распределении напряжений в зоне шва может быть вызвано усилением шва (см. рис. 7.5, *а*), смещением Δ сварных кромок (см. рис. 7.5, *б*), местными угловыми деформациями (см. рис. 7.5, *в*). Эти отклонения формы приводят к определенным перераспределениям местных напряжений σ_{yy}. При этом местные максимальные напряжения (деформации) превышают номинальные на определенную величину, определяемую коэффициентом концентрации напряжений K_σ (деформаций K_ε). При упругом деформировании материала $K_\sigma = K_\varepsilon = K_t$. При упруго-пластическом деформировании $K_\sigma = \sigma^{max}_{yy}/\sigma^{н}_{yy} < K_t$, $K_\varepsilon = \varepsilon^{max}_{yy}/\varepsilon^{н}_{yy} > K_t$. Величина K_t — теоретический коэффициент концентрации напряжений — является обычно исходной для оценки величин K_σ и K_ε, поэтому она используется как характеристика местных напряжений в зоне шва.

При наличии одновременно всех трех геометрических неровностей (см. рис. 7.5) K_t можно представить в виде

$$K_t = K_{t\phi}\,(K_{tc} + K_{ty} - 1), \qquad (7.1)$$

где $K_{t\phi}$, K_{tc} и K_{ty} — коэффициенты концентрации напряжений для стыкового соединения, обусловленные формой усиления сварного шва, смещением свариваемых кромок и угловыми деформациями соответственно.

Величина $K_{t\phi}$ зависит от ряда геометрических параметров — R, l, S, g, θ. Получить точную аналитическую зависимость, которая связала бы эти параметры с величиной $K_{t\phi}$, практически невозможно. Обычно для этого используют приближенные методы экспериментальной механики (фотоупругость, голографическую интерферометрию и т. д.) либо численные методы. Методом конечных элементов получены некоторые приближенные зависимости, аппроксимирующие результаты численных экспериментов. В работе [1] систематизированы такие зависимости и рекомендованы области их применения. Так, например, для $0{,}15 \leqslant l/S \leqslant 2{,}3$; $0{,}01 \leqslant R/S \leqslant 0{,}1$; $0{,}1 \leqslant g/S \leqslant 0{,}2$ и малых углов θ ($15° \leqslant \theta \leqslant 30°$) заслуживает внимания зависимость из [2]

$$K_{t\phi} = 1 + \left(\frac{R}{g}\operatorname{ctg}\theta + 4\,\frac{R}{S} + 5\,\frac{R}{l+S}\right)^{-2/3}, \qquad (7.2)$$

а при больших θ ($45° \leqslant \theta \leqslant 60°$) — зависимость из [3]

$$K_{t\phi} = 1 + (14R/l + 1{,}7R/g + 5R/S)^{-0{,}5}. \qquad (7.3)$$

Для K_{tc} используют обычно приближенную зависимость [4]

$$K_{tc} = 1 + 3\Delta/S, \qquad (7.4)$$

получаемую из условия, что исходная средняя линия *1* после нагружения принимает форму *2* (рис. 7.6, *а*) при базе $L \gg S$.

Для угловых деформаций в зоне стыковых швов пока не существует общепринятых методов описания и измерения. Так, наряду с измерением угла β при заданной базе L, определяющей положение плоскости действия усилия Q (рис. 7.6, *б*), широко используется метод измерения максимального отклонения зоны соединения от соответствующего шаблона (рис. 7.6, *в*), длина которого $L_ш$ достаточно велика, т. е. плоскость действия усилия Q также находится в пределах $L_ш$. Если принять, что кривая $f(y)$ задана (см. рис. 7.6, *в*), то при условии симметрии в сечении $y = 0$ получим

$$K_{ty} = 1 + \frac{6f_0}{S}\left[1 - m\int_0^{L/2} e^{-my}\,\frac{f(y)}{f_0}\,dy\right], \qquad (7.5)$$

где $m^2 = 12Q/ES^3 = 12\sigma^{н}_{yy}/ES^2$. Задаваясь формой кривой $f(y)$, соответствующей данной угловатости, можно с помощью (7.5) оценить K_{ty}. Например, если $f(y)/f_0 = \exp(-by^2)$, то

$$K_{ty} = 1 + \frac{6f_0}{S}\,[1 - \sqrt{\pi\xi}\,\exp(\xi)\,(1 - \operatorname{erf}\sqrt{\xi})], \qquad (7.6)$$

где $\xi = m^2/4b = 3\sigma^{н}_{yy}/EbS^2$. Из (7.6) следует, что при $\xi \to \infty$ $K_{ty} \to 1$, а при $\xi = 0$ $K_{ty} = 1 + 6f_0/S$. Реальные значения K_{ty} лежат в указанных пределах, т. е. $1 \leqslant K_{ty} < 1 + 6f_0/S$. Коэффициент b сосредоточенности отклонений $f(g)$ можно оценить, если задана граница зоны $y = L/2$, соот-

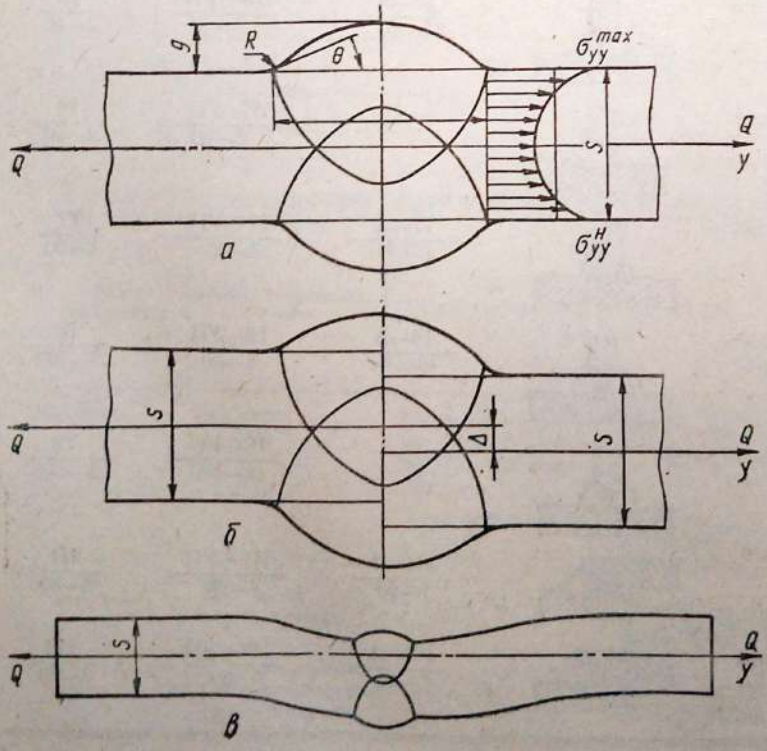


Рис. 7.5. Геометрические параметры, определяющие в стыковом соединении концентрацию напряжений, обусловленную формой шва (*а*), смещениями кромок (*б*) и угловыми деформациями (*в*).

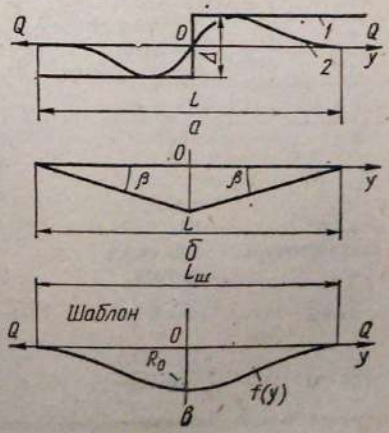


Рис. 7.6. Расчетные схемы для оценки коэффициентов концентрации, обусловленных смещением кромок (*а*) и угловыми деформациями (*б*, *в*).

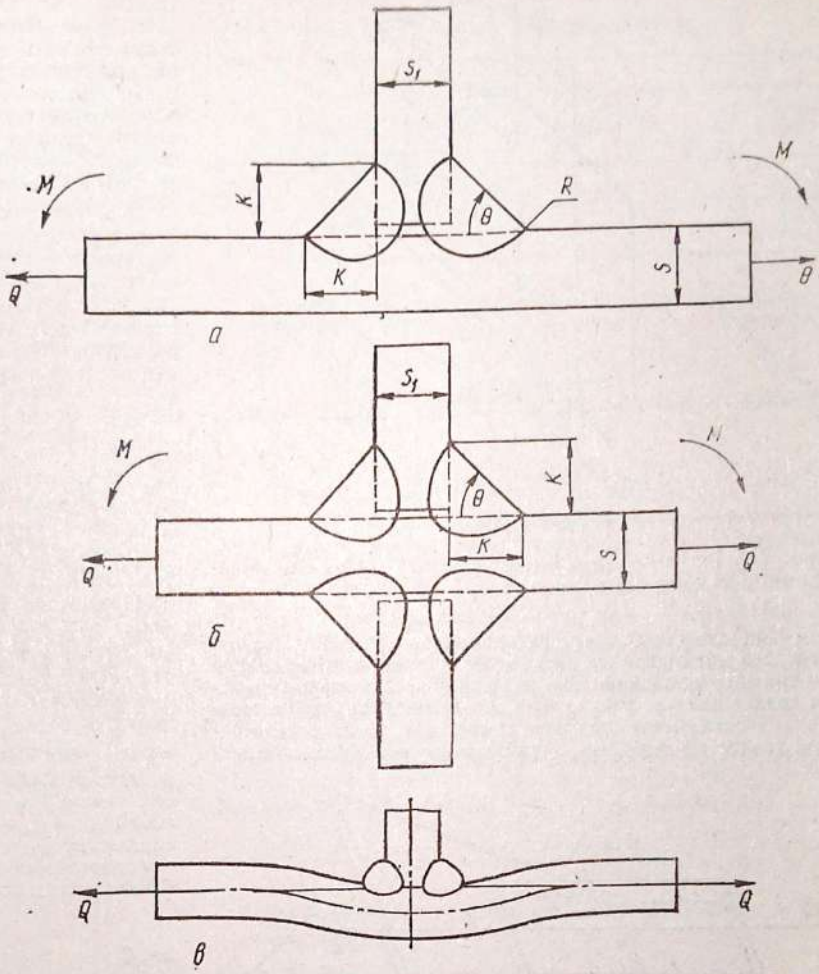


Рис. 7.7. Геометрические параметры, определяющие концентрацию напряжений, обусловленную формой угловых швов в тавровом (*а*), крестовом (*б*) соединениях, а также угловыми деформациями (*в*).

ветствующая условию $f(L/2) \approx 0$. При этом $b \approx 12/L^2$, $\xi \approx \approx \frac{\sigma^{н}_{yy}}{E(L/2S)^2}$. Можно также приближенно оценить b, если задан радиус R_0 закругления кривой $f(y)$ (в зоне $y = 0$). При этом $\xi = \frac{\sigma^{н}_{yy}}{E} \frac{6f_0R_0}{S^2}$.

Для **сварных соединений с угловыми швами** местное напряженно-деформированное состояние определяется обычно для околошовной зоны и металла шва. Для околошовной зоны, так же как и для соединений со стыковыми швами, используют понятие о концентрации напряжений в зоне перехода от шва к основному металлу (рис. 7.7). В этом случае коэффициент концентрации при нагружении усилием Q и моментом M можно представить в виде

$$K_t = \left(\frac{Q}{S} K_{tQ} + 6\frac{M}{S^2} K_{tM}\right)\left(\frac{Q}{S} + 6\frac{M}{S^2}\right)^{-1}, \quad (7.7)$$

где K_{tQ} — коэффициент концентрации, обусловленный формой сварного шва и формой соединения (см. рис. 7.7, *а*, *б*), при работе соединения только на осевую нагрузку Q; K_{tM} — то же, но при загружении изгибающим моментом M в этом же сечении. Наличие угловых деформаций (см. рис. 7.7, *в*) можно приближенно учесть, используя K_{tM} и $M = Qf^{\max}$. Величины K_{tQ} и K_{tM} исследовались различными экспериментальными и численными методами. На основе этих исследований предложены приближенные зависимости, с помощью которых можно вычислить K_{tQ} и K_{tM} для различных геометрических параметров (R/S, K/S, θ). В работе [1] проводились сопоставления этих зависимостей, на основе чего можно рекомендовать для тавровых соединений (см. рис. 7.7, *а*) при $0{,}02 \leqslant R/S \leqslant 0{,}2$; $0{,}5 \leqslant K/S \leqslant 1{,}2$; $30° \leqslant \theta \leqslant 80°$

$$\left.\begin{aligned} K_{tQ} &= 1 + \sqrt{\frac{2K/S}{(1+2K/S)^2 + 1{,}6}}\, S/R \sin\theta; \\ K_{tM} &= 1 + \frac{0{,}13 + 0{,}65\,(1 - R/S)^4}{(R/S)^{1/3}}\, \Phi(\theta, S/2K) \times \\ &\times \operatorname{th}\left[\frac{(2K/S)^{0{,}25}}{1 - R/S}\right]; \\ \Phi(\theta, S/2K) &= \frac{1 - \exp(-0{,}9\theta\sqrt{1 + S/2K})}{1 - \exp(-0{,}45\pi\sqrt{1 + S/2K})}. \end{aligned}\right\} \quad (7.8)$$

Для крестовых соединений (см. рис. 7.8, *б*) при $0{,}02 \leqslant R/S \leqslant 0{,}2$; $0{,}5 \leqslant K/S \leqslant 1{,}2$; $30° \leqslant \theta \leqslant 80°$

$$\left.\begin{aligned} K_{tQ} &= 1 + \Phi(\theta, S/2K)\left(\frac{K/R}{2{,}8\,(2K/S) - 2}\right)^{0{,}65}; \\ K_{tM} &= 1 + \frac{0{,}13 + 0{,}65\,(1 - R/S)^4}{(R/S)^{1/3}}\, \Phi(\theta, S/2K) \times \\ &\times \sqrt{\operatorname{th} 2\left(\frac{S/2K}{S/2K + 1} + \frac{R}{S}\right)}\, \operatorname{th}\left[\frac{(2K/S)^{0{,}25}}{1 - R/S}\right]. \end{aligned}\right\} \quad (7.9)$$

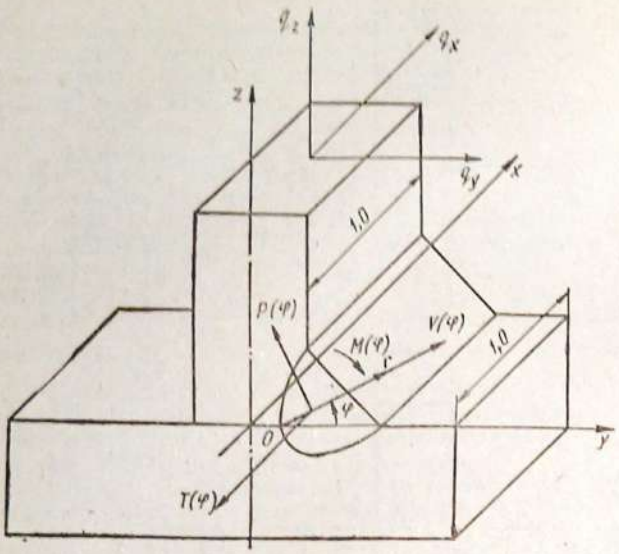


Рис. 7.8. Расчетная схема для определения усилий в сечении $\varphi = \text{const}$ углового шва.

Напряженно-деформированное состояние в материале углового шва зависит от многих факторов и достаточно сложно при общем описании. В инженерной практике используется представление, что главные характеристики этого состояния, определяющие прочность самого шва, можно с достаточной точностью выразить, зная величину и направление действующего на сварной шов внешнего усилия и геометрические размеры шва. На рис. 7.8 в качестве примера показано тавровое соединение с односторонним угловым швом. На единицу длины шва примыкающего элемента действует усилие q, заданное проекциями q_x, q_y, q_z. Если рассечь сварной шов плоскостью $\varphi = \text{const}$, то действие отсеченной части можно заменить усилиями $P(\varphi)$, $V(\varphi)$, $T(\varphi)$, приложенными в центре сечения, и моментом $M(\varphi)$. При этом средние для сечения $\varphi = \text{const}$ нормальные и касательные напряжения можно выразить через указанные усилия и момент следующим образом:

$$\sigma_{yy} = \frac{P(\varphi)}{h} \pm \frac{M(\varphi)}{h^2}\,4\bar{c};\quad \sigma_{\varphi r} = V(\varphi)/h,\quad \sigma_{\varphi x} = T(\varphi)/h, \tag{7.10}$$

где $\bar{c} = 1$ при пластическом течении, $\bar{c} \cong 1{,}5$ при упругом деформировании. Усилия P, V, T выражаются через проекции внешней нагрузки q_x, q_y, q_z:

$$P(\varphi) = q_z \cos\varphi - q_y \sin\varphi;\quad V(\varphi) = q_y \cos\varphi + q_z \sin\varphi;$$
$$T(\varphi) = q_x. \tag{7.11}$$

Момент $M(\varphi)$ в каждом конкретном случае определяется равнодействующей проекций q_z, q_y и расстоянием от центра сечения $\varphi = \text{const}$ до линии действия этой равнодействующей в плоскости Ozy. Допуская, что напряжения $\sigma_{rr} = 0$ (см. рис. 7.8) из-за ограниченных размеров шва, интенсивность средних напряжений в точках вдоль сечения $\varphi = \text{const}$ можно представить в виде

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{\varphi\varphi}^2 + \sigma_{xx}^2 - \sigma_{\varphi\varphi}\sigma_{xx} + 3\sigma_{\varphi x}^2 + 3\sigma_{\varphi r}^2}, \tag{7.12}$$

где σ_{xx} — нормальные напряжения, действующие вдоль шва (оси x). Напряжения σ_{xx} трудно поддаются оценке. Численное исследование [5] напряженно-деформированного состояния в зоне углового шва для тавровых и крестовых соединений ($q_x = q_y = 0$), а также для лобовых швов соединений внахлестку ($q_x = q_z = 0$) показало, что только при развитом пластическом течении напряженное состояние достаточно близко соответствует определяемому по (7.10), т. е. что вдоль

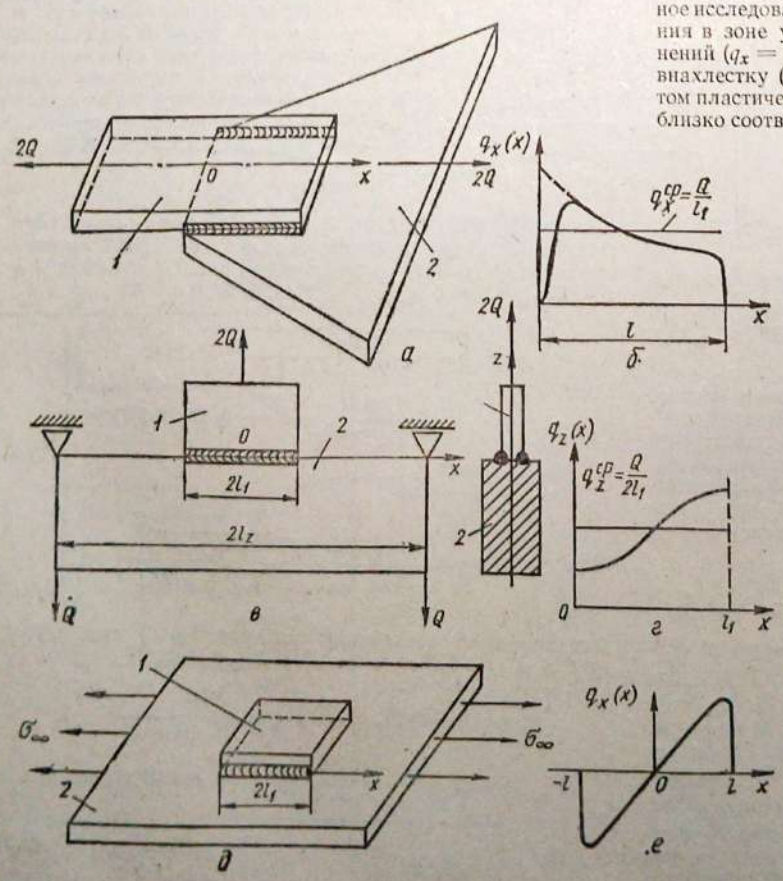
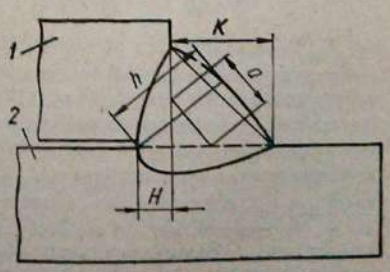


Рис. 7.9. Примеры сварных соединений с угловыми швами при неравномерном распределении усилий вдоль шва:

а, б — несущий фланговый шов; *в, г* — несущий лобовой шов; *д, е* — конструкционный фланговый шов.

Рис. 7.10. Расчетные геометрические параметры углового шва.



сечения $\varphi = \text{const}$ напряжения меняются мало, а интенсивность напряжений в наиболее напряженных сечениях можно приближенно определять по (7.12) при $\sigma_{xx} \approx 0$. Исходя из этого, подставив (7.10) в (7.12), получим

$$\sigma_i = \frac{1}{h(\varphi)} \sqrt{\left(P \pm \frac{M}{h}\,4\bar{c}\right)^2 + 3(V^2 + T^2)}. \quad (7.13)$$

Таким образом, для оценки напряженного состояния угловых швов необходимо знать распределение усилий q вдоль угловых швов в конкретных соединениях. Во многих случаях при расчете нагруженных угловых швов используется допущение о равномерном распределении усилий вдоль всей длины шва. Однако при ограниченной жесткости соединяемых элементов такое допущение далеко не всегда соответствует действительности.

Рассмотрим несколько характерных примеров сварных соединений с угловыми швами, показанных на рис. 7.9. Швы соединений (см. рис. 7.9, *а*, *в*) являются несущими, а на рис. 7.9, *д* — слабонагруженными, или конструкционными. Если жесткость при растяжении (см. рис. 7.9, *а*) либо изгибе (см. рис. 7.9, *в*) невелика, то обычно применяемые расчеты по средней величине усилия на единицу длины шва могут быть далеки от реальности. Для фланговых швов (см. рис. 7,9, *а*) этот вопрос достаточно хорошо исследован и экспериментально и теоретически. Распределение усилий $q_x(x)$ по длине шва согласно экспериментальным данным схематически показано на рис. 7. 9, *б*. Для расчета $q_x(x)$ известны различные подходы, основанные на определенных допущениях [4, 6 и др.]. Одна из достаточно простых схем [7] позволяет при упругом деформировании элементов *1*, *2* и простом упруго-пластическом нагружении шва получить значения $q_x(x)$ в результате решения следующей задачи:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[D\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{q_x}{A}\right)\right] - q_x = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{QD}{E_1F_1}\right); \quad (7.14)$$

$$\left.\begin{aligned} &x = 0, \quad \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{q_x}{A}\right) = \frac{Q}{E_1F_1}; \\ &x = l, \quad \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{q_x}{A}\right) = Q\left[\frac{1}{E_1F_1} - \frac{1}{D}\right] = \\ &= -\frac{Q}{E_2F_2}; \\ &\frac{1}{D} = \frac{1}{E_1F_1} + \frac{1}{E_2F_2}; \quad A = G_{ш}\frac{h}{a}\psi, \end{aligned}\right\} \quad (7.15)$$

где E_jF_j — произведение модуля упругости на площадь сечения j-го элемента ($j = 1, 2$), т. е. жесткость при растяжении в направлении x, $G_{ш}$ — модуль сдвига материала шва, h, a — геометрические параметры (рис. 7.10), $h/a \approx 1$, $\psi \leqslant 1$ учитывает пластическое течение материала шва:

$$\psi = 1 \quad \text{при} \quad |q_x| < q_т = \sigma_т^{ш} h; \quad \psi < 1 \quad \text{при} \quad |q_x| = q_т. \quad (7.16)$$

Здесь $\sigma_т^{ш}$ — предел текучести материала шва с учетом условий (например, температурных) нагружения и достигнутой пластической деформации, если материал деформационно-упрочняющийся. Более общая постановка на основе теории течения из [8] позволяет учитывать сложное нагружение шва, сочетающее нагрузку с разгрузкой; при простом нагружении эта задача эквивалентна [8]. При упругом деформировании шва ($\psi = 1$) и постоянных значениях E_1F_1 и E_2F_2

$$q_x(x) = q_x^{ср}\frac{ml}{(1+\varkappa)\,\mathrm{sh}\,(ml)}\,[\varkappa\,\mathrm{ch}\,(mx) + \mathrm{ch}\,(ml)\,\mathrm{ch}\,(mx) - \mathrm{sh}\,(ml)\,\mathrm{sh}\,(mx)], \quad (7.17)$$

где $\varkappa = E_1F_1/E_2F_2$; $m^2 = A\,(1/E_1F_1 + 1/E_2F_2)$; $q_x^{ср} = -Q/l$.

Таблица 7.2. Значения коэффициента K_t

$\varkappa$	ml						
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
0	1,08	1,310	1,66	2,07	2,53	3,01	3,50
1	1,02	1,08	1,18	1,31	1,47	1,35	1,78

Из (7.17) следует, что $|q_x|$ достигает максимума при $\varkappa < 1$ у кромки $x = 0$, а при $\varkappa > 1$ — у кромки $x = l$. Отсюда следует

$$K_t = \frac{|q_x|^{\max}}{|q_x^{ср}|} = \frac{ml\,[\varkappa + \mathrm{ch}\,(ml)]}{(1+\varkappa)\,\mathrm{sh}\,(ml)} \quad \text{при} \quad \varkappa \leqslant 1;$$

$$K_t = \frac{ml\,[\varkappa\,\mathrm{ch}\,(ml) + 1]}{(1+\varkappa)\,\mathrm{sh}\,(ml)} \quad \text{при} \quad \varkappa \geqslant 1. \quad (7.18)$$

Значения K_t по (7.18) представлены в табл. 7.2.
Видно, что K_t при увеличении параметра ml увеличивается, а при увеличении $\varkappa$ от 0 до 1 уменьшается.

Для слабонагруженных фланговых швов (см. рис. 7.9, *д*) $q_x^{ср} = 0$. Однако усилия $q_x(x)$ могут заметно отличаться от нуля. Распределение усилий $q_x(x)$ по экспериментальным данным схематически показано на рис. 7.9, *е*. Можно количественно оценить значения $q_x(x)$ расчетным путем из уравнения (7.14) при условиях

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{q_x}{A}\right) = -\frac{\sigma_\infty}{E_2} \quad \text{при} \quad x = \pm l_1. \quad (7.19)$$

При $\psi = 1$ и $E_1F_1 = \text{const}$, $E_2F_2 = \text{const}$ получим

$$q_x(x) = -\frac{\sigma_\infty A}{E_2}\,\frac{\mathrm{sh}\,(mx)}{m\,\mathrm{ch}\,(ml)}. \quad (7.20)$$

Отношение максимальных касательных напряжений $\sigma_{\varphi x}^{\max}$ к номинальным σ_∞

$$\frac{\sigma_{\varphi x}^{\max}}{\sigma_\infty} = \frac{|q_x|^{\max}}{h\sigma_\infty} = \frac{A}{E_2 mh}\,\frac{\mathrm{sh}\,(ml_1)}{\mathrm{ch}\,(ml_1)}. \quad (7.21)$$

Из (7.21) следует, что при $m \to 0$ $\sigma_{\varphi x}^{\max}/\sigma_\infty \to Al_1/E_2h \approx \approx 0{,}4l_1/h$. При $ml_1 > 2{,}5$ $\sigma_{\varphi x}^{\max}/\sigma_\infty \approx \dfrac{0{,}11}{ml_1}\dfrac{l_1}{h}$, т. е. максимальные напряжения в слабонагруженном фланговом шве, соединяющем ненагруженный элемент с нагруженным, могут быть соизмеримы с напряжениями σ_∞ в нагруженном элементе. Чем больше длина $2l_1$ флангового шва и жесткость соединяемых элементов, тем больше усилия $|q_x|^{\max}$, возникающие в шве.

Для приведенной на рис. 7.9, *в* схемы таврового соединения элементов с угловыми швами распределение усилий q_z

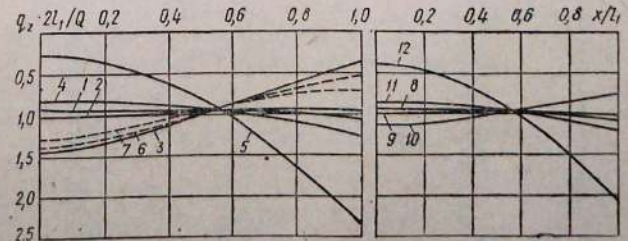


Рис. 7.11. Распределение относительных усилий $q_z \cdot 2l_1/Q$ вдоль лобового шва для вариантов из табл. 7.3. Номер кривой соответствует номеру варианта.

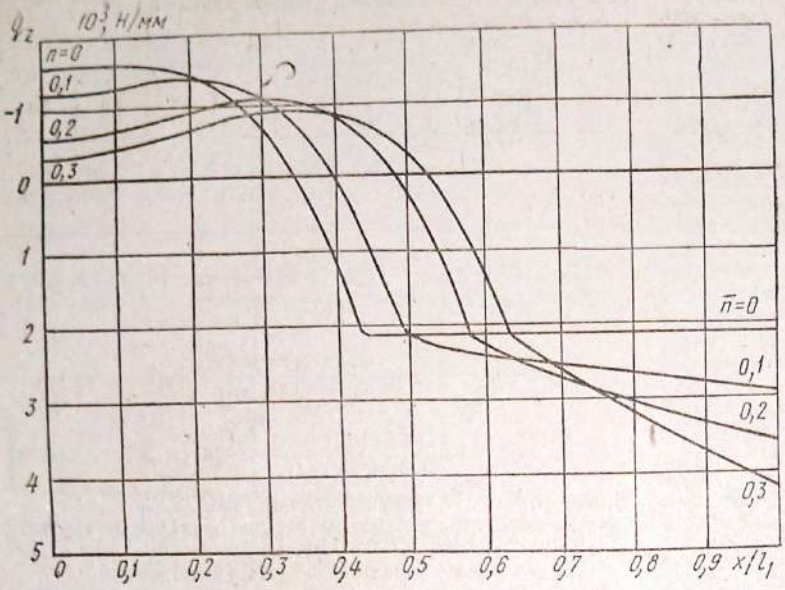


Рис. 7.12. Распределение усилий $q_z\,(x/l_1)$ вдоль лобового шва для варианта 13 из табл. 7.3 при $q_0^{\text{т}} = 2121$ Н/мм, $Q = 0{,}92\,q_0^{\text{т}} l_1$ и различных значениях $\bar{n}$.

вдоль шва исследовалось как экспериментально, так и расчетным путем [9, 10]. На рис. 7.9, *г* схематически показано распределение усилий $q_z\,(x)$, когда изгибная жесткость первого элемента больше или равна изгибной жесткости второго элемента, т. е. $E_1 I_1 \geqslant E_2 I_2$, где I_j — момент инерции сечения $x = \text{const}$ $(j = 1, 2)$. Для количественной оценки $q_z\,(x)$ можно использовать зависимости ($E_j I_j = \text{const}$, простое упруго-пластическое нагружение металла шва)

$$\frac{d^4}{dx^4}\left(\frac{q_z}{\psi}\right) + Dq_z + \frac{Q}{2}\,\delta\,(x,\,0)\,\frac{A_0}{E_1 I_1} = 0; \quad (7.22)$$

$$\left.\begin{aligned} &\frac{dq_z}{dx} = \frac{d^3 q_z}{dx^3} = 0 \quad \text{при} \quad x = 0;\\ &\frac{d^2}{dx^2}\,(q_z/\psi) = -\frac{Q\,(l_2 - l_1)}{2E_2 I_2}\,A_0 \quad \text{при} \quad x = l_1;\\ &\frac{d^3}{dx^3}\,(q_z/\psi) = \frac{QA_0}{2E_2 I_2}, \end{aligned}\right\} \quad (7.23)$$

где $\delta\,(x, 0)$ — функция Дирака; $A_0 = G_{\text{ш}} h/a$; $\psi = 1$ при упругом деформировании металла шва, $\psi < 1$ при пластическом течении шва и определяется условием текучести вида (7.16), если принять

$$q_z^{\text{т}} = q_0^{\text{т}}\,(1/\psi)^{\bar{n}}; \quad q_0^{\text{т}} = \sigma_{\text{т}} h/\sqrt{1 + 2\sin^2\varphi_x}; \quad (7.24)$$

здесь φ_x — угол сечения потенциального пластического течения (обычно $\varphi_x \approx \frac{\pi}{4} \ldots \frac{\pi}{3}$); $\bar{n}$ — показатель степени деформационного упрочнения материала шва.

Таблица 7.3. Значения отношения $|q_z|^{\max}/q_z^{\text{ср}}$

Вариант	n_1	n_2	l_2/l_1	$\lvert q_z\rvert^{\max}/q_z^{\text{ср}}$
1	6,0	6,0	1	1,06
2	3,0	6,0	1	1,02
3	0,6	6,0	1	1,46
4	6,0	3,0	1	1,28
5	6,0	0,6	1	2,31
6	0,6	6,0	1,5	1,38
7	0,6	6,0	2,0	1,30
8	19,0	19,0	1,33	1,05
9	9,5	19,0	1,33	1,02
10	1,9	19,0	1,33	1,16
11	19,0	9,5	1,33	1,20
12	19,0	1,9	1,33	2,05
13	6,0	0,006	1,0	8,44

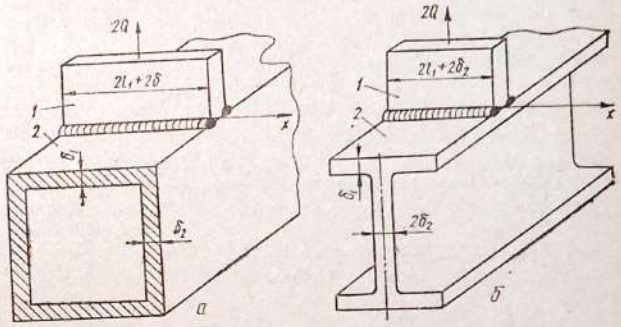


Рис. 7.13. Сварные узлы с неравномерно нагруженными лобовыми угловыми швами, соединяющими пластинчатый элемент со стойкой коробчатого (*а*) и таврового (*б*) сечений.

При упругом деформировании металла шва решение для относительных усилий $q_z(x)/q_z^{\text{ср}}$, где $q_z^{\text{ср}} = Q/2l_1$, определяется безразмерными параметрами $n_1 = E_1 I_1/A_0 l_1^4$, $n_2 = E_2 I_2/A_0 l_1^4$ и l_2/l_1. На рис. 7.11 даны такие решения в зависимости от x/l_1 для различных сочетаний указанных параметров по табл. 7.3. На рис. 7.12 представлены результаты, полученные при упруго-пластическом деформировании металла шва для варианта 13.

В табл. 7.3 приведены значения отношения $|q_z|^{\max}/q_z^{\text{ср}}$ при упругом деформировании материала шва. Это отношение иллюстрирует степень неравномерности распределения усилий $q_z\,(x)$ вдоль сварного шва. В частности, видно, что увеличение изгибной жесткости элементов (увеличение n_1 и n_2) способствует более равномерному распределению усилий вдоль сварного шва. Если n_1 и n_2 одновременно больше 5, то распределение усилий q_z можно считать равномерным, т. е. $q_z\,(x) = q_z^{\text{ср}}$. При уменьшении n_2 более нагруженной является часть сварного шва в зоне $x = l_1$, а при заметном уменьшении n_1 $(n_1 < 1)$ более нагруженной становится зона $x = 0$. Пластическое течение способствует более равномерному распределению усилий $q\,(x)$ вдоль всей длины шва. Деформационное упрочнение материала шва приводит к неравномерному распределению усилий вплоть до разрушения (см. рис. 7.12).

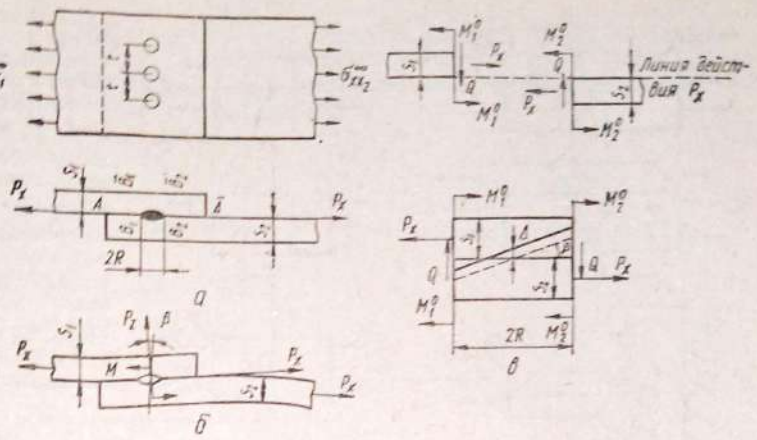


Рис. 7.14. Сварное соединение с однорядным точечным швом:
а — схема до нагружения; *б* — деформирование при нагружении усилием P_x; *в* — действующие усилия и моменты в зоне шва.

Определенный интерес для практики изготовления металлических конструкций представляют сварные узлы, изображенные на рис. 7.13. Это стойки либо поясные элементы ферм из достаточно тонкостенного профиля, к которым крепятся раскосы, либо другие связи через соответствующие пластинчатые элементы (косынки, бракеты и пр.). В таких соединениях основную нагрузку несет участок сварного шва над соответствующей вертикальной стенкой толщиной δ_2 (см. рис. 7.13, *а*) или $2\delta_2$ (см. рис. 7.13, *б*). В зависимости от толщины δ_1 определенную нагрузку несет и участок шва — $l_1 < x < l_1$ (см. рис. 7.13, *а*) либо $\delta_2 < |x| < l_1$ (см. рис. 7.13, *б*).

В работе [10] приведены результаты экспериментальных исследований несущей способности таких швов с помощью «эквивалентной» длины шва аналогичного сечения, но при равномерном распределении нагрузки:

$$l_{экв} = 2\delta_2 + c\delta_1 \leqslant 2(l_1 + \delta_2), \qquad (7.25)$$

где c — эмпирический коэффициент, зависящий от прочности материала и формы профиля 2, а также от направления нагрузки (сжатие либо растяжение). Из табл. 7.4 видно, что «эквивалентная» длина сварного шва в рассматриваемых узлах достаточно сильно зависит от толщины δ_1, δ_2 и не зависит от длины $2l_1$, если выполняется неравенство $2l_1 > c\delta_1$.

Рассмотрим еще один характерный вид сварных соединений, где распределение напряжений (усилий) существенно зависит от формы и геометрических размеров соединения. Это сварные соединения внахлестку с многоточечными швами (см. рис. 7. 3 и 7. 4), полученными точечной контактной сваркой или с помощью электрозаклепок. Соединение внахлестку с однорядным и односрезным точечным швом (см. рис. 7.3, *а*) нагружено в плоскости соединяемых листов усилием P_x на одну сварную точку. Усилие P_x определяется через напряжения σ^{∞}_{xxj}, толщины δ_j и шаг t между сварными точками: $P_x = \sigma^{\infty}_{xxj}\delta_j t$, $j = 1, 2$.

В результате нагружения происходит определенное деформирование соединений (рис. 7.14). На сварную точку при рассматриваемом деформировании действуют срезывающая сила $\overline{P}_x = P_x \cos\beta$, отрывная сила $P_z = P_x \sin\beta$ и момент $M_{из} = M_1^{(0)} + M_2^{(0)} = P_x \dfrac{\delta_1 + \delta_2}{2} \cos\beta$. Здесь $M_j^{(0)}$ — изгибающий момент в околошовной зоне j-го элемента ($j = 1, 2$). Угол β достаточно сложно зависит от геометрических размеров, механических свойств и нагрузки P_x. Имеются различные приближенные решения, как, например, в работе [11] для однородных свариваемых образцов ограниченной длины при условии упругого деформирования. Ниже приведено также приближенное решение, но с учетом разнородности свойств и разных толщин δ_1, δ_2 свариваемых элементов. Рассматриваются соединяемые элементы ($j = 1, 2$) и зона сварной точки размером $2R$. Полагаем, что зона сварной точки только поворачивается на некоторый угол β и смещается от линии действия силы P_x на некоторое расстояние Δ. Поперечное перемещение соединяемых элементов $u_j(x_j)$ определяется решением следующей краевой задачи:

$$\frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j^2}\overline{E}_j I_j = -M_j^{(0)} + P_x(u_j - u_{j0}) \quad (0 < x_j < \infty,\ j = 1, 2), \qquad (7.26)$$

$$x_j = 0, \quad u_j = u_{j_0}, \quad \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = \beta,$$

$x_j \to \infty$; u_j — ограниченная величина;

$$M_1^{(0)} + M_2^{(0)} = P_x \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} - P_z \cdot 2R; \quad P_z = P_x\beta;$$

$$I_j = \delta_j^3 t/2;$$

$\overline{E}_j = E_j$ — модуль Юнга при упругом деформировании, т. е. при $|\sigma^{\infty}_{xxy}| < \sigma_{\tau_j}$ ($j = 1, 2$). При развитом пластическом течении ($|\sigma^{\infty}_{xxj}| > \sigma_{\tau_j}$), характерном для предельного состояния вязкого материала при статическом нагружении, принимается $\overline{E} \approx (S_k - \sigma_\tau)/\ln\left(\dfrac{1}{1-\psi}\right)$, что примерно соответствует линейному упрочнению материала; ψ, S_k — стандартные характеристики материала.

Обозначив $m_j^3 = P_x/E_j I_j$, получим из (7.26)

$$u_j(x_j) = \frac{M_j^{(0)}}{P_x} + C_j e^{-m_j x_j} + u_{j0} \quad (j = 1, 2);$$

$$C_j = -M_j^{(0)}/P_x; \quad \beta = \frac{M_j^{(0)}}{P_x} m_j = \qquad (7.27)$$

$$= \frac{S_1 + S_2}{2} \frac{1}{2R + \dfrac{1}{m_1} + \dfrac{1}{m_2}}; \quad M_j^{(0)} = P_x\beta/m_j.$$

Таблица 7.4. **Значения коэффициента c**

Марка стали	Нагрузка	Профиль	
		рис. 7.13, *а*	рис. 7.13, *б*
37	Растяжение	5	7
	Сжатие	7	10
52	Растяжение	4	5
	Сжатие	6	7

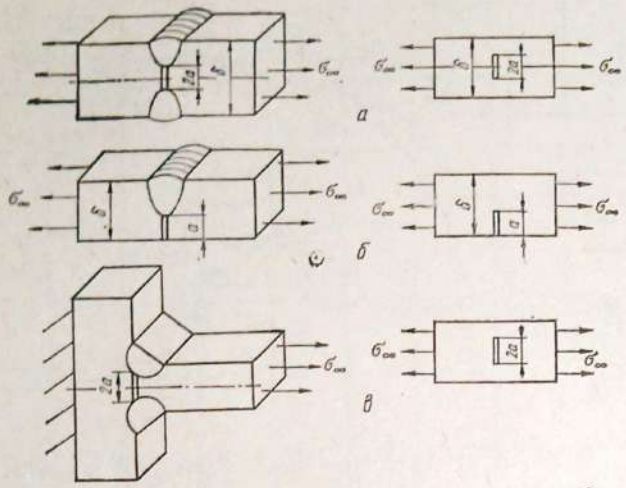


Рис. 7.15. Конструктивные несплошности трещинообразной формы при сварке стыковыми двухсторонними (*а*), односторонними (*б*) и угловыми (*в*) швами с неполным проплавлением.

Из (7.27) следует, что угол β изменяется в пределах $0 < \beta < (\delta_1 + \delta_2)/4R$ при $0 < P_x < \infty$, а отношение

$$M_1^{(0)}/M_2^{(0)} = (E_1 I_1/E_2 I_2)^{0,5} = \left[\frac{\overline{E}_1}{\overline{E}_2}\left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right)^3\right]^{0,5}.$$

Зная угол β, а также величины $M_1^{(0)}$, $M_2^{(0)}$, можно инженерными методами определить напряженное состояние в различных сечениях сварного соединения. Так, в сварной точке по линии примыкания $A—\overline{A}$ (см. рис. 7.14, *а*) максимальные значения интенсивности напряжений

$$\sigma_{i\,\text{ср}}^{\max} = \sqrt{\left[\frac{P_z}{\pi R^2} + \frac{3}{4}\frac{(M_1^{(0)} + M_2^{(0)})}{R^3}\bar{c}\right]^2 + 3\left(\frac{\overline{P}_x}{\pi R^2}\right)^2}. \tag{7.28}$$

На цилиндрической поверхности $B_1 — \overline{B}_1$, $B_2 — \overline{B}_2$ (см. рис. 7.15, *а*) максимальные интенсивности напряжений, связанные с вырывом точки из j-го элемента,

$$\sigma_{i\,\text{выр}j}^{\max} = \sqrt{3\left(\frac{P_z}{2\pi R\delta_j} + \frac{M_1^{(0)} + M_2^{(0)}}{4R^2\delta_j}\bar{c}\right)^2 + \left(\frac{P_x}{l\delta_j}\right)^2}. \tag{7.29}$$

По линии $x = \text{const}$ околошовной зоны j-го элемента напряжения от растяжения и изгиба

$$\sigma_{xxj}^{\max} = \frac{\overline{P}_x}{\delta_j t} + 4\frac{M_j^{(0)}}{\delta_j^2}\bar{c}. \tag{7.30}$$

В зависимостях (7.28) — (7.30) $\bar{c} \approx 1{,}5$ при упругом нагружении и $\bar{c} = 1$ при больших пластических деформациях.

Для двухсрезного однорядного многоточечного шва роль изгиба незначительна, т. е. можно считать, что $M_1^{(0)} = M_2^{(0)} = 0$, $\beta = 0$, $P_t = 0$, и, следовательно, по (7.28)

$$\sigma_{i\,\text{ср}}^{\max} = \sqrt{3}P_x/\pi R^2, \tag{7.31}$$

а по (7.29) и (7.30)

$$\sigma_{xxj}^{\max} = (P_x/l)\,\delta_j. \tag{7.32}$$

Для соединений, представленных на рис. 7.14, при количестве поперечных рядов $n \geqslant 2$ можно не учитывать роль изгибных деформаций как в случае односрезных, так и, тем более, в случае двухсрезных соединений, т. е. использовать зависимости (7.31), (7.32), где вместо P_x подставить максимальное значение усилий $P_{xk}^{\max}$ для соответствующего поперечного ряда k ($1 \leqslant k \leqslant n$). При равномерном распределении внешней нагрузки Q_x между поперечными рядами величина $P_{xk}^{\max}$, очевидно, равна Q_x/n (n — количество поперечных рядов). Примерно такое состояние при $n > 2$ имеет место при развитом пластическом течении материала сварных точек. Однако при упругом деформировании (малые нагрузки) распределение усилий P_{xk} может быть весьма неравномерным. Если обозначить $T_k = P_{xk}n/Q_x$, то для величины T_k ($k = 1, 2, \ldots, n$) можно использовать следующую систему уравнений:

$$\begin{gathered} T_{k+1} + T_{k-1} - T_k[2 + \xi(1 + \varkappa)] = 0 \\ (k = 2, 3, \ldots, n-1); \\ T_2 = T_1[1 - \xi(1 + \varkappa)] + \xi(\varkappa\eta + 1); \\ T_n = T_{n-1}[1 - \xi(1 + \varkappa)] + \xi\varkappa(\eta - 1), \end{gathered} \tag{7.33}$$

где $\xi = \dfrac{2\pi R^2 Gl}{(\delta_1 + \delta_2)E_1\delta_1 b}$; $\varkappa = \dfrac{E_1\delta_1}{E_2\delta_2}$; $G \approx \dfrac{E_1 + E_2}{4(1 + v)}$; $\eta = 1$, если нагрузка Q_x приложена к элементу 2 (см. рис. 7.4), и $\eta = 0$, если нагрузка на элемент 2 приложена со стороны кромки $x = 0$.

В табл. 7.5 приведено решение системы (7.33) при $\xi = 2{,}63$, $\varkappa = 1{,}36$ для $\eta = 0$ и $\eta = 1$ и $n = 2 \ldots 6$. Видно, что при указанных значениях ξ и $\varkappa$ увеличение количества поперечных рядов n выше трех малоэффективно с точки зрения уменьшения нагрузки на одну точку. Однако увеличение n способствует повышению надежности всего соединения, поскольку отказ нагруженных рядов точек приведет лишь к нагружению слабонагруженных рядов.

Изложенные выше сведения относительно особенностей распределения напряжений (деформаций) в зоне сварных соединений не распространяются на участки у вершины трещинообразных полостей, наличие которых достаточно характерно для многих соединений (рис. 7.15—7.17). Для таких участков классические подходы теории упругости дают весьма значительные величины коэффициентов концентрации K_t, применение которых в прочностных расчетах встречает серьезные затруднения. В связи с этим большой интерес представляют работы по теории трещин в деформируемой среде. Показано [12], что вблизи вершины трещины напряженное состояние упругого тела выражается через некоторые интегральные характеристики внешнего нагружения и формы тела. Общие условия деформирования у вершины трещины могут быть представлены комбинацией трех канонических форм

Таблица 7.5. Значения T_k при $\xi = 2{,}63$, $\varkappa = 1{,}36$

n	η	k					
		1	2	3	4	5	6
2	1	0,458	0,542	—	—	—	—
	0	0,722	0,278	—	—	—	—
3	1	0,396	0,065	0,539	—	—	—
	0	0,856	0,059	0,004	—	—	—
4	1	0,394	0,030	0,039	0,000	—	—
	0	0,856	0,059	0,004	0,000	—	—
5	1	0,394	0,028	0,004	0,037	0,537	—
	0	0,856	0,059	0,004	0,000	0	—
6	1	0,394	0,027	0,002	0,003	0,037	0,537
	0	0,856	0,059	0,004	0,00	0,000	0,000

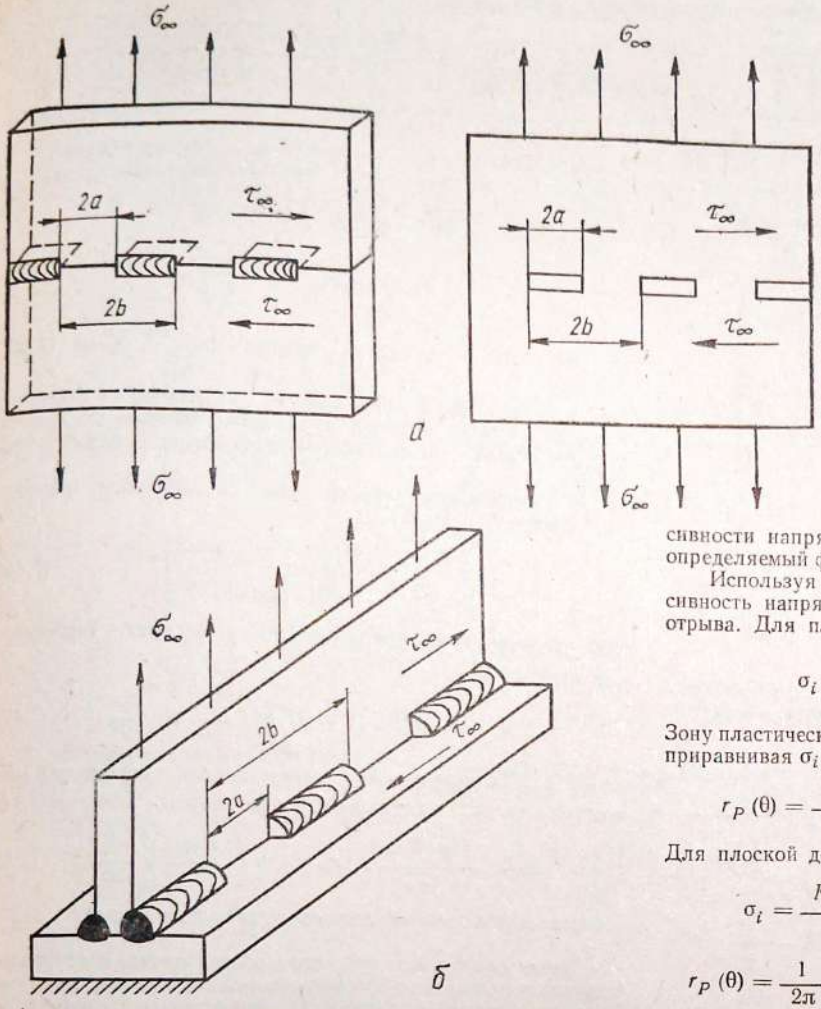


Рис. 7.16. Конструктивные несплошности трещинообразной формы при сварке стыковыми (*а*) и угловыми (*б*) прерывистыми швами.

деформирования, определяемых характером смещения берегов трещины относительно друг друга (рис. 7.18).

Напряжения и перемещения у вершин указанных трех типов трещин выражаются следующими зависимостями в системе координат $Oxyz$.

1. Трещина нормального отрыва (см. рис. 7.18, *а*):

$$\begin{vmatrix}\sigma_{xx}\\ \sigma_{yy}\\ \sigma_{xy}\end{vmatrix} = \frac{K_I \cos\frac{\theta}{2}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{vmatrix} 1-\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3}{2}\theta \\ 1+\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3}{2}\theta \\ \sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\end{vmatrix}; \quad (7.34)$$

$$\begin{vmatrix}u_x\\ u_y\end{vmatrix} = \frac{K_I(1+\nu)}{E}\sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{vmatrix}\left(\varkappa_\sigma - 1 + 2\sin^2\frac{\theta}{2}\right)\cos\frac{\theta}{2}\\ \left(\varkappa_\sigma + 1 - 2\sin^2\frac{\theta}{2}\right)\sin\frac{\theta}{2}\end{vmatrix}, \quad (7.35)$$

где в случае плоского напряженного состояния $\sigma_{zz} = 0$, $\varkappa_\sigma = 1 + 2\frac{1-\nu}{1+\nu}$; в случае плоской деформации $u_z = 0$, $\varkappa_\sigma = 3-4\nu$, $\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$; K_I — коэффициент интенсивности напряжений для трещины нормального отрыва, определяемый формой тела и видом нагрузки.

Используя зависимости (7.34), можно определять интенсивность напряжений σ_i у вершины трещины нормального отрыва. Для плоского напряженного состояния ($\sigma_{zz} = 0$)

$$\sigma_i = \frac{K_I \cos\theta/2}{\sqrt{2\pi r}}\sqrt{1 + 3\sin^2\theta/2}. \quad (7.36)$$

Зону пластических деформаций можно приближенно описать, приравнивая σ_i пределу текучести материала $\sigma_т$, т. е.

$$r_P(\theta) = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K_I}{\sigma_т}\right)^2 \cos^2\frac{\theta}{2}\left(1 + 3\sin^2\frac{\theta}{2}\right). \quad (7.37)$$

Для плоской деформации ($\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$)

$$\sigma_i = \frac{K_I \cos\theta/2}{\sqrt{2\pi r}}\sqrt{(1-2\nu)^2 + 3\sin^2\theta/2}; \quad (7.38)$$

$$r_P(\theta) = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K_I}{\sigma_т}\right)^2 \cos^2\frac{\theta}{2}\left[(1-2\nu)^2 + 3\sin^2\frac{\theta}{2}\right]. \quad (7.39)$$

Видно, что при плоской деформации размеры зоны пластической деформации резко уменьшаются, что иллюстрирует рис. 7.19, *а*, где приведены значения $r_P \cdot 2\pi(\sigma_т/K_I)^2$ в зависимости от угла θ ($\pi \geqslant \theta \geqslant 0$) при $\nu = 0{,}25$.

2. Трещина поперечного сдвига (см. рис. 7.19, *б*):

$$\begin{vmatrix}\sigma_{xx}\\ \sigma_{yy}\\ \sigma_{xy}\end{vmatrix} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{vmatrix} -\left(2 + \cos\frac{\theta}{2}\cos 3\theta/2\right)\sin\theta/2 \\ \sin\theta/2\cos\theta/2\cos 3\theta/2 \\ (1 - \sin\theta/2\sin 3/\theta 2)\cos\theta/2\end{vmatrix}, \quad (7.40)$$

$\sigma_{zz} = 0$ при малых толщинах, $\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) = -\frac{2K_{II}\nu}{\sqrt{2\pi r}}\sin\frac{\theta}{2}$ при больших толщинах;

$$\begin{vmatrix}u_x\\ u_y\end{vmatrix} = \frac{K_{II}(1+\nu)}{E}\sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{vmatrix}\left(\varkappa_\sigma + 1 + 2\cos^2\frac{\theta}{2}\right)\sin\frac{\theta}{2}\\ -\left(\varkappa_\sigma - 1 - 2\sin^2\frac{\theta}{2}\right)\cos\frac{\theta}{2}\end{vmatrix}, \quad (7.41)$$

K_{II} — коэффициент интенсивности напряжений для трещины поперечного сдвига.

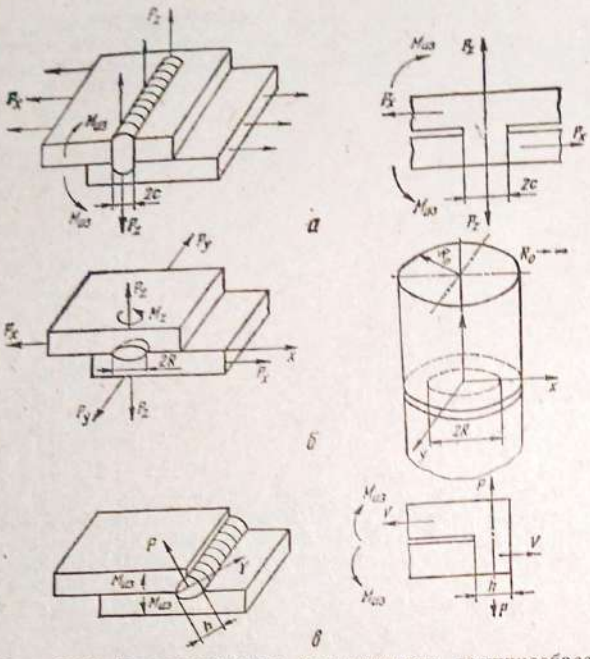


Рис. 7.17. Конструктивные несплошности трещинообразной формы при сварке соединений внахлестку прорезным (*а*), точечным (*б*) и угловым (*в*) швами.

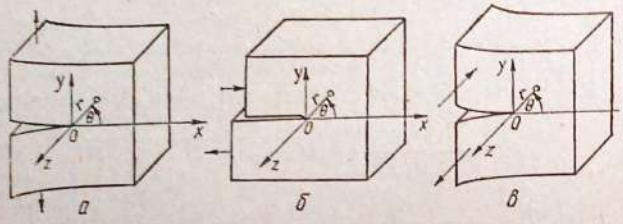


Рис. 7.18. Характерные виды трещин:
а — нормального отрыва; *б* — поперечного сдвига; *в* — продольного сдвига.

Интенсивность напряжения при $\sigma_{zz} = 0$

$$\sigma_i = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sqrt{\frac{3 + 9\cos^2\theta}{4} + \sin^2\frac{\theta}{2}},$$

и, следовательно,

$$r_P(\theta) = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K_{II}}{\sigma_т}\right)^2\left(\frac{3 + 9\cos^2\theta}{4} + \sin^2\frac{\theta}{2}\right). \quad (7.42)$$

Соответственно при $\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$

$$\sigma_i = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sqrt{\frac{3 + 9\cos^2\theta}{4} + (1 - 2\nu)^2 \sin^2\frac{\theta}{2}}, \quad (7.43)$$

и, следовательно,

$$r_P(\theta) = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}}\right)^2\left[\frac{3 + 9\cos^2\theta}{4} + (1 - 2\nu)^2 \sin^2\frac{\theta}{2}\right].$$

На рис. 7.19, *б* приведены кривые $\frac{r_P \cdot 2\pi}{K_{II}^2}\sigma_т^2$ по (7.42), (7.43), из анализа которых следует, что размеры и форма зоны пластического течения у вершины поперечного сдвига заметно отличаются от таковых для трещины нормального отрыва.

3. Трещина продольного сдвига (антиплоская деформация) (см. рис. 7.18, *в*):

$$\begin{vmatrix}\sigma_{xz}\\ \sigma_{yz}\end{vmatrix} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}}\begin{vmatrix}-\sin\theta/2\\ \cos\theta/2\end{vmatrix}. \quad (7.44)$$

Все остальные компоненты тензора σ_{ij} не имеют особенностей типа $1/\sqrt{r}$;

$$u_z = 4\frac{K_{III}}{E}(1 + \nu)\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\sin\frac{\theta}{2}; \quad (7.45)$$

здесь K_{III} — коэффициент интенсивности напряжений для трещин в условиях антиплоской деформации. С учетом (7.44)

$$\sigma_i = \frac{K_{III}\sqrt{3}}{\sqrt{2\pi r}}; \quad r_P(\theta) = \left(\frac{K_{III}}{\sigma_т}\right)^2\frac{3}{2\pi}. \quad (7.46)$$

Здесь размеры зоны пластического течения не зависят от угла θ.

Выше уже указывалось, что в общем случае нагружения упругое напряженно-деформированное состояние у вершины трещины определяется суммой элементарных состояний по (7.34) — (7.46). Для этого необходимо только знать соответствующие величины K_I, K_{II}, K_{III}.

Применительно к характерным случаям нагружения сварных соединений (см. рис. 7.15—7.17 и др.) величины K_I, K_{II}, K_{III} использовались во многих работах. Предложены различные приближенные зависимости, основанные либо на аналитических решениях для тел, близких по форме и нагружению (как показано на рис. 7.15—7.17), либо на соответствующих численных решениях. В табл. 7.6 на основе

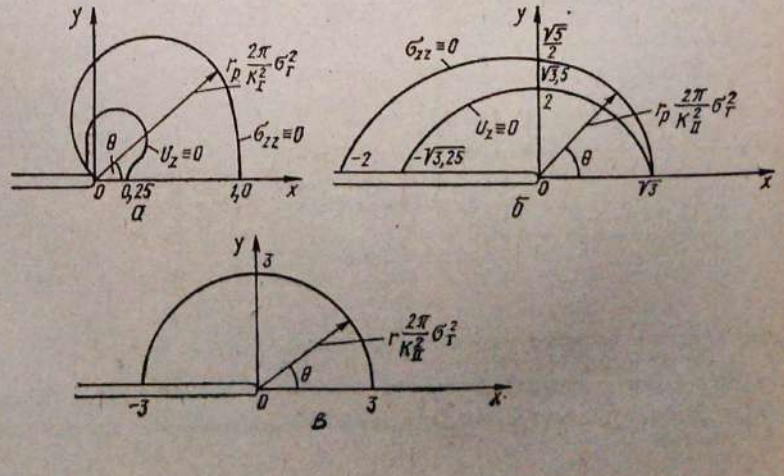
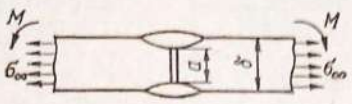
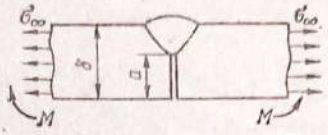
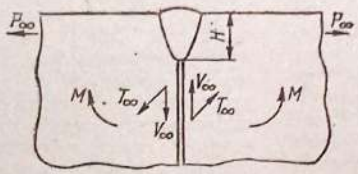
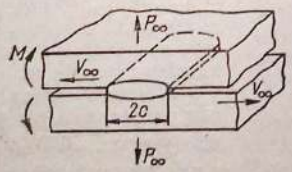
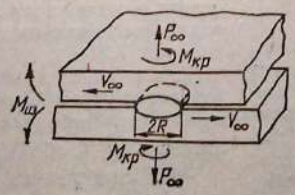
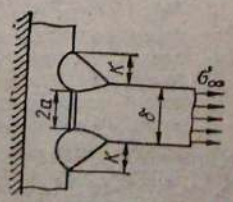
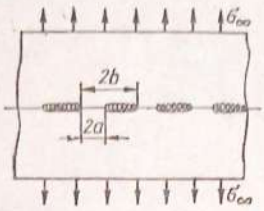


Рис. 7.19. Примерные зоны пластического течения у вершины трещины:
а — трещина нормального отрыва при плоском напряженном состоянии ($\sigma_{zz} \equiv 0$) и плоской деформации ($u_z \equiv 0$); *б* — трещина поперечного сдвига при плоском напряженном состоянии ($\sigma_{zz} \equiv 0$) и плоской деформации ($u_z \equiv 0$); *в* — трещина продольного сдвига.

Таблица 7.6. **Зависимости для определения коэффициентов интенсивности напряжений применительно к сварным соединениям**

Соединение	Схема нагружения	Зависимость
Двухстороннее стыковое с неполным проплавлением		$K_I = \sigma_\infty \sqrt{\pi a}\, f_{1\sigma} + \dfrac{3{,}76Ma^{3/2}}{\delta^3} f_{1M}$, $f_{1\sigma} = \left(\dfrac{1}{2}\cos\dfrac{\pi a}{2\delta}\right)^{-0{,}5}$, $f_{1M} = \begin{cases} 1 \text{ при } a/\delta < 0{,}3, \\ 1{,}005\left[\cos\dfrac{\pi}{2}\left(\dfrac{a}{\delta} - 0{,}3\right)\right]^{-0{,}5} \\ \text{при } 0{,}3 \leqslant a/\delta \leqslant 0{,}85 \end{cases}$
Одностороннее стыковое с неполным проплавлением		$K_I = \sigma_\infty \sqrt{\pi a}\, f_{1\sigma} + \dfrac{6Ma}{(\delta - a)^{3/2}} f_{1M}$, $f_{1\sigma} = \dfrac{1{,}12 + 5\,(a/\delta)^4}{1 - a/\delta}$ при $a/\delta \leqslant 0{,}55$, $f_{1\sigma} = \dfrac{0{,}303\,(1 + 3{,}03a/\delta)}{\sqrt{a/\delta\,(1 - a/\delta)^3}}$ при $a/\delta > 0{,}55$, $f_{1M} = 0{,}7\lambda\sqrt{1 - (1 - a/\delta)^6}$, $\lambda = 1$ при $a/\delta > 0{,}05$, $\lambda = 1{,}15 - 60\,(a/\delta)^2$ при $a/\delta < 0{,}05$
Щелевое со стыковым швом		$K_I = \dfrac{\sqrt{\pi}}{\pi^2 - 8}\left[\dfrac{4\pi - 12}{\sqrt{H}} P_\infty + \dfrac{4\pi - 8}{H^{3/2}} M\right]$, $K_{II} = \dfrac{\sqrt{\pi}}{\pi^2 - 8}\dfrac{4\pi - 12}{\sqrt{H}} V_\infty$, $K_{III} = \dfrac{\sqrt{\pi}}{\pi^2 - 8}\dfrac{4\pi - 12}{\sqrt{H}} T_\infty$
Внахлестку с роликовым (прорезным) швом		$K_I = \dfrac{P_\infty}{\sqrt{\pi c}} + \dfrac{2M}{\sqrt{\pi}\, c^{3/2}}$, $K_{II} = \dfrac{V_\infty}{\sqrt{\pi c}}$, $K_{III} = 0$
Внахлестку с точечным швом		$K_I = \dfrac{P_\infty}{2\sqrt{\pi}\, R^{3/2}} + \dfrac{3M_{из}}{2\sqrt{\pi}\, R^{5/2}}$, $K_{II} = \dfrac{V_\infty}{2\sqrt{\pi}\, R^{3/2}}$, $K_{III} = \dfrac{3M_{кр}}{4\sqrt{\pi}\, R^{5/2}}$
Тавровое с угловыми швами при неполном проплавлении		$K_I = \dfrac{\sigma_\infty}{1 + \psi K/\delta}\sqrt{\pi a} \cdot f_{1\sigma}$, $f_{1\sigma} = \left(\cos\dfrac{\pi a}{\delta + \psi K}\right)^{-0{,}5}$, $\psi = 1 \ldots 1{,}1$

Продолжение табл. 7.6

Соединение	Схема нагружения	Зависимость
Прерывистое со стыковыми швами		$K_1 = \sigma_\infty \sqrt{\pi a} f_1, \quad f_1 = \sqrt{\frac{2b}{\pi a} \operatorname{tg} \frac{\pi a}{2b}}$

обобщения различных предложений приведены для типовых случаев приближенные зависимости, достаточно удобные для инженерного применения.

7.3. ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ И РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

При производстве строительных стальных конструкций основной объем сварочных работ приходится на выполнение угловых швов. Эти швы в конструкциях заводского изготовления составляют по массе наплавляемого металла более 90 % [13], из них около 40 % — расчетные швы, размеры которых устанавливаются при проектировании в соответствии с расчетами на прочность, и около 60 % — конструктивные швы. Поэтому рациональное проектирование соединений с угловыми швами служит большим резервом повышения эффективности сварочного производства. Использовать этот резерв можно на стадии проектирования конструкций, в связи с чем первостепенное значение приобретают нормы и правила, регламентирующие назначение размеров швов. Проектирование строительных стальных конструкций, включая сварные соединения, проводится в соответствии со СНиП II-23—81 «Стальные конструкции. Нормы проектирования». Это один из наиболее полных комплексных документов по проектированию сварных конструкций, которым наряду со строителями пользуются специалисты смежных отраслей, где создаются сварные конструкции.

Здесь изложено обоснование нормативных требований к статически нагруженным сварным соединениям в стальных конструкциях при их проектировании. Основное внимание уделено соединениям с угловыми швами в соответствии с тем местом, которое они занимают в конструкциях.

7.3.1. Механическая разнородность металла сварных соединений и ее влияние на их несущую способность

Одно из основных требований к сварным соединениям заключается в приближении механических свойств металла шва к свойствам основного металла. Однако реальные сварные соединения в силу ряда металлургических и технологических особенностей сварки имеют высокую степень разнородности свойств в различных зонах, которую можно выразить отношением твердости металла шва или ЗТВ к твердости основного металла. На обобщенной кривой распределения твердости

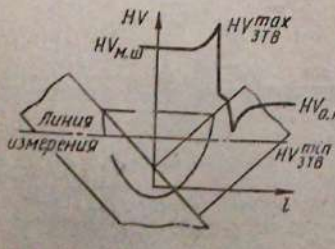


Рис. 7.20. Обобщенная кривая распределения твердости металла в сварном соединении.

в сварном соединении строительной стали (рис. 7.20) представлены показатели, характеризующие степень разнородности свойств металла: твердость металла шва $HV_{м.ш}$ и основного металла $HV_{о.м}$, а также максимальная и минимальная твердость ЗТВ ($HV^{max}_{ЗТВ}$, $HV^{min}_{ЗТВ}$).

Разнородность прочностных свойств металла различных зон можно эффективно использовать при оценке несущей способности сварных соединений с угловыми швами. Распределение прочностных свойств металла в таких соединениях из строительной стали характеризуется следующими положениями.

1. Металл шва практически во всех случаях более прочен, чем основной металл ($HV_{м.ш} > HV_{о.м}$). Главная причина этого заключается в том, что электродные материалы имеют более высокое содержание легирующих элементов. Наиболее характерным примером является применение проволоки Св-08Г2С для сварки низкоуглеродистой стали обыкновенной прочности (Ст3). В ряде случаев применение легированной проволоки и электродов в производственных условиях вызвано стремлением упростить организацию работ путем сокращения ассортимента сварочных материалов. Поэтому для сварки конструкций из стали Ст3, так же как и из низколегированной стали, применяют, например, проволоку Св-08ГА (при механизированной сварке под флюсом) и электроды типа Э46 и Э50 (при ручной сварке).

Кроме того, степень разнородности прочностных свойств $HV_{м.ш}/HV_{о.м}$ повышается в результате увеличения скорости охлаждения при сварке, что хорошо видно из сравнения кривых распределения твердости в соединениях с различными катетами швов (рис. 7.21).

2. В соединениях из низколегированных сталей при обычных условиях сварки наблюдается пик твердости в околошовном участке ЗТВ ($HV^{max}_{ЗТВ} \geqslant HV_{м.ш}$), который образуется в результате закалки слоев металла, расположенных у границы сплавления. С увеличением скорости охлаждения при сварке и содержания легирующих элементов в основном металле максимальная твердость ЗТВ закономерно возрастает (см. рис. 7.21).

Наличие пика твердости в ЗТВ соединений из стали Ст3 зависит от уровня прочности металла шва — в случае применения весьма прочных электродных материалов пик отсутствует: $HV^{max}_{ЗТВ} \leqslant HV_{м.ш}$.

3. В соединениях из обычно применяемых строительных сталей заметного разупрочнения металла в ЗТВ не происходит ($HV^{min}_{ЗТВ} \approx HV_{о.м}$). Однако в настоящее время благодаря развитию черной металлургии намечается существенное увеличение объемов применения термически упрочненного проката, в том числе из низкоуглеродистой стали, склонного к разупрочнению при сварке. Такое разупрочнение приводит к увеличению степени разнородности прочностных свойств металла сварного соединения ($HV_{м.ш}/HV^{min}_{ЗТВ} > HV_{м.ш}/HV_{о.м}$), которая возрастает с уменьшением катета однопроходного углового шва из-за повышения прочности наплавленного металла (рис. 7.22).

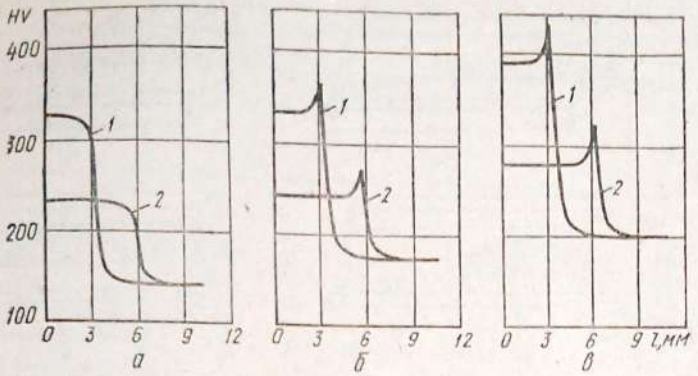


Рис. 7.21. Обобщенные кривые распределения твердости в сварных соединениях сталей Ст3 (*а*), 10Г2С1 (*б*) и 16Г2АФ (*в*) при катете шва 4 мм (*1*) и 8 мм (*2*). Сварка в углекислом газе проволокой Св-08Г2С.

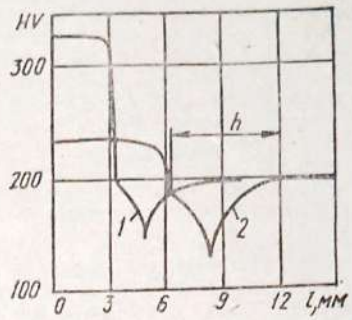


Рис. 7.22. Обобщенные кривые распределения твердости в сварных соединениях термически упрочненной стали Ст3 при катете шва 4 мм (*1*) и 8 мм (*2*). Сварка в углекислом газе проволокой Св-08Г2С; *h* — ширина разупрочненного участка.

В целом разнородность прочностных свойств металла сварных соединений обусловлена микроструктурными изменениями, происходящими под воздействием тепловых и металлургических процессов сварки, которые определяют изменения механических свойств металла, влияющих на напряженно-деформированное состояние и несущую способность соединений с расчетными угловыми швами.

Несущая способность сварного соединения зависит в первую очередь от прочностных свойств металла угловых швов, являющихся основной составной частью соединения. Наиболее действенным средством повышения прочности металла шва следует считать его легирование элементами, содержащимися в сварочных материалах (проволоке, флюсе, электродном покрытии). Дополнительное легирование шва происходит за счет основного металла. Однако доля основного металла в угловом шве в зависимости от способа и технологии сварки, а также катета шва колеблется в пределах 15—50 % (меньшие значения относятся к ручной и многопроходной механизированной сварке). Скорость охлаждения металла шва при сварке также оказывает существенное влияние на его прочностные свойства.

Изложенные общие положения о влиянии состава электродного и основного металла, а также скорости охлаждения при сварке иллюстрируются результатами механических испытаний на растяжение цилиндрических образцов, вырезанных из металла шва (рис. 7.23). При этом очевидно, что прочностные свойства металла шва при прочих постоянных условиях могут быть улучшены за счет применения электродных материалов более высокого класса прочности.

Зависимость прочностных свойств швов от скорости охлаждения вынуждает выбирать базовый размер катета для установления расчетных характеристик угловых швов. В качестве базового принят максимальный катет шва, который можно выполнять за один проход при сварке в нижнем положении: $K = 8$ мм. Основанием для такого решения служит то, что основной объем расчетных угловых швов в строительных конструкциях составляют однопроходные швы, из которых меньшей прочностью обладают швы с максимальным катетом.

Из рассмотренных факторов, влияющих на прочностные свойства металла угловых швов, наиболее простым в управлении и доступным для контроля является легирование элементами, содержащимися в сварочных материалах, т. е. повышение класса электродных материалов. Это условие эффективно использовано в нормах проектирования строительных стальных конструкций для повышения несущей способности угловых швов и учета этого повышения в расчетах путем нормирования прочностных свойств угловых швов в зависимости от класса прочности электродных материалов (а не от класса прочности свариваемой стали). При нормировании прочностных свойств однопроходных угловых швов в конструкциях из низколегированных высокопрочных сталей учтено повышение прочности за счет легирования металла шва из основного металла, что позволяет отказаться от применения высоколегированных электродных проволок с целью повышения расчетных характеристик швов.

При высоких характеристиках прочностных свойств металла угловых фланговых швов разупрочнение металла ЗТВ в соединениях из термически упрочненного проката существенно повышает опасность их разрушения по основному металлу вблизи границы сплавления. В связи с этим самостоятельное значение приобретает вопрос о характере и степени разупрочнения металла ЗТВ при сварке.

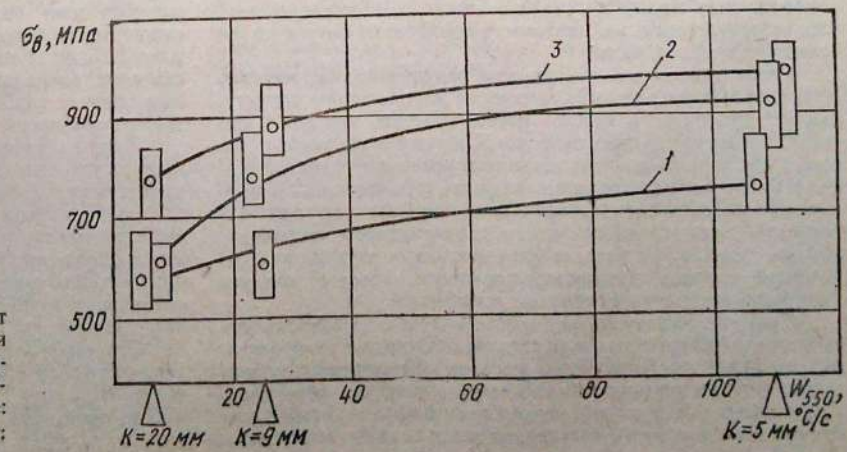


Рис. 7.23. Зависимость $\sigma_в$ металла шва от скорости охлаждения при сварке (W_{550}) и соответствующего ей катета шва для различных сочетаний электродного и основного металла при сварке в углекислом газе: *1* — Св-08Г2С + Ст3; *2* — Св-08Г2С + 16Г2АФ; *3* — Св-08ХГСМФ + 16Г2АФ.

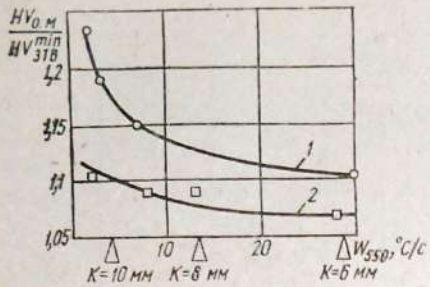


Рис. 7.24. Зависимость степени разупрочнения ЗТВ нахлесточных соединений из термически упрочненного проката толщиной 12 мм из стали Ст3 (*1*) и 10Г2С1 (*2*) от мгновенной скорости охлаждения при сварке (W_{550}) и соответствующего ей катета шва.

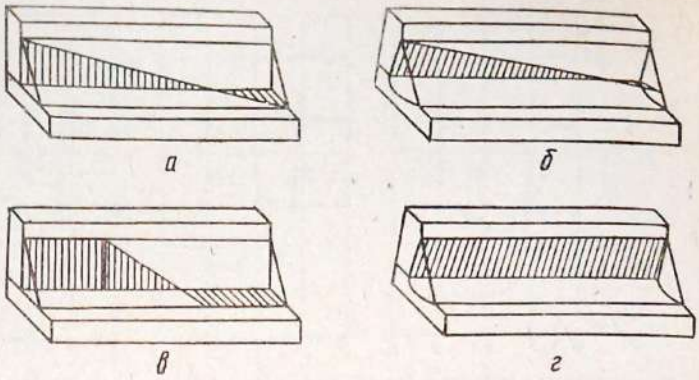


Рис. 7.25. Характерные разрушения угловых фланговых швов.

Участок разупрочнения образуется на некотором расстоянии от границы сплавления в результате отпуска термически упрочненной стали. Разупрочнение определяется длительностью пребывания основного металла выше температуры отпуска, проведенного до сварки. Поскольку длительность пребывания металла выше определенной температуры зависит от скорости его нагрева и охлаждения при сварке, то характеристикой сварочного термического цикла в отношении влияния на разупрочнение ЗТВ может служить мгновенная скорость охлаждения, рассчитанная исходя из параметров режима сварки.

При нагружении сварных соединений с угловыми фланговыми швами разупрочненный участок подвергается воздействию сдвигающих напряжений, при которых эффект контактного упрочнения мягких прослоек [14] не реализуется. В этом случае ширина участка разупрочнения h (см. рис.7. 22) не влияет на несущую способность соединения и основным параметром этого участка следует считать степень разупрочнения $HV_{о.м}/HV^{min}_{ЗТВ}$. Степень разупрочнения при данной толщине проката определяется скоростью охлаждения при сварке (катетом шва) и химическим составом стали (рис.7.24).

Термически упрочненная низкоуглеродистая сталь Ст3 наиболее склонна к разупрочнению при сварке. У низколегированной термически упрочненной стали по сравнению со сталью Ст3 резко сокращается ширина разупрочненного участка и заметно повышается минимальная твердость ЗТВ. Однако в связи с тем что одновременно увеличивается также твердость исходного металла, степень разупрочнения ЗТВ у обеих сравниваемых сталей различается незначительно. Тем не менее наиболее высокая степень разнородности прочностных свойств $HV_{м.ш}/HV^{min}_{ЗТВ}$ имеет место в сварных соединениях стали Ст3, поскольку на практике для сварки низкоуглеродистых сталей обычной прочности и низколегированных сталей повышенной прочности применяют одни и те же электродные материалы.

Рассматривая закономерности разупрочнения металла ЗТВ сварных соединений термически упрочненного проката, следует отметить то важное обстоятельство, что даже при самых неблагоприятных сварочных термических циклах, которые при сварке угловых швов соответствуют условиям выполнения за один проход шва с катетом, равным толщине прикрепляемого элемента, минимальная прочность металла ЗТВ остается выше прочности его в горячекатаном состоянии. Иными словами, на участке разупрочнения сохраняется некоторый уровень остаточной прочности, который следует учитывать при расчетах сварных соединений.

Наличие остаточной прочности в ЗТВ и ее зависимость от исходной прочности стали следует объяснить тем, что применяемый процесс упрочнения проката [15] имеет ряд особенностей термомеханического упрочнения и создает достаточно устойчивую субструктуру, упрочняющий эффект которой частично сохраняется при кратковременном воздействии сварочного термического цикла. В целом можно принять, что в соединениях разупрочняемой при сварке термически упрочненной стали минимальные значения $\sigma_в$ металла ЗТВ не менее чем на 10 % превышают значения $\sigma_в$ металла в горячекатаном состоянии.

Таким образом, сварные соединения с угловыми швами в конструкциях из строительной стали, как правило, характеризуются весьма существенной разнородностью механических свойств в различных зонах. С целью повышения эффективности соединений с расчетными угловыми швами соотношение показателей прочностных свойств металла шва и основного металла может управляться главным образом путем применения различных электродных материалов.

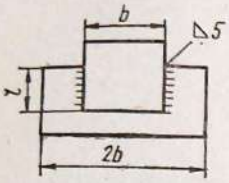
Механическая разнородность металла сварного соединения, форма и размеры шва непосредственно влияют на характер работы и форму поверхности разрушения соединений при достижении ими предельного состояния. Наиболее наглядно это проявляется в соединениях с угловыми фланговыми швами, которые, как известно, в силу особенности напряженно-деформированного состояния обладают наименьшей несущей способностью.

Форму поверхности разрушения фланговых швов можно классифицировать по следующим основным видам, схематически представленным на рис. 7.25: а) разрушение по винтовой поверхности с выходом трещины на поверхность шва в точках, примыкающих к граням соединяемых элементов, где концентрируются передаваемые силовые потоки. Эта форма соответствует швам без глубокого провара, характеризующимся обычным соотношением прочности металла шва и основного металла (см. рис. 7.25, *а*); б) разрушение, близкое по форме к изображенному на рис. 7.25, *а*, при котором у одного конца шва трещина выходит вблизи средней линии его поверхности. Форма свойственна швам, имеющим глубокий провар и обычное соотношение прочности шва и основного металла (см. рис. 7.25, *б*); в) разрушение по двум поверхностям сплавления шва с основным металлом с доломом поперек оси шва. По этой форме разрушаются соединения, у которых швы без глубокого провара и имеют прочность, существенно более высокую, чем у основного металла (см. рис. 7.25, *в*); г) разрушение по одной (меньшей) поверхности сплавления шва с основным металлом. Форма характерна для швов с глубоким проваром и более высокой прочностью по сравнению с основным металлом (см. рис. 7.25, *г*).

Таким образом, основным условием разрушения соединения с угловыми фланговыми швами по границе сплавления является значительное превышение характеристик прочностных свойств металла шва над характеристиками прочностных свойств металла вблизи границы сплавления. При постоянном соотношении прочностных свойств металла шва и основного металла опасность разрушения соединения по границе сплавления возрастает с увеличением длины шва и глубины проплавления.

Для оценки работоспособности и установления предельного состояния соединений с фланговыми швами важное значение имеют их деформационные характеристики, которые можно оценивать по диаграммам сдвига шва. Необходимо учитывать, что в нахлесточных соединениях имеет место не-

Таблица 7.7. Экспериментальная оценка влияния нормальных напряжений в прикрепляемом элементе на величину разрушающего напряжения флангового шва

Форма и размеры образца	b	l	σ_1	$\bar{\tau}_в$	$\hat{\tau}_в$
	мм		МПа		
	120	30	—70	435	25
	50	60	—275	485	30
	120	30	+55	410	45
	50	60	+295	435	25
	50	65	+355	440	25

Примечание. σ_1 — номинальное нормальное напряжение в прикрепляемом элементе; $\bar{\tau}_в$ — среднее разрушающее напряжение; $\hat{\tau}_в$ — среднеквадратическое отклонение разрушающего напряжения.

равномерное распределение напряжений по длине фланговых швов и характер этого распределения зависит от соотношения размеров соединяемых элементов. Поэтому диаграмма сдвига такого шва не является постоянной деформационной характеристикой, такой, как, например, диаграмма $\sigma - \varepsilon$ при одноосном растяжении. Тем не менее диаграмма сдвига флангового шва характеризует работоспособность сварного соединения. Так, например, во всем диапазоне прочностных свойств наплавленного металла, получаемых в строительных конструкциях при применении современных электродных материалов ($\sigma_в = 500...900$ МПа), отношение предела текучести к временному сопротивлению изменяется в узком диапазоне $\tau_т = (0{,}7...0{,}8)\,\tau_в$. Это означает, что при напряжениях, равных расчетным сопротивлениям, угловые швы работают в упругой стадии.

Разрушающие напряжения флангового шва в нахлесточном соединении не являются постоянными. Они зависят от вида нагружения соединения (растяжение или сжатие), а также от значения номинального напряжения в прикрепляемом элементе (табл. 7.7). Зависимость разрушающего напряжения флангового шва от величины и знака σ_1 объясняется влиянием последних на характер и степень стесненности упруго-пластических деформаций в шве. Это подтверждается зависимостью диаграммы сдвига флангового шва от величины напряжения σ_1 (рис. 7.26).

Таким образом, разрушение расчетных угловых швов происходит в условиях сложного напряженного состояния, названного в строительных нормах и правилах условным срезом. При этом разрушающее напряжение шва $\tau_в$ может быть определено как временное сопротивление условному срезу.

7.3.2. Предельное состояние сварных соединений

Предельное состояние служит основой для установления расчетного сопротивления. В первых нормах проектирования в качестве предельного состояния сварных соединений строительных стальных конструкций, как и для основного металла, была принята недопустимо большая деформация. При таком подходе сварное соединение не выделялось из состава конструкции и расчетное сопротивление соединения устанавливалось по пределу текучести основного металла без учета возможных особенностей работы соединения и его действительных прочностных свойств. Это справедливо в отношении большинства стыковых соединений, так как выделять такое соединение из состава конструкции необходимо лишь в случаях, когда оно может оказаться менее прочным, чем основной металл. На практике в нормах проектирования наличие таких случаев отражено путем снижения расчетных сопротивлений стыковых соединений в растягиваемых элементах конструкций, не подвергающихся контролю качества с помощью физических методов.

Для соединений с угловыми швами более эффективным оказался подход, при котором шов рассматривается как самостоятельный объект. При этом показателем, характеризующим разрушение углового шва, в нормах проектирования стальных конструкций принято временное сопротивление металла шва при одноосном растяжении. Он дает возможность устанавливать расчетные сопротивления угловых швов по наиболее распространенному в практике стандартизованному показателю, используя зависимость $R_{wf} = f(\sigma_в)$. При этом используется отношение временного сопротивления условному срезу углового шва к временному сопротивлению при одноосном растяжении металла шва, названное коэффициентом перехода $c = \tau_в/\sigma_в$. Числовые значения коэффициента перехода, определенные по экспериментальным данным, составили 0,68—0,81, что позволило принять в нормах минимальное (с округлением) значение $c = 0{,}7$. Таким образом, в качестве нормативного сопротивления углового шва условному срезу используется величина $\sigma_в$ с учетом коэффициента перехода c.

7.3.3. Установление расчетных сопротивлений сварных соединений на вероятностной основе

В соответствии с общими положениями установления расчетных сопротивлений, сформулированными в основополагающих работах, посвященных методу расчета по предельным состояниям [16—18 и др.], при установлении расчетных сопротивлений сварных соединений должны учитываться два независимых параметра, которые определяют их несущую способность и имеют случайный характер,— прочностные свойства и размеры швов. Это делает необходимым статистический анализ изменчивости указанных параметров. При этом геометрический параметр (размеры швов), в свою очередь, имеет составляющие — внешние размеры, зазоры между свариваемыми элементами, глубину проплавления.

Статистический анализ изменчивости прочностных свойств металла шва, результаты которого положены в основу расчетных сопротивлений, принятых в действующих нормах проектирования, проводился с учетом трех факторов, определяющих прочностные свойства шва: класса прочности электродных материалов, класса прочности основного металла, тепловых условий сварки. Исследовано четыре варианта выполнения швов, которые представляют наиболее типичные и массовые случаи в практике производства стальных конструкций: I — механизированная однопроходная сварка в углекислом газе стали Ст3 проволокой Св-08Г2С; II — ручная многопроходная сварка стали Ст3 электродами МР-3; III — механизированная многопроходная сварка в углекислом газе стали 10ХСНД проволокой Св-08Г2С; IV — механизированная многопроходная сварка под флюсом АН-348 стали 15ХСНД проволокой Св-08ГА.

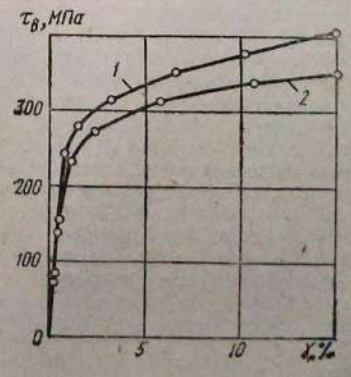


Рис. 7.26. Диаграммы сдвига флангового шва при разных напряжениях σ_1:
1 — $\sigma_1 = 370$ МПа; *2* — $\sigma_1 = 45$ МПа.

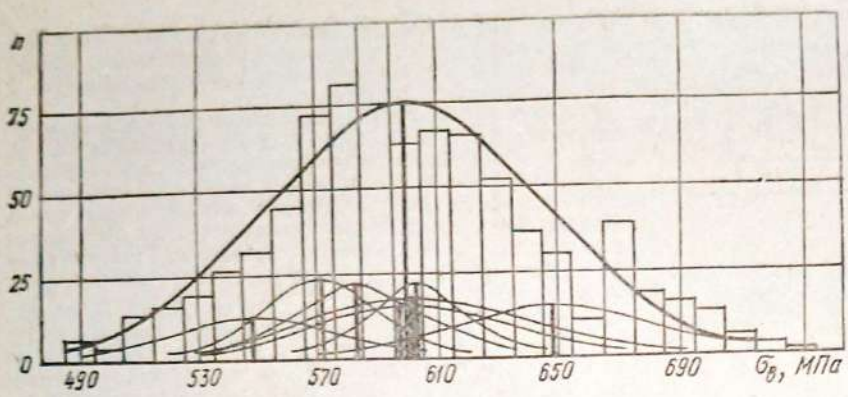


Рис. 7.27. Гистограмма и кривые нормального распределения значений $\sigma_в$ для швов, выполненных проволокой Св-08Г2С на стали Ст3. Кривые распределения для выборок получены на разных заводах.

В целом статистическому анализу подвергнуто около 4000 результатов механических испытаний металла швов, сваренных в реальных производственных условиях. Сварка производилась по технологии, обычно применяемой на каждом из этих заводов, при соблюдении следующих общих условий: толщина свариваемого проката 20 мм, диаметр электродной проволоки 2 мм, катет шва 8—9 мм. Результаты анализа изменчивости временного сопротивления металла шва при варианте I условий сварки представлены на рис. 7.27.

Таблица 7.8. **Статистическая оценка зависимости механических свойств металла шва от различных вариантов сварки**

Вариант сварки	Марка электрода и стали	Объем выборки	Временное сопротивление, МПа			$\sigma_в$ (при обеспеченности 0,95), МПа
			среднее $\bar{\sigma}_в$	стандартное $<\sigma_в$	коэффициент вариации $<\sigma_в/\bar{\sigma}_в$	
I	Св-08Г2С, Ст3	820	600	45	0,075	510
II	МР-3, Ст3	2400	525	34	0,064	460
III	Св-08Г2С, 10ХСНД	200	605	42	0,069	525
IV	Св-08ГА, 15ХСНД	420	550	43	0,078	460

При назначении расчетных сопротивлений металла угловых швов важным является установление браковочного минимума прочностных характеристик металла, наплавленного механизированными способами сварки с применением различных электродных проволок. В отличие от ГОСТ 9467—75, регламентирующего определенный уровень прочности металла шва, стандарты и ТУ на проволоки для механизированной сварки аналогичного регламента не содержат. Поэтому оценка обеспеченности определенного уровня прочностных свойств швов при механизированной сварке имеет большое значение для обеспечения надежности сварных соединений: на стадии проектирования. Табл. 7.8 дает представление об этом показателе для самых распространенных марок электродных проволок, применяемых при сварке в углекислом газе и под флюсом в процессе изготовления строительных стальных конструкций.

Статистическая оценка точности соблюдения проектных размеров катетов швов, использованная при разработке действующих норм проектирования [31], проведена по результатам массовых контрольных измерений швов, выполненных в производственных условиях.

Фактический объем наплавленного металла при всех технологических вариантах превышает проектный объем (даже без учета выпуклой при сварке в углекислом газе или вогнутой при сварке под флюсом формы углового шва) (табл. 7.9).

Основные закономерности влияния производственной технологии сварки на точность выполнения угловых швов:

Таблица 7.9. **Статистическая оценка зависимости отклонения размера катета шва K от его номинального значения $K_н$**

Вид сварки	$K_н$, мм	Диаметр проволоки, мм	Число измерений	Параметры распределения			
				Среднее отклонение, мм	Стандарт K, мм	Асимметрия	Эксцесс
Полуавтоматическая в CO_2	4	1,4	1840	+2,1	1,5	+0,25	+0,06
		2	750	+2,8	1,8	+0,46	+0,21
	6	1,4	205	+1,3	1,8	+0,6	—0,2
		2	1150	+1,8	2,2	+0,37	0
	8	1,4	640	+0,4	1,9	+0,45	—0,29
		2	600	+0,6	1,7	+0,25	—0,45
	10	1,4	590	+1,2	2,0	+0,69	+2,22
		2	255	+2,3	1,5	—0,19	+1,29
Автоматическая под флюсом	4	3	900	+2,4	1,8	+0,38	—0,19
		4	1185	+4,6	1,7	—0,71	+1,03
	6	3	740	+1,2	1,4	+0,26	—0,37
		4	745	+3,0	1,2	+0,09	+0,2
	8	4	785	+1,5	1,5	+0,04	—0,17
	10	3	275	+0,8	1,6	+0,32	+1,2
		4	260	+1,6	1,9	+0,27	+1,37

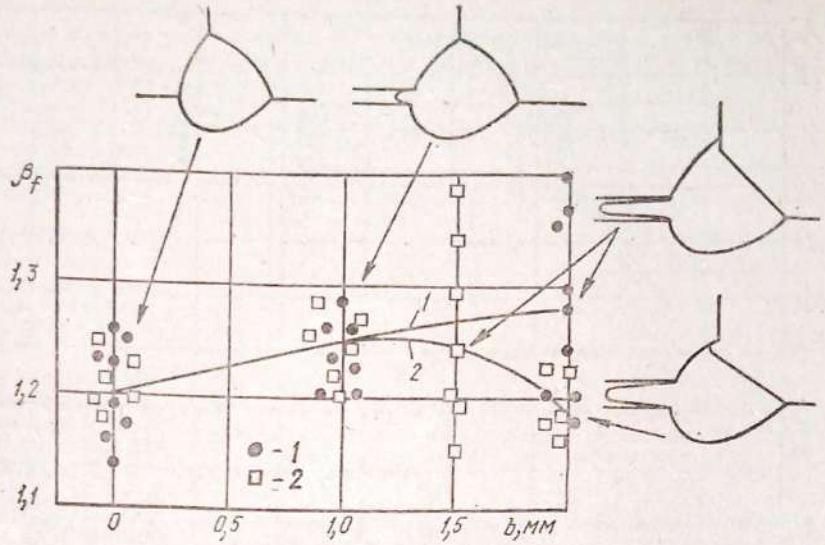


Рис. 7.28. Зависимость формирования шва и коэффициента глубины проплавления от величины зазора b:

1 — постоянный катет шва; *2* — постоянная скорость сварки.

1) уменьшение диаметра электродной проволоки повышает точность выполнения швов. В среднем уменьшение диаметра проволоки с 2 до 1,4 мм при полуавтоматической сварке и с 4 до 3 мм при автоматической сварке позволяет сократить отклонение размера катета на 20 %; 2) наибольшая разница между фактическими и проектными размерами наблюдается у швов небольшого катета (4 мм), поэтому здесь обеспечивается максимальный эффект использования тонкой проволоки. Для максимально возможного однопроходного шва ($K = 8$ мм) при полуавтоматической сварке обеспечивается наибольшая точность соблюдения размеров, которая затем уменьшается с дальнейшим увеличением катета ($K = 10$ мм) из-за увеличения числа проходов при сварке.

Статистический анализ позволяет получить количественное подтверждение большей стабильности процесса автоматической сварки под флюсом по сравнению с полуавтоматической сваркой в углекислом газе. Так, при автоматической сварке минусовое отклонение катета шва от его номинального размера практически не наблюдалось, в то время как при полуавтоматической сварке швов катетом 4 мм такое отклонение имело место в 8 % случаев, а катетом 6 мм — в 15 % случаев. Указанные минусовые отклонения наблюдались на отдельных участках в пределах одного шва; при этом средний фактический катет по длине шва всегда превосходил проектное значение.

На основании полученных данных можно сделать количественную оценку эффективности применения тонкой электродной проволоки: при полуавтоматической сварке швов катетом 6 мм расход проволоки диаметром 1,4 мм на 12,5 % меньше, чем проволоки диаметром 2 мм; для швов катетом 10 мм расход уменьшается на 17 %.

Зазоры между свариваемыми элементами оказывают определенное влияние на формирование угловых швов, от которого может существенно зависеть технологическая прочность и несущая способность соединения. Кинетику влияния зазоров на формирование швов хорошо иллюстрируют результаты, полученные при сварке в углекислом газе швов катетом 4—5 мм (рис. 7.28). Увеличение зазора до 1 мм способствует увеличению глубины проплавления без нарушения нормального формирования шва. Этот процесс оказывает два противоположных воздействия: с одной стороны, повышает несущую способность соединения благодаря увеличению расчетной высоты шва, с другой — увеличивает опасность возникновения горячих трещин из-за образования неблагоприятной формы шва.

При увеличении зазора свыше 1 мм формирование шва ухудшается: расплавленный металл начинает затекать в зазор, не сплавляясь с основным металлом. При этом увеличивается разброс значений расчетной высоты шва. Однако при зазоре до 1,5 мм формирование шва остается вполне удовлетворительным.

В случае полуавтоматической сварки, когда сварщик стремится выдержать постоянный катет шва при колеблющемся зазоре, увеличение зазора до 2 мм не снижает среднее значение расчетной высоты шва, поскольку увеличение зазора компенсируется уменьшением скорости сварки (кривая *1* на рис. 7.28), хотя расчетная высота шва становится весьма нестабильной. В случае сварки с постоянной скоростью перемещения дуги (автоматическая сварка) при зазоре более 2 мм создается реальная опасность нарушения нормального формирования шва (кривая *2* на рис. 7.28).

В целом следует считать, что допустимый зазор между свариваемыми элементами в соединениях с угловыми швами зависит от катета шва. Для швов катетом 4—5 мм зазор не должен превышать 1,5 мм.

Глубина проплавления шва H (см. рис. 7.2) наряду с катетом является геометрическим параметром углового шва, определяющим его несущую способность. Как и другие параметры, учитываемые при расчетах на прочность соединения с угловыми швами, глубина проплавления зависит от ряда случайных факторов, среди которых следует выделить режим сварки, зазор между свариваемыми деталями, угол наклона электрода при сварке.

Влияние глубины проплавления на расчетное сопротивление углового шва принято учитывать с помощью коэффициентов глубины проплавления β_f (для металла шва) и β_z (для границы сплавления).

Корреляционная зависимость коэффициента глубины проплавления β_f от погонной энергии сварки (q/v) приведена на рис. 7.29. Видно, что в диапазоне изменения погонной энергии, соответствующем условиям сварки каждого катета однопроходного шва ($K = 4...8$ мм), средние значения коэффициента β_f изменяются в пределах от 0,9—0,95 (для минимальных значений q/v) до 1,1—1,15 (для максимальных значений q/v). Корреляционная связь между коэффициентом глубины проплавления и катетом шва отсутствует. Более интенсивное влияние q/v на изменение β_f при малом диаметре электродной проволоки объясняется более высокими значениями плотности сварочного тока. С увеличением катета шва интенсивность влияния погонной энергии на глубину проплавления ослабевает, хотя это влияние остается весьма существенным.

Очевидно, что нормирование коэффициента β_f в зависимости от погонной энергии сварки нецелесообразно, поскольку на стадии расчета сварных соединений невозможно учесть технологический фактор — параметры режима сварки и диаметр электрода. Поэтому приведенные результаты сгруппированы по признакам, поддающимся учету при проектировании соединений — по катету шва и виду сварки (табл. 7.10).

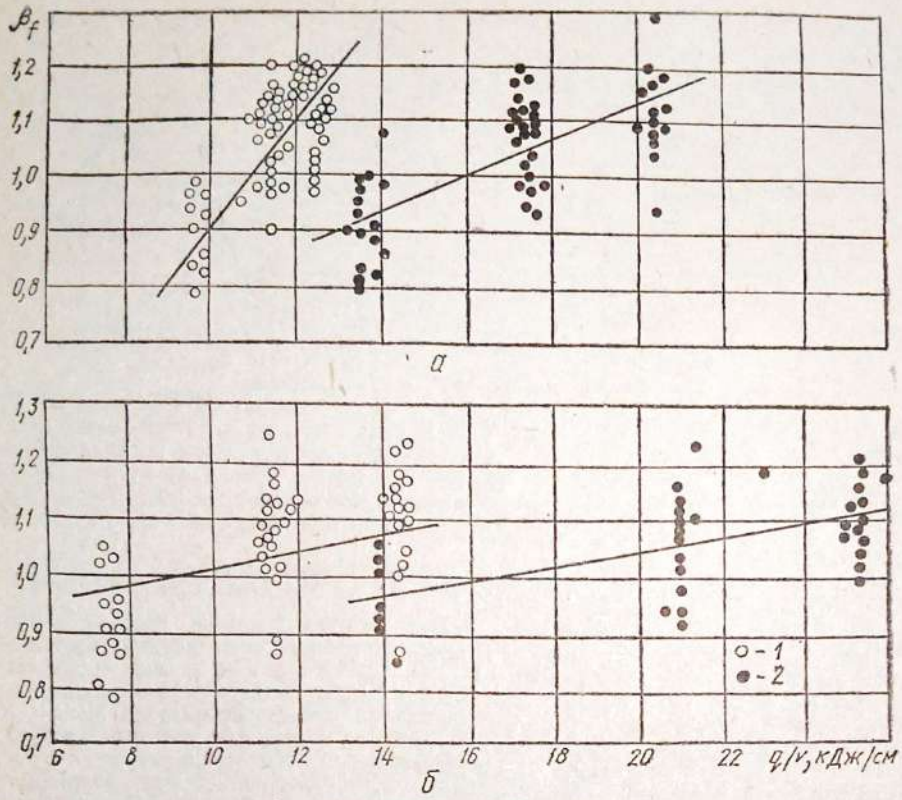


Рис. 7.29. Корреляционная зависимость коэффициента глубины проплавления от погонной энергии сварки при механизированной сварке в углекислом газе:

а — диаметр проволоки 1,4 мм: *1* — $K = 4$ мм; *2* — $K = 6$ мм; *б* — диаметр проволоки 2 мм: *1* — $K = 6$ мм; *2* — $K = 8$ мм.

В каждой из совокупностей распределение результатов измерений имеет нормальный характер, и параметры этих распределений (среднее $\bar{\beta}_f$ и стандарт отклонения $\hat{\beta}_f$) весьма незначительно различаются между собой.

Установление расчетных сопротивлений сварных соединений произведено на вероятностной основе по статистическим данным об изменчивости прочностных свойств металла шва и геометрических параметров швов, выполненных в производственных условиях. Использовано решение [18], позволяющее оценить обеспеченность произведения двух случайных величин:

$$P_R = 1 - \frac{1}{\hat{\sigma}\pi\sqrt{2}} \int_0^{\infty} \exp\left[\frac{(\sigma - \bar{\sigma})}{2\hat{\sigma}^2}\right] \times$$

$$\times \int_{-\infty}^{z} \exp\left[\frac{(a - \bar{a})^2}{2\hat{a}^2}\right] d\sigma da,$$

где P_R — обеспеченность расчетного сопротивления; $z = R/\bar{\sigma} - a/\hat{a}\sqrt{2}$ — предел интегрирования, в котором R — расчетное сопротивление шва.

Параметры, входящие в это выражение, выбраны из следующих соображений. Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение прочностного параметра ($\bar{\sigma}$ и $\hat{\sigma}$) приняты равными произведению соответствующей характеристики временного сопротивления растяжению металла шва ($\bar{\sigma}_в$ или $\hat{\sigma}_в$) и коэффициента перехода c: $\bar{\sigma} = c\bar{\sigma}_в$; $\hat{\sigma} = c\hat{\sigma}_в$.

Математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение геометрического параметра ($\bar{a}$ и $\hat{a}$) приняты равными произведению соответствующей характеристики катета шва ($\bar{K}$ или $\hat{K}$) и коэффициента η: $\bar{a} = \eta\bar{K}$; $\hat{a} = \eta\hat{K}$. Коэффициент $\eta = \beta_f/K_н\beta_{fн}$ учитывает увеличение фактического рабочего сечения шва по сравнению с номинальным сечением вследствие превышения фактической глубины проплавления

Таблица 7.10. **Статистическая оценка зависимости коэффициента глубины проплавления от вида сварки и катета шва**

Вид сварки	K, мм	Условия сварки		Число наблюдений	$\bar{\beta}_f$	$\hat{\beta}_f$	$\hat{\beta}_f/\bar{\beta}_f$
		$d_{эл}$, мм	q/v, кДж/см				
Автоматическая под флюсом	4	3,0	3,8—7,7	140	1,07	0,1	0,093
	6	3,0	8,8—25	250	1,07	0,1	0,093
	6	4,0	8,4—29,4	250	1,07	0,1	0,093
	6	5,0	12,6—29,4	250	1,07	0,1	0,093
	8	4,0	13—29,4	100	1,09	0,1	0,092
	8	5,0	24—29	100	1,09	0,1	0,092
Полуавтоматическая CO_2	4	1,4; 1,6	3,8—6,7	250	1,05	0,11	0,105
	6	1,4	7,4—14,7	370	1,04	0,11	0,106
	6	1,6; 2	7,4—26	370	1,04	0,11	0,106
	8	1,6; 2	14—26	150	1,06	0,09	0,085

(β_f) над номинальной (β_{fn}). Таким образом, катет шва рассматривается как независимая случайная величина, а глубина проплавления — как постоянная величина, равная математическому ожиданию ее фактического распределения. Основанием для такого подхода служат результаты исследований [19, 20], показавших, что колебания глубины проплавления в пределах длины одного шва могут быть без снижения надежности соединения охарактеризованы ее средним значением.

В соответствии с разработанной методикой, для наиболее распространенных вариантов условий сварки — полуавтоматической в углекислом газе стали Ст3 однопроходным швом катетом 8 мм — установлено числовое значение расчетного сопротивления углового шва с обеспеченностью 0,999, которое составляет $R_{wf} = 210$ МПа.

Полученные данные позволяют определить числовые значения коэффициентов, обычно используемых в нормах проектирования стальных конструкций при установлении расчетных сопротивлений. Формула для установления расчетных сопротивлений угловых швов может быть записана в традиционном виде: $R_{wf} = R_{wun} \frac{c}{\gamma_u} \gamma_{wm}$, где R_{wf} и R_{wun} — соответственно расчетное сопротивление и нормативное сопротивление шва; γ_u — коэффициент надежности при расчете по временному сопротивлению, γ_{wm} — коэффициент надежности по материалу.

Принимая полученные значения параметров, входящих в это выражение, $R_{wf} = 210$ МПа; $R_{wun} = 490$ МПа; $c = 0{,}7$; $\gamma_u = 1{,}3$, можно определить значение коэффициента $\gamma_{wm} = 1{,}25$.

7.3.4. Расчет сварных соединений с угловыми швами в соответствии с действующими нормами проектирования

Из факторов, влияющих на статическую прочность угловых швов, следует выделить два основных — ориентацию шва относительно направления усилия, действующего на соединение, и прочностные свойства металла шва.

Зависимость прочности угловых швов от направления действующего усилия учитывается в ряде нормативных документов при расчете сварных соединений. При этом, по рекомендации МИС, принимается расчетная схема углового шва (рис. 7.30), в которой учтены следующие компоненты напряжений: $\sigma_\perp$ — нормальное напряжение; $\tau_\perp$ — касательное напряжение в направлении, перпендикулярном к оси шва; $\tau_\parallel$ — касательное напряжение вдоль оси шва. Общий вид расчетной формулы, используемой в ряде зарубежных норм, $\sqrt{\sigma_\perp^2 + \lambda(\tau_\perp^2 + \tau_\parallel^2)} \leqslant R$, где коэффициент λ составляет 1,0 [21]; 1,8 [22]; 3,0 [23].

Такой расчет угловых швов осуществляется как для швов с произвольным сочетанием нагрузок, так и для соединений с комбинированными швами (фланговыми и лобовыми).

Работа соединений с комбинированными швами труднее поддается описанию ввиду различия деформационных и прочностных характеристик фланговых и лобовых швов, а также ее зависимости от соотношения геометрических параметров соединения [24—26]. Существует ряд методов расчета соединений с комбинированными швами [26—28], которые дают результаты, достаточно близкие к действительности. Однако все они весьма сложны, и их практическое применение требует включения в нормы проектирования дополнительных данных, а также специальных навыков у проектировщиков. Поэтому

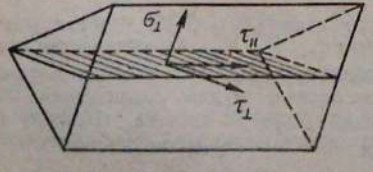


Рис. 7.30. Расчетная схема углового шва, рекомендованная МИС.

Таблица 7.11. Определение расчетного сечения в соединении с угловыми швами в зависимости от параметров соединения

R_{wun}, МПа	$R_{un} = 370$ МПа				$R_{un} = 510$ МПа			
	β_f							
	1,1	0,9	0,8	0,7	1,1	0,9	0,8	0,7
410	—	+	+	+	+	+	+	+
450	—	—	+	+	+	+	+	+
490	—	—	—	+	—	+	+	+
590	—	—	—	+	—	—	+	+
685	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. «+» — по металлу шва, «—» — по границе сплавления.

в ряде зарубежных норм [24, 28] в расчетах соединений с комбинированными швами не учитывается повышенная прочность лобового шва; в некоторых документах [23] наряду с методом расчета, учитывающим зависимость прочности шва от направления усилия, допускается применение более простого метода, не учитывающего этой зависимости.

В отечественной практике проектирования сварных соединений строительных стальных конструкций применяется расчет угловых швов, обоснованный Г. А. Николаевым в 60-е годы, при котором не делается различия между прочностью фланговых и лобового швов. Такой упрощенный подход целесообразно сохранить в строительных нормах и правилах до тех пор, пока станет возможным широкое и комплексное применение ЭВМ при проектировании конструкций. Повышение эффективности сварных соединений с расчетными угловыми швами возможно путем увеличения прочности угловых швов.

Одним из наиболее действенных средств повышения прочности металла шва является изменение его химического состава. Химический состав шва определяется составом сварочных материалов и основного металла, а также способом сварки. Состав электродного металла диктуется комплексом технологических и эксплуатационных требований, предъявляемых к сварному соединению, и один из принципов, которым руководствуются при создании сварных конструкций, заключается в получении сварного соединения с механическими свойствами, близкими к свойствам основного металла. Другим путем повышения прочности металла однопроходных швов является увеличение скорости охлаждения при сварке в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита. Однако при реальном производстве конструкций весьма затруднительно установить надежный контроль за скоростью охлаждения и, следовательно, учесть этот эффект при проектировании сварных соединений.

В нормах проектирования стальных конструкций возможность повышения прочности металла шва реализована путем установления числовых значений расчетных сопротивлений угловых швов в зависимости от класса прочности применяемых электродных материалов. Поскольку при этом достаточно вероятно, что металл шва существенно прочнее остальных зон соединения, то в нормах принята расчетная модель, в которой предусмотрен расчет по двум опасным сечениям (рис. 7.31): по металлу шва $N/\beta_f K l_w \leqslant R_{wf}$; по металлу границы сплавления $N/\beta_z K l_w \leqslant R_{wz}$, где l_w — расчетная длина шва, принимаемая меньше его полной длины на 10 мм; β_f, β_z — коэффициенты, учитывающие глубину проплавления шва при расчетах по металлу шва и металлу границы сплавления; R_{wf}, R_{wz} — расчетные сопротивления угловых швов срезу (условному) по металлу шва и металлу границы сплавления.

Расчетные сопротивления металла обоих сечений установлены исходя из прочностных свойств, обеспечиваемых

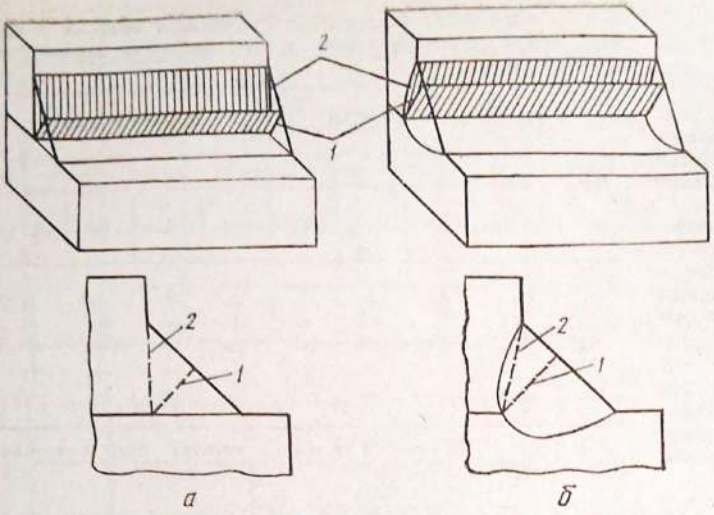


Рис. 7.31. Расчетные сечения по металлу шва (*1*) и границе сплавления (*2*) в соединениях, имеющих швы с обычным (*а*) и глубоким (*б*) проваром.

выбором электродного и основного металла. Увеличение количества расчетных сечений в соединении не повышает трудоемкость его расчета, поскольку в каждом конкретном соединении из двух сечений можно выделить более опасное, по которому производится проверка прочности. Такое сечение определяется по таблицам, аналогичным табл. 7.11, в зависимости от геометрических и прочностных параметров, регламентированных в нормах соответствующими сопротивлениями металла шва R_{wun} и основного металла R_{un}.

7.4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С РАСЧЕТНЫМИ УГЛОВЫМИ ШВАМИ ОПТИМАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Угловые швы являются наиболее распространенными в металлических сварных строительных конструкциях (~ 90 %), из них не менее 40 % являются расчетными, т. е. проектируются на определенную нагрузку. Сечение шва выбирается по данным расчета. Если учесть, что на одну тонну наплавленного металла угловых швов расходуется примерно 1000 чел.-ч трудовых затрат и 2500 кВт-ч электроэнергии, то при годовом выпуске около 10 млн т сварных металлических конструкций в строительстве и 100 тыс. т наплавленного металла каждый процент снижения объема наплавленного металла дает значительную экономию. В этой связи заслуживает внимания применение достаточно серьезных методов расчета, позволяющих обеспечивать необходимую несущую способность сварному шву при минимальном сечении. Естественно, что при этом резко возрастают вычислительные трудности из-за громоздкости расчета. Однако применение персональных ЭВМ позволяет в значительной степени преодолеть многие из этих трудностей и сделать расчет удобным для инженерного применения. Ниже излагается один из таких подходов для определения оптимальных сечений угловых швов расчетных соединений, ориентированный на применение персональных ЭВМ средней мощности, т. е. доступный для широкой инженерной практики. Реализация этого состоит в создании соответствующей автоматизированной расчетной системы для определения сечений угловых швов различных соединений из условий прочности и свариваемости [29]. Система строится по модульному принципу. Каждый модуль ориентирован на определенный тип сварного соединения с угловыми швами, обеспечивает работу пользователя в диалоговом режиме, сообщая пользователю, какие требуются исходные данные, их размерность, каким образом они вводятся, что и как можно получить в результате работы. Объем каждого модуля не превышает память одной дискеты ПЭВМ. Основной расчетный алгоритм модуля обеспечивает получение искомой формы и размеров сварного шва, в каждом сечении которого примерно одновременно наступает предельное состояние, определяемое критериальным уравнением

$$f(x_1, x_2, \ldots, y_1, y_2, \ldots, n_1, n_2, \ldots, t) = 0, \quad (7.47)$$

где $x_1, x_2, \ldots$ — характеристики напряженно-деформированного состояния; $y_1, y_2, \ldots$ — характеристики сопротивления материала шва и зоны сплавления деформированию (разрушению); $n_1, n_2, \ldots$ — коэффициенты безопасности; t — время.

Конкретный вид (7.47) зависит от математической модели предельного состояния. В системе ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины [29] для случаев статического нагружения используется в качестве (7.47) зависимость

$$\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_p} n_в\right)^{1+q} + \left(\frac{K^{max}}{K_{1c}\eta} n_x\right)^2 = 1 \quad (q \geqslant 1), \quad (7.48)$$

где σ_i — интенсивность напряжений; σ_p — сопротивление материала шва (зоны сплавления) вязкому разрушению при статическом нагружении (соответственно либо $\sigma_в$ — временное сопротивление, либо σ_t — длительная прочность на заданной временной базе); $K^{max} = K(K_I, K_{II}, K_{III})$ — коэффициент интенсивности напряжений (по гипотезе обобщенного нормального отрыва [12]) от внешней нагрузки у вершины непроплавления (примыкающей полости); K_{1c} — вязкость разрушения материала шва или околошовной зоны при соответствующих эксплуатационных условиях; η — поправочный коэффициент, учитывающий жесткость нагружения зоны шва и величину притупления у примыкающей полости [30]; $\eta_в$ и η_x — коэффициенты безопасности при вязком и хрупком разрушениях соответственно. Если сварное соединение работает при переменных нагрузках, то наряду с критериальным уравнением (7.48) при σ_i и K^{max}, соответствующих максимальной нагрузке, используется дополнительное условие

$$K^{max} - K^{min} \leqslant \frac{\Delta K^0_{th}}{n_ц}(1 - \bar{\alpha} r_\sigma), \quad (7.49)$$

где K^{max}, K^{min} определяются максимальной и минимальной нагрузками цикла нагружения соответственно; ΔK^0_{th} — пороговое значение размаха коэффициента интенсивности напряжений для металла шва (околошовной зоны) при коэффициенте асимметрии цикла $r_\sigma = 0$; $\bar{\alpha}$ — характеристика материала, равная примерно 0,5—0,85; $n_ц$ — коэффициент безопасности.

Использование зависимостей (7.47), (7.49) требует умения рассчитывать величины K_I, K_{II}, K_{III} в сечении углового шва при различных условиях нагружения. В общем случае это достаточно громоздкая задача, трудно реализуемая на ПЭВМ за обычное время инженерного расчета. Поэтому в [29] для этих целей предлагается использовать приближенные

Рис. 7.32. Структура типового расчетного модуля.

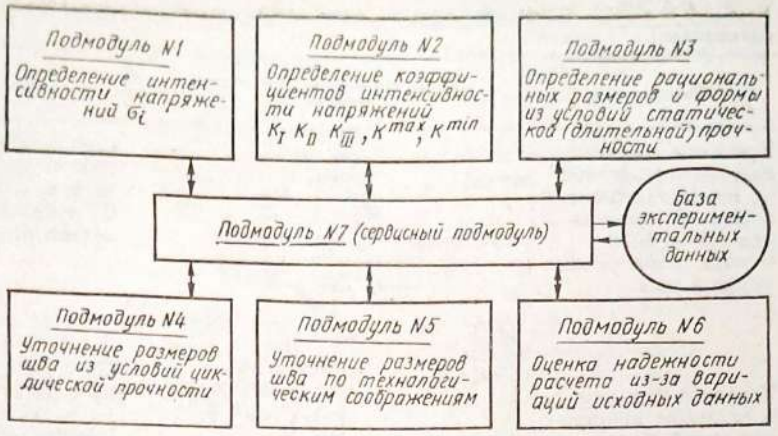
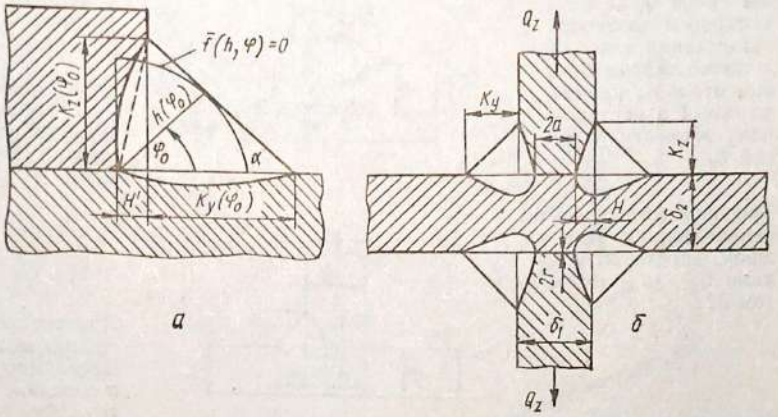


Рис. 7.33. Идеальный профиль углового шва $\bar{f}(h, \varphi) = 0$ и его аппроксимация треугольным сечением (*а*) для соединения с угловыми швами (*б*).



методы. Каждый расчетный модуль состоит из нескольких подмодулей (рис. 7.32).

Подмодуль № 1 рассчитывает величины σ_i на основе приближенных зависимостей. В частности, в различных модулях используется допущение о статической эквивалентности простейших распределений напряжений по длине $h(\varphi)$ соответствующего сечения $\varphi = \text{const}$ углового шва (рис. 7.33) и внешней нагрузки в состояниях, близких к предельным [5], что позволяет применять зависимость

$$\sigma_i = \sqrt{\left(P/h + \bar{c}\,\frac{4M}{h^2}\right)^2 3\,(V^2/h^2 + T^2/h^2)}\,, \quad (7.50)$$

где P, V, T, M — соответствующие усилия и момент, вызываемые в сечении $\varphi = \text{const}$ внешней нагрузкой; $\bar{c}$ — некоторый коэффициент, изменяющийся в пределах $1{,}5 \geqslant \bar{c} \geqslant 1$.

Зависимости для P, V, T, M в каждом конкретном расчетном модуле определяются геометрией соединения и внешней нагрузкой.

Подмодуль № 2 осуществляет расчет коэффициентов интенсивности напряжений K_I, K_{II}, K_{III} на основе приближенных зависимостей, конкретных для данной геометрии и нагрузки. По K_I, K_{II}, K_{III} определяются K^{max} и K^{min}. При этом используются зависимости [12]

$$K = \left(K_I \cos\frac{\omega}{2} - 3K_{II}\sin\frac{\omega}{2}\right)\cos^2\frac{\omega}{2}\cos^2\theta + \\ + K_{III}\cos\frac{\omega}{2}\sin 2\theta \quad (7.51)$$

при $\omega = \omega_*$ и $\theta = \theta_*$, определяемых условиями

$$\left.\frac{\partial K}{\partial \omega}\right|_{\omega=\omega_*} = 0; \quad \left.\frac{\partial K}{\partial \theta}\right|_{\theta=\theta_*} = 0. \quad (7.51а)$$

Подмодуль № 3, реализуя условие статического нагружения (7.48), определяет идеальную форму и размеры углового шва в виде некоторой кривой $\bar{f}(h, \varphi) = 0$ (см. рис. 7.33, *а*), получаемой обычно в форме таблицы значений $h(\varphi)$.

Для поправочного коэффициента η в (7.48) используется следующая зависимость:

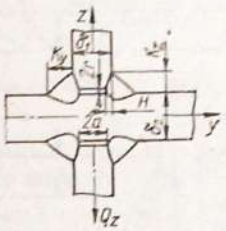
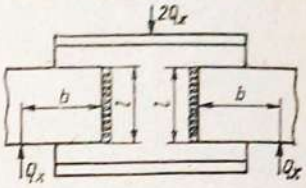
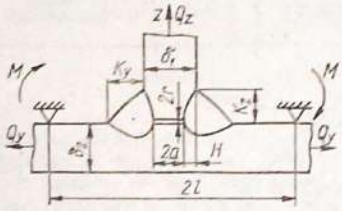
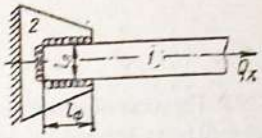
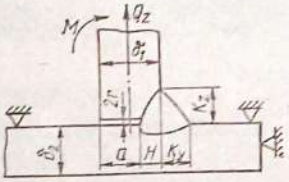
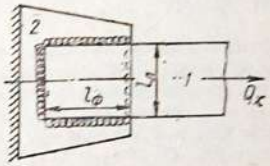
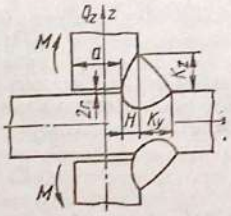
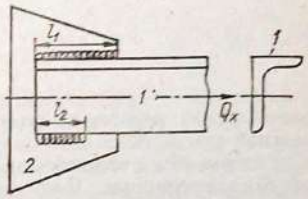
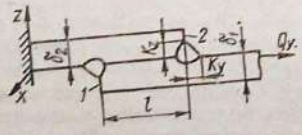
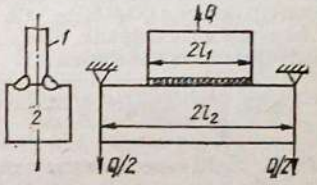
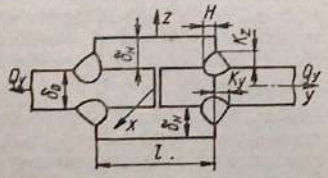
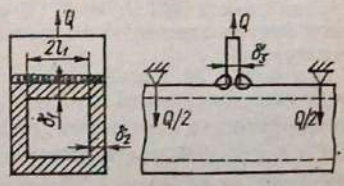
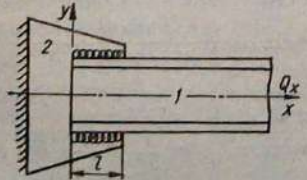
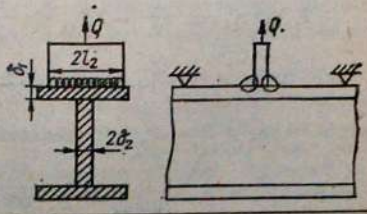
$$\eta = \eta_1(h)\,\eta_2(r), \quad (7.52)$$

где $\eta_1(h) = 1$, если $h > h_m = m\,(K_{1c}/\sigma_т)^2$, $\eta_1(h) = \sqrt{\dfrac{h_m}{n}}$, если $h < h_m$, $\eta_2 = 1$, если $r < r_0$, $\eta_2 = \sqrt{r/r_0}$, если $r > r_0$; r — радиус притупления в примыкающей полости, примерно равный половине зазора, $m = 1{,}0 \div 2{,}5$; $r_0 \simeq 0{,}1$ мм. Поскольку в большинстве случаев кривая $\bar{f}(\varphi, h) = 0$ трудно реализуема технологически и не всегда идеальна в зонах перехода к основному металлу ($\varphi = 0$ и $\varphi = \varphi_к$ по рис. 7.33, *а*), то подмодуль № 3 аппроксимирует кривую $\bar{f}(\varphi, h) = 0$ привычными формами, например описанным треугольником с катетами K_y, K_z. Поскольку в значительной своей части (по параметру φ) кривая $\bar{f}(\varphi, h) = 0$ выпуклая, то описанный треугольник определяется касательной к кривой $\bar{f}(h, \varphi) = 0$ в некоторой точке φ_0 и катетами $K_y(\varphi_0)$ и $K_z(\varphi_0)$ от пересечения этой касательной с поверхностями $\varphi = 0$ и $y = H$, H — глубина проплавления (см. рис. 7.33, *а*, *б*). Соответствующий угол $\alpha(\varphi_0)$ определяется выражением

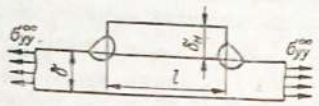
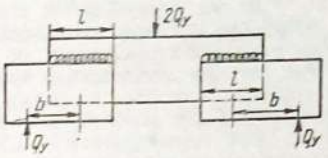
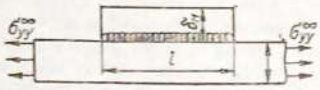
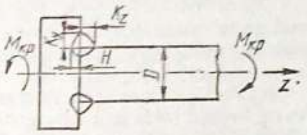
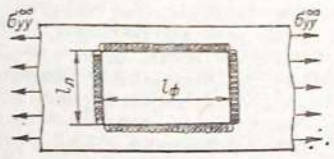
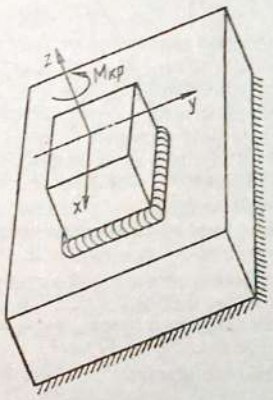
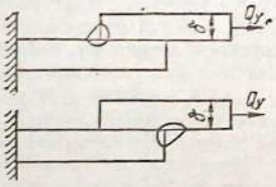
$$\operatorname{ctg}\alpha = \frac{h(\varphi_0)\sin\varphi_0 - h'(\varphi_0)\cos\varphi_0}{h(\varphi_0)\cos\varphi_0 + h'(\varphi_0)\sin\varphi_0}; \quad h' = \frac{\partial h}{\partial \varphi}. \quad (7.53)$$

Оптимальным значением φ_0 принимается такое в области $0 < \varphi_0 < \varphi_к$, при котором площадь сечения наплавленного металла $F_\Delta = \dfrac{1}{2}(K_y + H')K_z$ минимальна. Здесь H' — глубина разделки ($H' \leqslant H$).

Таблица 7.12. Основные модули автоматизированной системы расчета сварных соединений с угловыми швами оптимального сечения

Наименование	Схема соединения и силового нагружения	Наименование	Схема соединения и силового нагружения
Крестовое соединение, нагруженное силами Q_z перпендикулярно к плоскости примыкания $z = \pm\delta_2/2$. Четыре симметричных угловых шва		Соединение внахлестку с фланговым швом, загруженное усилием Q_x и крутящим моментом $M_{кр} = Q_x b$	
Тавровое симметричное соединение, нагруженное силой Q_z перпендикулярно к плоскости примыкания $z = \delta_2/2$, а также силами Q_y и моментом M, приложенными к неразрезному элемену толщиной δ_2		Соединение внахлестку с двумя фланговыми и одним лобовым швами, загруженное усилием Q_x	
Тавровое соединение с односторонним угловым швом, загруженное силами Q_z, Q_y и моментом M		Соединение внахлестку с двумя фланговыми и двумя лобовыми швами, загруженное усилием Q_x	
Одностороннее крестовое соединение, загруженное усилием Q_z и моментом M		Присоединение фланговыми швами несимметричного элемента к пластине при нагружении усилием Q_x	
Соединение внахлестку с двумя лобовыми швами, загруженное силой Q_y на единицу длины соединения в направлении x		Тавровое соединение элементов с ограниченной изгибной жесткостью при сосредоточенном нагружении (с односторонним и двухсторонним швами)	
Лобовые швы стыкового соединения с накладками, загруженного усилием Q_y на единицу длины соединения в направлении x (плоскость симметрии $z = 0$)		Присоединение жесткого элемента к тонкостенной колонне коробчатого сечения при нагружении силой (с односторонним и двухсторонним угловыми швами)	
Соединение внахлестку с двумя угловыми фланговыми швами, загруженное усилием Q_x		Присоединение жесткого элемента к колонне двутаврового тонкостенного профиля при нагружении силой Q (с односторонним и двухсторонним угловыми швами)	

Продолжение табл. 7.12

Наименование	Схема соединения и силового нагружения	Наименование	Схема соединения и силового нагружения
Слабонагруженные лобовые швы соединения накладного листа с нагруженной пластиной		Лобовой шов, загруженный усилием Q_y и крутящим моментом $M_{кр} = Q_y b$	
Слабонагруженные фланговые швы соединения накладного листа с нагруженной пластиной		Круговой шов таврового соединения вала, с фланцем, загруженный крутящим моментом $M_{кр}$	
Соединение накладного листа с нагруженной пластиной лобовыми и фланговыми швами		Тавровое соединение с угловым швом по прямоугольному периметру, загруженное крутящим моментом $M_{кр}$	
Соединение внахлестку с одним лобовым, швом, загруженное усилием Q_y			

Подмодуль № 4 уточняет размеры катетов K_y и K_z из условий циклического нагружения по уравнению (7.49). Если это условие не выполняется, то катеты K_y и K_z увеличиваются пропорционально до удовлетворения указанных условий.

Подмодуль № 5 содержит ограничения на минимальные размеры углового шва по технологическим соображениям — предупреждению образования горячих и холодных трещин [31].

Результаты расчета в значительной степени зависят от характеристик предельного состояния материала шва и околошовной зоны ($\sigma_р$, K_{1c}, ΔK^0_{th}, $\sigma_т$, $\bar{\alpha}$), а также от коэффициентов безопасности $n_в$, $n_х$, $n_ц$. В системе [29] предусмотрены два подхода к выбору указанных величин.

Первый подход не требует базы данных по указанным характеристикам предельного состояния угловых швов. В нем используются те или иные нормативные рекомендации. Так, на основе СНиП [31] для металла шва $\sigma_р/n_в = R_{wf}\sqrt{3}$, для околошовной зоны $\sigma_р/n_в = R_{wz}\sqrt{3}$, где R_{wf} и R_{wz} — расчетные сопротивления, выбираемые по [31] в зависимости от способа сварки, свариваемых материалов и прочности основного металла. В случае достаточно вязкого разрушения $K_{1c}\eta \gg K^{max}$, т. е. такой подход к выбору величины $\sigma_р/n_в$ полностью отождествляет расчет по (7.48) с рекомендациями [31] по выбору размеров сечения углового флангового шва, если глубина проплавления H (см. рис. 7.33) и коэффициенты β_f и β_z в [31] связаны зависимостями $\beta_f = 0{,}7\,(1 + H/K)$; $\beta_z = 1 + H/K$, что достаточно реально.

Поскольку зависимости (7.48), (7.49) более общие, чем существующие (рекомендации [31]), то на их основе в рамках этого подхода можно выполнять более тонкие расчеты, учитывающие влияние направления приложения нагрузки, охрупчивание материала (если известна величина K_{1c}) и т. д.

Второй подход связан с наличием соответствующей базы данных относительно основных характеристик: $\sigma_р$, K_{1c}, ΔK^0_{th}, $\bar{\alpha}$, $\sigma_т$. Такие характеристики могут быть получены либо непосредственно испытанием материала шва и околошовной зоны, либо обработкой данных испытаний на разрушение соответствующих сварных соединений с угловыми швами по зависимостям (7.48), (7.49). Если экспериментальные данные достаточно представительны, то их обработкой можно получить не только средние значения величин $\sigma_р$, K_{1c}, ΔK^0_{th}, $\sigma_т$, $\bar{\alpha}$, но и пределы их варьирования для данного класса материалов, т. е. математическое ожидание и коэффициенты вариации.

Наличие таких данных позволяет в каждом конкретном случае более обоснованно назначать коэффициенты безопасности $n_в$, $n_х$, $n_ц$. Для этого в системе имеется *подмодуль № 6* для оценки надежности (обеспеченности) расчета, позволяющий учитывать вариации нагрузки, геометрических размеров и механических свойств материала. Необходимая обеспеченность расчета определяется при общепринятых в данной отрасли коэффициентах безопасности для местной прочности [32] при гарантируемом уровне вариации исходных данных.

Отсутствие подробной информации вызывает необходимость расширения интервалов варьирования исходных данных и увеличения коэффициентов безопасности для достижения необходимой обеспеченности расчета.

В табл. 7.12 приведены основные модули указанной системы. С течением времени данный перечень будет расширять-

ся за счет новых модулей для характерных сварных соединений с угловыми швами.

В качестве иллюстрации ниже приведены результаты использования модуля № 1 для расчета оптимального сечения угловых швов для симметричного крестового соединения (см. рис. 7.33, *б*) из стальных (Ст3) элементов толщиной $\delta_1 = \delta_2 = 20$ мм, нагруженных статической нагрузкой $Q_z = 4000$ Н/мм в обычных условиях при следующих исходных геометрических характеристиках соединений: скос кромок $H' = 0$, глубина проплавления при ручной сварке электродами типа 42А $H = 2$ мм, полузазор в примыкании $r = 0{,}2$ мм. Соответствующие коэффициенты вариации: для толщины — 0,015, для проплавления — 0,5, для зазора — 0,25, для несущих размеров углового шва — 0,1.

При выборе механических характеристик $\sigma_р$, K_{1c} использовали имеющуюся базу экспериментальных данных, обработка которых показала, что предельное состояние наступает в сечениях углового шва при значениях $\sigma_р$ в пределах $\sigma_в < \sigma_р < S_к$. Для рассматриваемых материалов можно принять $\sigma_р = 600$ МПа для металла шва и околошовной зоны при коэффициенте вариации соответственно 0,017 и 0,030. Для вязкости материала получены рекомендации: для металла шва $K_{1c} = 1200$ Н/мм$^{3/2}$ при коэффициенте вариации 0,06; для околошовной зоны $K_{1c} = 1050$ Н/мм$^{3/2}$ при коэффициенте вариации 0,1. Пределы текучести соответственно: для металла шва $\sigma_т = 300$ МПа, для околошовной зоны $\sigma_т = 350$ МПа с коэффициентами вариации 0,02 и 0,06 соответственно. Коэффициенты безопасности $n_в = n_х = 1{,}7$. При этих исходных данных получили следующие результаты для углового шва: $K_z = 13{,}0$ мм, $K_y = 6{,}6$ мм, $F_\Delta = 43$ мм^2 при обеспеченности расчета $P = 0{,}994$.

Рассмотрен второй вариант расчета с более широким разбросом значений $\sigma_р$ и K_{1c}, т. е. при коэффициентах вариации этих величин, соответственно равных 0,06 (было 0,017 и 0,030) и 0,20 (было 0,06 и 0,10). Та же обеспеченность расчета $P = 0{,}994$ получена при $n_в = n_х = 1{,}8$, что дает $K_z = 15$ мм, $K_y = 7{,}6$ мм, $F_\Delta = 57$ мм^2.

Если же использовать рекомендации [31], то при $R_{wf} = 180$ МПа $K_z = K_y = 15{,}8$ мм, $F_\Delta = 124{,}8$ мм^2, т. е. в этом случае сечение наплавленного металла более чем в два раза будет превышать 57 мм^2, полученное во втором варианте при значительной вариации механических характеристик материала.

Рассмотрен третий вариант расчета, при котором в базе данных нет необходимых сведений о величинах $\sigma_р$ и K_{1c}. В этом случае пользователь может обратиться к нормативным данным из [31], согласно которым можно принять $\sigma_р/n_в = 180\sqrt{3} = 311$ МПа, $K_{1c} \to \infty$, что при нулевых вариациях всех исходных данных дает: $K_z = 13$ мм, $K_y = 7{,}7$ мм, $F_\Delta = 57{,}6$ мм^2. Как видно, эти результаты достаточно близки к приведенным во втором варианте, т. е. и в этом случае объем наплавленного металла в два раза меньше, чем по [31], в котором не учитывается направление приложенной нагрузки, а также возможность использования неравнокатетных угловых швов.

7.5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СО СТЫКОВЫМИ ШВАМИ

После соединений с угловыми швами наиболее представительными в сварных, в том числе и строительных, конструкциях являются соединения со стыковыми швами. Такие соединения обычно используются в ответственных случаях, поскольку обладают, как правило, высокой прочностью, в большинстве случаев не уступающей прочности основного металла при статическом (однократном) нагружении. Именно поэтому в СНиП II-23—81 [31] записано, что для стальных конструкций расчет сварных стыковых соединений не требуется при применении соответствующих сварочных материалов, полном проваре соединяемых элементов и физическом контроле качества сварных швов. В тех случаях, когда сварные стыковые соединения выполняются без физического контроля качества, СНиП рекомендует проверять расчетом прочность стыкового соединения. Например, при двухосном нагружении металла стыкового шва стальной конструкции, когда известны компоненты тензора напряжений σ_{xx}, σ_{yy}, σ_{xy}, в [31] предлагается использовать зависимости

$$\sigma_i \leqslant 1{,}15 R_{wy}\gamma_c, \quad \sigma_{xy} \leqslant R_{ws}\gamma_c, \tag{7.54}$$

где $\sigma_i = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} + 3\sigma_{xy}^2}$; R_{wy} и R_{ws} — расчетные сопротивления металла шва по табл. 7.13; γ_c — коэффициент условий работы [31].

При циклических нагрузках сопротивление разрушению стыковых соединений в значительной степени зависит от коэффициентов концентрации напряжений в околошовной зоне, а также от уровня остаточных сварочных напряжений. Этот вопрос рассматривается отдельно в гл. 9. Важной является оценка несущей способности стыкового соединения при неполном проплавлении соединяемых элементов (см. рис. 7.17). Такие соединения более экономичны и в ряде случаев более технологичны, чем соединения с полным проплавлением, но уступают им в прочности. Однако далеко не всегда к стыковому соединению предъявляются требования максимальной прочности при данной толщине соединяемых элементов. В этих случаях рационально использовать стыковые швы с неполным проплавлением, но при этом важно иметь четкие представления о несущей способности таких соединений. Этот вопрос достаточно подробно рассмотрен в работах [30, 33] как при статическом, так и при циклическом нагружении соединений. Два характерных типа сварных стыковых соединений с неполным проплавлением изображены схематически на рис. 7.16, *а*, *б*: при односторонней сварке (*б*) и при двухсторонней сварке (*а*). Соединения нагружены поперечными усилиями (напряжениями σ_∞) и изгибающими моментами M на единицу длины шва. В качестве критериальных уравнений для этих соединений можно использовать уравнения (7.48) при статическом нагружении и (7.49) — при циклическом.

Интенсивности напряжений в опасном сечении шва при вязком поведении материала можно определить из соотношений: при односторонней сварке

$$\sigma_i = \frac{\sigma_\infty}{1 - a/\delta} + \frac{4M}{(\delta - a)^2}\bar{c}; \tag{7.55}$$

при двухсторонней сварке

$$\sigma_i = \frac{\sigma_\infty}{1 - 2a/\delta} + \frac{4Mc}{\delta^2(1 - 8a^3/\delta^3)},$$

где $\bar{c} = 1 \ldots 1{,}5$.

Для коэффициентов интенсивности напряжений по (7.51) можно использовать зависимости из табл. 7.6. На рис. 7.34 приведены расчетные и экспериментальные значения разрушающих напряжений и напряжений нетто $\sigma_{нт}^р$ в стыковых соединениях в зависимости от величины отношения a/δ. На рис. 7.34, *а* показаны экспериментальные результаты, полученные в [33, 34] при испытании в обычных условиях (20 °С) стыковых соединений высокопрочной стали 30ХГСНА толщиной $\delta = 10$ мм с односторонними швами, выполненными сваркой под флюсом АН-3 проволокой Св-18ХМА (кривая *1*), и соединений из сплава АМг6, выполненных аргонодуговой сваркой с использованием присадки из этого же сплава. Испытывались образцы шириной $b = 20$ мм, вырезанные из соединения в поперечном направлении. Аналогичные данные из работы [34] для стыковых соединений из Ст3 с односторонними и двухсторонними швами при сварке флюсом ОСЦ-45 проволокой Св-08А представлены на рис. 7.34, *б*. Здесь же приведены результаты расчета величины $\sigma_\infty^р$ по (7.54), (7.48), (7.52) при исходных данных из табл. 7.14. Расчетные данные на рис. 7.34, *а*, *б* получены при $r < r_0$, $m = 2{,}5$ и хорошо согласуются с экспериментом ($n_в = n_х = 1$).

На рис. 7.34, *в*, *г* приведены экспериментальные данные относительно разрушающих нетто-напряжений $\sigma_{нт}^р = \sigma_g^р \times$

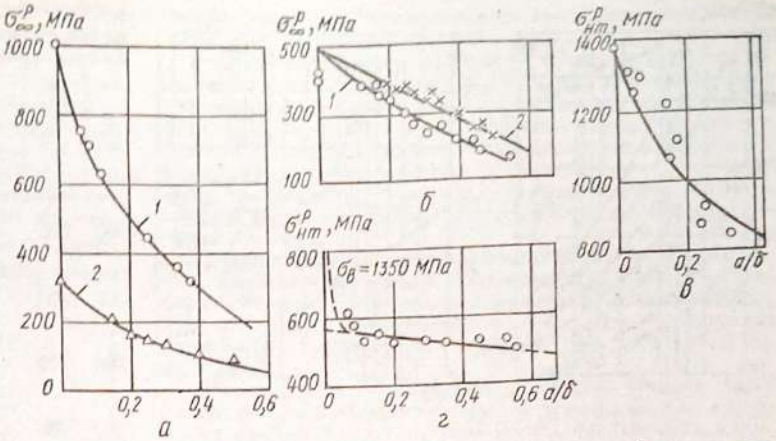


Рис. 7.34. Расчетные и экспериментальные значения разрушающих напряжений в стыковых соединениях с непроваром при статическом нагружении:

а — соединение с односторонним швом при T = = 20 °С (*1* — сталь 30ХГСНА; *2* — сплав АМг6); *б* — соединение из Ст3 при T = 20 °С с односторонним (*1*) и двухсторонним (*2*) швами; *в* — соединение из стали Х18Н10Т при T = —196 °С с односторонним швом; *г* — то же, для стали 03Х12Н10МТ.

$\times(1 - a/\delta)^{-1}$ для образцов толщиной 12 мм и шириной 30 мм, вырезанных из стыковых соединений высоколегированных сталей Х18Н10Т и 03Х12Н10МП соответственно с односторонним швом, испытанных при —196 °С. Для образцов из стали 03Х12Н10МТ, сваренных в аргоне с использованием присадки ЭП890 [30], экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетом при указанных в табл. 7.14 значениях $\sigma_р$ и K_{1c} для металла шва. Для шва на стали Х18Н10Т, сваренного под флюсом АН-45 проволокой Св-02Х19Н9, отмечается аномально резкое падение $\sigma^p_{нт}$ при наличии незначительного непроплавления a; дальнейшее увеличение a оказывает уже небольшое влияние на снижение $\sigma^p_{нт}$. Обработка экспериментальных данных [30] показывает, что $\sigma_р$ = 575 МПа при $\sigma_в$ = 1350 МПа для гладкого образца при —196° С. Этот эффект различные исследователи связывают со структурной нестабильностью материала при деформировании [30].

Приведенные на рис. 7.34 данные достаточно типичны [30] и показывают, что для многих материалов строительных конструкций сопротивление статическим нагрузкам сварных соединений со стыковыми швами, имеющими острые концентраторы типа непроплавлений, определяется в основном вязким механизмом разрушения, т. е. величиной $\sigma^p_{нт}$ в нетто-сечении. Для отдельных материалов, обладающих повышенной чувствительностью к надрезу, роль рассматриваемых острых концентраторов может быть достаточно значительной, и в этом случае применение подходов механики разрушения является весьма конструктивным. Очевидно, что другие концентраторы напряжений в стыковых швах, обусловленные формой шва, смещением кромок, угловыми деформациями и т. д., проявляются обычно при статическом нагружении еще менее значительно по сравнению с рассмотренными, и в основном на материалах, весьма чувствительных к надрезу.

Более существенным является учет рассматриваемых трещинообразных особенностей (непроплавлений) при циклическом нагружении стыковых соединений. Использование условия (7.49) в сочетании с данными табл. 7.6 позволяет получить следующую зависимость относительно максимальных напряжений σ^{max}_∞ для вариантов стыковых швов с непроплавлениями (рис. 7.35), когда усталостное разрушение практически не происходит (острый концентратор не перерастает в усталостную трещину):

$$\sigma^{max}_\infty = \frac{\Delta K^0_{th}\,(1 - \bar{\alpha} r_\sigma)}{(1 - r_\sigma)\sqrt{\pi a}\, f_{1\sigma}(a/\delta)}\,. \qquad (7.56)$$

На этом же рисунке представлены рассчитанные по (7.56) для стали Ст3 (ΔK^0_{th} = 190 Н/мм$^{3/2}$) кривые σ^{max}_∞ для стыковых соединений с неполным проплавлением (двухсторонняя и односторонняя сварка) в зависимости от отношения a/δ при δ = = 10 мм, r_σ = 0,2 и 0,1. Там же приведены экспериментальные точки, полученные в работе [34] при испытании соответствующих стыковых соединений при сварке под флюсом ОСЦ-45 проволокой Св-08А. Расчетные и экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются. Видно, что при больших a/δ напряжения σ^{max}_∞, при которых обеспечивается равенство (7.56), невелики.

Таблица 7.13. **Значения расчетных сопротивлений R_{wy} и R_{wS}**

Напряженное состояние стыкового соединения	Расчетные сопротивления стыковых швов
Сжатие; растяжение и изгиб при автоматической, полуавтоматической или ручной сварке с физическим контролем качества	По пределу текучести, $R_{wy} = R_y$
	По временному сопротивлению, $R_{wu} = R_u$
Растяжение и изгиб при автоматической, полуавтоматической и ручной сварке без физического контроля качества	По пределу текучести, $R_{wy} = 0{,}85R_y$
Сдвиг	$R_{wS} = R_S$

Примечание. R_y, R_S, R_u — сопротивления основного металла.

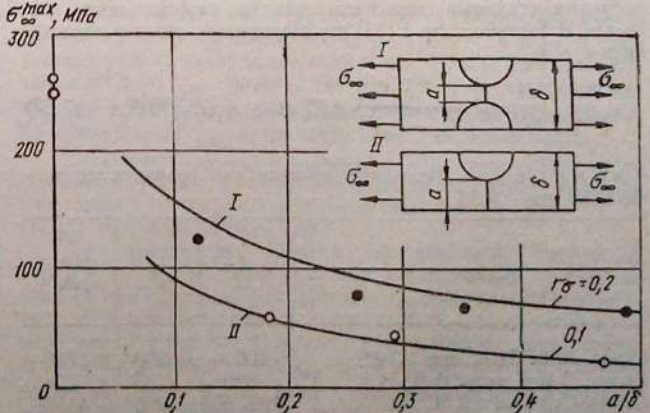


Рис. 7.35. Зависимость предела усталости сварного соединения от глубины непровара и соответствующие схемам *I*, *II* расчетные значения (сплошная линия) и экспериментальные данные.

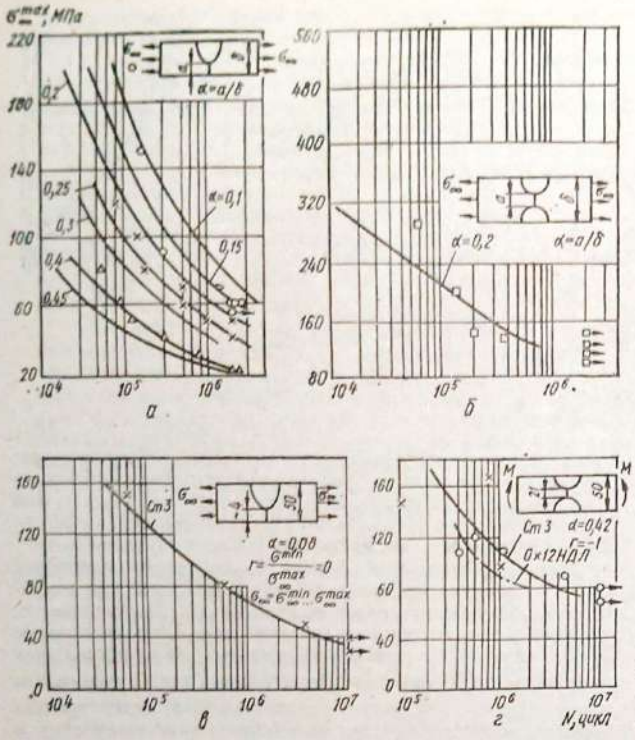


Рис. 7.36. Расчетные и экспериментальные оценки долговечности сварных стыковых соединений с непроваром при нагружении их циклической нагрузкой: односторонние (*а*, *в*) и двухсторонние (*б*, *г*); соединения небольшой толщины (δ = = 10 мм) (*а*, *б*) и большой толщины (δ = 50 мм) (*в*, *г*).

Следует отметить, что при ограниченной долговечности сопротивление усталости сварных соединений рассматриваемого типа может быть достаточно значительным [34]. В [33] показано, что применительно к сварным соединениям с неполным проплавлением можно использовать модели циклической трещиностойкости, т. е. исходить из скорости распространения усталостной трещины dl/dN, продолжающей трещинообразную полость непроплавления. Существует много различных зависимостей, связывающих dl/dN с коэффициентами интенсивности напряжений. Однако обычно исходят из зависимости Пэриса — Эрдогана, хорошо аппроксимирующей экспериментальные данные относительно скорости роста трещины. В соответствии с [33] эту зависимость можно представить в виде

$$\frac{dl}{dN} = \frac{\bar{c}}{(1-r_\sigma)^m}\,\Delta K_I^n\,(1+K_{Ir}/K_I^{max})^m, \qquad (7.57)$$

Таблица 7.14. **Исходные данные для результатов расчета на рис. 7.34**

Материал	$\sigma_в$, $\sigma_{0,2}$, МПа	σ_T, МПа	K_{Ic}, Н/мм$^{3/2}$
Сталь 30ХГСНА при 20 °С	1000	800	1780
Сплав АМг6 при 20 °С	320	180	524
Сталь Ст3 при 20 °С	490—500	280	1130
Сталь Х18Н10Т при —196 °С	1350 (575)	470	1900
Сталь 03Х12Н10МТ при —196 °С	1380	1150	2770

Таблица 7.15. Влияние остаточных напряжений $\sigma_{св}$ на величину ξ при различных σ_T, σ_∞ и l/δ

σ_T, МПа	σ_∞^{max}, МПа	$\sigma_{св}$, МПа	$l/\delta = 0$		$l/\delta = 0{,}2$		$l/\delta = 0{,}4$	
			σ_r, МПа	ξ	σ_r, МПа	ξ	σ_r, МПа	ξ
300	200	200	40	1,09	0	1,0	0	1,0
		100	400	1,09	0	1,0	0	1,0
		—100	—100	0,707	—100	0,707	—100	0,707
300	100	200	1400	1,55	80	1,34	20	1,09
		100	100	1,41	80	1,34	20	1,09
		—100	—100	0,0	—100	0	—100	0
500	200	300	200	1,71	100	1,22	0	1,0
		200	200	1,71	100	1,22	0	1,0
		—100	—100	0,707	—100	0,707	—100	0,707
500	100	300	300	2,0	200	1,71	100	1,41
		200	200	1,71	200	1,71	100	1,41
		—100	—100	0	—100	0	—100	0

где $\bar{c} = c$ при $K_I^{min} + K_{Ir} \geqslant 0$; $\bar{c} = \dfrac{c}{(1-r_\sigma)^n}$ при $K_I^{min} + K_{Ir} < 0$; $\bar{c} = 0$ при $\Delta K_I \leqslant \Delta K_{th}\,(r_\sigma)$; c, m, n — экспериментальные характеристики материала; r_σ — коэффициент асимметрии цикла нагружения; ΔK_I — размах коэффициента интенсивности напряжений от внешней нагрузки; K_{Ir} — коэффициент интенсивности нерелаксированных остаточных сварочных напряжений, действующих в направлении раскрытия усталостной трещины; K_I^{max} и K_I^{min} — максимальное и минимальное значения K_I.

Из (7.57) следует выражение для числа циклов до разрушения

$$N_f = \int_0^{l_{кр}} \frac{dl\,(1-r_\sigma)^m}{\bar{c}\Delta K_I^n\,(1+K_{Ir}/K_I^{max})^m}, \qquad (7.58)$$

где $l_{кр}$ определяется в общем случае из (7.48) с учетом, что размер полости a увеличился на $l_{кр}$. На рис. 7.36 приведены результаты расчетов по выражению (7.58) в сопоставлении с экспериментальными данными различных исследователей [33] для рассматриваемых соединений при разных значениях a/δ. Соединения из стали Ст3 (см. рис. 7.36, *а*, *б*, *в*) выполнялись сваркой под флюсом ОСЦ-45 проволокой Св-08А толщиной δ = 10 мм и 50 мм, временное сопротивление металла шва 490 МПа, $\Delta K_{th}^0 =$ = 100 Н/мм$^{3/2}$ (см. рис. 7.36, *а*, *б*) и $\Delta K_{th}^0 = 140...$ 200 Н/мм$^{3/2}$ (*в*), $K_{Ic} = 1130$ Н/мм$^{3/2}$, $m = 0{,}3$, $n = 3{,}25$, $c = 3{,}297 \cdot 10^{-14}$ (мм$^{3/2}$/Н)^n мм/цикл. Испытывались образцы шириной 20 мм, вырезанные поперек сварного соединения. Коэффициент асимметрии цикла нагружения $r_\sigma = 0{,}1$. Поскольку в опытах величина a/δ колеблется в определенных пределах [34], то на рисунке приведены расчетные кривые для указанного в [34] диапазона колебаний. Видно хорошее согласование расчета с экспериментом.

На рис. 7.36, *г* расчет сопоставляется с экспериментальными данными, полученными в [35] на стали 0Х12НДЛ при ручной сварке электродами ЦЛ-41 при $\sigma_в = 742$ МПа, $\Delta K_{th}^0 = 100$ Н/мм$^{3/2}$, $K_{Ic} = 2500$ Н/мм$^{3/2}$, $m = 0{,}5$, $n = 2{,}2$, $c = 4{,}545 \cdot 10^{-11}$ (мм$^{3/2}$/Н)^n · мм/цикл.

В приведенных выше расчетах не учитывалось влияние остаточных напряжений, поскольку испытание велось на достаточно узких образцах, вырезанных поперек шва. Однако при большой протяженности стыкового шва вполне вероятно наличие остаточных поперечных напряжений, которые могут

(судя по выражению 7.58) оказывать определенное влияние на скорость распространения усталостной трещины и критическую длину $l_{кр}$. При этом следует учитывать, что под действием внешней рабочей нагрузки в определенной степени происходит релаксация остаточных напряжений, причем тем сильнее, чем выше нагрузка и ниже предел текучести материала. В качестве иллюстрации рассмотрим случай, когда поперечные остаточные сварочные напряжения $\sigma_{св}$ распределены равномерно по толщине δ свариваемых встык элементов, т. е. значения K_{Ir} могут быть вычислены по тем же зависимостям, что и K_I от внешних напряжений σ_∞. С некоторым приближением для рассматриваемого соединения нерелаксированные напряжения σ_r можно определить из условий

$$\left.\begin{aligned}
&\sigma_r = \sigma_{св} \text{ при } (\sigma_\infty^{max} + \sigma_{св}) < \sigma_т \left(1 - \frac{a+l}{\delta} j\right);\\
&\sigma_r = \sigma_т \left(1 - \frac{a+l}{\delta} j\right) - \sigma_\infty^{max} \text{ при } \frac{\sigma_\infty^{max} + \sigma_{св}}{1 - \frac{a+l}{\delta} j} > \sigma_т;\\
&\sigma_r = 0 \text{ при } \sigma_\infty^{max} > \sigma_т \left(1 - \frac{a+l}{\delta} j\right),
\end{aligned}\right\} \quad (7.59)$$

где $j = 1$ для одностороннего шва и $j = 2$ для двухстороннего симметричного шва; $\sigma_т$ — предел текучести материала шва. Из (7.59) следует, что по мере развития усталостной трещины нерелаксированные остаточные напряжения σ_r, уравновешенные в продольной плоскости непроплавления, снижаются. При этом для достаточно вязкого материала, когда критическая длина трещины соответствует максимальным нетто-напряжениям на уровне $\sigma_в$, величина $l_{кр}$ не зависит от остаточных напряжений, поскольку они успевают почти полностью релаксировать. В этих случаях влияние остаточных сварочных напряжений сводится лишь к интенсификации скорости роста трещины, что отражается в (7.57) множителем $\xi = (1 + K_{Ir}/K_I^{max})^m$.

В табл. 7.15 на примере сварного соединения с $a/\delta = 0{,}2$, $j = 1$ и $m = 0{,}5$ показано изменение σ_r и ξ в зависимости от $\sigma_т$, σ_∞^{max}, $\sigma_{св}$, l/δ. Из таблицы видно, что при больших значениях $\sigma_\infty^{max}/\sigma_т$ растягивающие остаточные напряжения релаксируют фактически до начала роста трещины и почти не оказывают влияния на скорость роста dl/dN. С понижением σ_∞^{max} и увеличением $\sigma_т$ влияние растягивающих напряжений $\sigma_{св}$ становится более заметным. В случае $\sigma_{св} < 0$ релаксация остаточных напряжений возможна только при достаточно высоких по абсолютной величине σ_∞. В противном случае такие напряжения не релаксируют и способствуют заметному снижению величины ξ.

7.6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С КОНСТРУКТИВНЫМИ УГЛОВЫМИ ШВАМИ

7.6.1. Конструктивные швы и критерии установления их минимальных сечений

При проектировании сварных соединений в стальных конструкциях часто возникает задача назначения размеров связующих угловых швов, обеспечивающих совместную работу соединяемых элементов, либо слабонагруженных швов, передающих сравнительно небольшие усилия. Эти виды швов называются конструктивными угловыми швами. Минимальные размеры сечения угловых швов зависят от технологии выполнения и их способности обеспечивать требуемые эксплуатационные свойства сварных соединений и конструкции в целом. Эти требования положены в основу критериев установления минимально допустимых катетов швов.

Наиболее важным из технологических критериев, по которым необходимо оценивать возможность применения швов минимальных сечений, является технологическая прочность материала, т. е. способность сопротивляться образованию горячих и холодных трещин, проявляющемуся в сварных соединениях при определенных неблагоприятных условиях. Здесь рассмотрены именно эти технологические аспекты, определяющие минимально допустимые размеры катетов угловых швов.

Технологическая прочность соединений с угловыми швами снижается в основном с уменьшением катетов. Повышение склонности к образованию холодных трещин с уменьшением сечений швов обусловлено увеличением количества структурных составляющих мартенситного типа в ЗТВ соединения.

Склонность к образованию холодных трещин часто оценивают по химическому составу свариваемой стали, характеризуемому эквивалентом углерода $C_э$. Величина $C_э$ в пределах марочного состава стали распределяется по нормальному закону и для строительных сталей имеет следующие статистические характеристики [36], %: в стали 10Г2С1 среднее значение — 0,43, среднеквадратическое отклонение —0,025; в стали 15ХСНД соответственно — 0,47 и 0,03; в стали 16Г2АФ — 0,51 и 0,035*. Таким образом, в соответствии с существующими представлениями для всех строительных низколегированных сталей имеется потенциальная опасность образования холодных трещин при сварке.

Из наиболее употребительных марок строительной стали более склонной к холодным трещинам является сталь 16Г2АФ, хотя в практике изготовления конструкций известны случаи образования холодных трещин в соединениях из сталей 10ХСНД, 10Г2С1 и других при неблагоприятных условиях. Склонность соединений к образованию холодных трещин неодинакова для разных плавок одной марки стали, имеющих различное содержание легирующих элементов. Увеличение опасности образования холодных трещин с уменьшением катета шва и при неблагоприятном сочетании $C_э$ и содержания диффузионного водорода в шве видно из результатов специализированных механических испытаний тавровых образцов по методике ЛТП2 (рис. 7.37).

Подобные испытания, так же как и технологические пробы, позволяют установить минимальные катеты швов для конкретных марок стали и толщин проката. Однако ввиду отсутствия корреляции между жесткостью реальных сварных узлов и напряжением образования трещин при испытаниях по методу ЛТП2 (или результатами испытания технологических проб) такие испытания не позволяют дать общей количественной оценки технологической прочности соединений в реальных конструкциях и ее зависимости от размеров катетов швов.

В качестве обобщающего показателя, характеризующего склонность к образованию холодных трещин, в нормах проектирования принята максимально допустимая твердость металла ЗТВ HV_{max}. Важно отметить, что в характерном для низколегированных строительных сталей диапазоне значений $C_э$ между $C_э$ и HV_{max} существует линейная зависимость.

Зависимость между химическим составом стали, максимальной твердостью и термическим циклом сварки, характеризуемым мгновенной скоростью охлаждения при 550 °С (W_{550}), показана на рис. 7.38.

Установлены два уровня максимальной твердости: 350 HV и 400 HV. Первый из них обеспечивает отсутствие трещин при сравнительно высоком содержании диффузионного водорода в металле шва и может быть использован применительно к условиям сварки при монтаже металлоконструкций. Требование $HV_{max} \leqslant 400$ относится к механизированной сварке в заводских условиях. Представленные на рис. 7.38, *б* зависимости $\ln W_{550} = f(K)$ для ручной и

[1] Значения $C_э$ определены по формуле $C_э = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{13} + \frac{Cu}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{4} + \frac{Cr}{5}$, %.

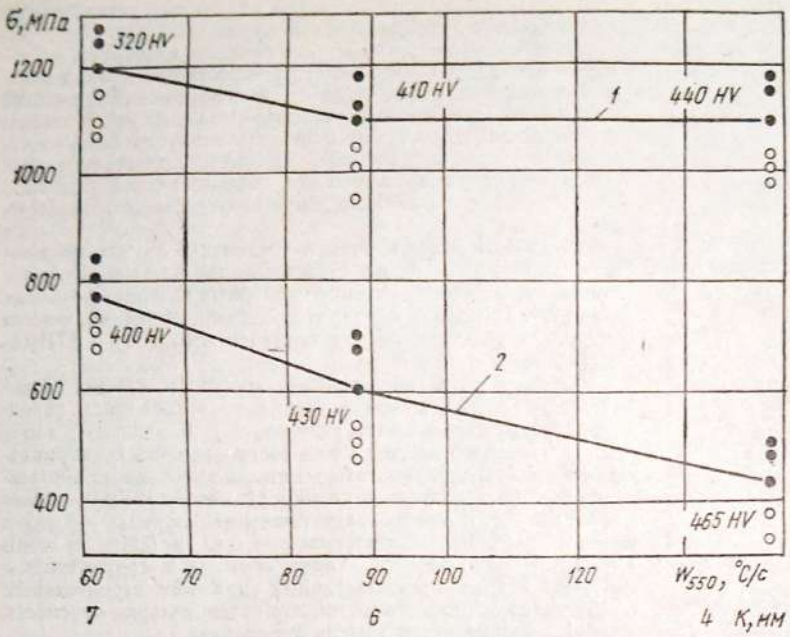
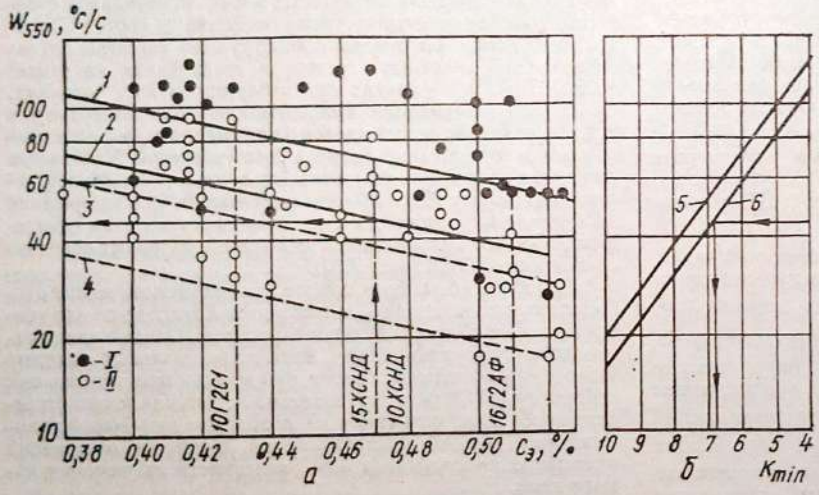


Рис. 7.37. Склонность сварных соединений к образованию холодных трещин в зависимости от мгновенной скорости охлаждения при сварке стали 16Г2АФ с различным химическим составом и содержанием диффузионного водорода в наплавленном металле:

1 — $C_э$ = 0,46 %. $H_д$ = 5 мл/100 г; *2* — $C_э$ = = 51 %. $H_д$ = 8,5 мл/100 г.



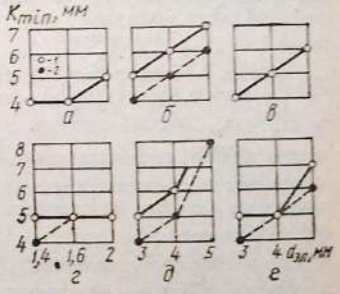


Рис. 7.38. Номограмма для выбора минимальных катетов угловых швов по критерию предотвращения холодных трещин:

1 — математическое ожидание твердости 400*HV* (p = 0,5); *2* — 350*HV* (p = 0,5); *3* — 400*HV* (p = 0,95); *4* — 350*HV* (p = 0, 95); *5* — механизированная сварка; *6* — ручная сварка; *I* — 400*HV*, *II* — 350*HV*.

Рис. 7.39. Зависимость минимального катета шва, обладающего высокой стойкостью против образования горячих трещин, от условий механизированной сварки строительной стали обычной и повышенной прочности:

а, *г* — сварка в CO_2 проволокой Св-08Г2С; *б*, *д* — сварка под флюсом АН-348А проволокой Св-08ГА, *в*, *е* — то же проволокой 08Г2С при толщине свариваемых элементов 20 мм (*а*—*в*) и 30 мм (*г*—*е*); *1* — отсутствие трещин во всем диапазоне режимов сварки; *2* — отсутствие трещин обеспечено ограничением диапазона режимов.

механизированной сварки однопроходными швами элементов толщиной не менее 20 мм имеют также линейный характер.

Пользуясь номограммой, представленной на рис. 7.38, можно устанавливать минимальные значения катетов угловых швов по критерию предупреждения образования холодных трещин. Для элементов толщиной 40 мм и более в связи с увеличением опасности возникновения холодных трещин используются линии *3* и *4*, соответствующие значениям твердости 400*HV* и 350*HV* с обеспеченностью 0,95. Таким образом, например, при сварке проката толщиной 20 мм из стали 15ХСНД ($C_э$ = 0,47 %) минимальный катет шва принимается равным 6 мм при механизированной сварке и 7 мм — при ручной сварке.

Уменьшение сечений угловых швов сопровождается увеличением их склонности к образованию также и горячих трещин. С позиций современных представлений о природе горячих трещин [37], такая картина объясняется зависимостью пластичности шва в ТИХ от взаимной ориентации осей кристаллитов. Меньшей пластичностью обладают швы с плоской и, особенно, с линейной схемой кристаллизации, когда оси кристаллитов прямолинейны и расположены в плоскости свариваемых элементов. Условия для кристаллизации по такой схеме наиболее сильно проявляются при уменьшении катета шва за счет увеличения скорости сварки.

Массовые испытания (более 2 тыс. образцов) угловых швов, проведенные с использованием технологической пробы «жесткий тавр» на прокате толщиной 20—30 мм из стали марок Ст3пс, 10Г2С1, 10ХСНД и 16Г2АФ, позволили установить следующие основные положения о влиянии условий механи-

зированной сварки на образование горячих трещин в угловых швах: 1) склонность к образованию горячих трещин, повышающаяся с уменьшением катета шва, возрастает также с увеличением диаметра сварочной проволоки; 2) наиболее склонны к образованию горячих трещин швы катетом 4 мм. Для предупреждения трещинообразования в таких швах необходимо применять проволоку диаметром 1,4 мм при полуавтоматической сварке в углекислом газе и 3 мм при автоматической сварке под флюсом. При этом не допускается использование форсированных режимов; 3) применение проволоки диаметром 5 мм для сварки под флюсом швов катетом 8 мм и менее нецелесообразно из-за высокой вероятности образования трещин.

Уменьшение диаметра электрода, сопровождаемое снижением тока и скорости сварки, вызывает уменьшение объема сварочной ванны, что создает благоприятные условия для кристаллизации по объемной схеме. В этом случае пластичность швов в ТНХ возрастает благодаря сложной конфигурации осей кристаллитов. Поэтому одним из наиболее эффективных технологических приемов предупреждения образования горячих трещин при уменьшении катетов швов служит уменьшение диаметра сварочной проволоки в сочетании с использованием рациональных режимов сварки.

На рис. 7.39 представлены результаты оценки стойкости угловых швов против образования горячих трещин в зависимости от условий сварки. Можно выделить две категории значений минимальных катетов швов, устанавливаемых по критерию горячих трещин: а) установленные без существенных ограничений общепринятых условий сварки; б) установленные с учетом технологических мер, ограничивающих режимы сварки и выбор сварочных материалов.

В целом при установлении минимальных катетов угловых швов по критериям технологической прочности строительные стали следует разделять на три группы.

I. Высокопрочная низколегированная сталь с $\sigma_т$ = = 440 МПа и $\sigma_в$ = 590 МПа. Основной маркой этой группы является сталь 16Г2АФ, которая характеризуется средним значением $C_э$ = 0,51 %.

II. Низколегированная сталь повышенной прочности с $\sigma_т$ = 325...390 МПа и $\sigma_в$ = 470...530 МПа, $C_э$ = 0,43... 0,47 % (09Г2С, 10Г2С1, 15ХСНД, 10ХСНД и др.).

III. Низкоуглеродистая сталь обычной прочности с $\sigma_т$ = = 235 МПа и $\sigma_в$ = 370 МПа, $C_э$ = 0,3 % (Ст3).

Для I и II групп сталей значения минимальных катетов швов должны устанавливаться по критериям опасности холодных трещин. Однако из-за разницы в значениях $C_э$ для сталей этих групп значения минимальных катетов для сталей II группы должны быть меньше, чем для I группы. Для сталей III группы опасность образования холодных трещин в сварных соединениях практически отсутствует и значения минимальных катетов необходимо устанавливать по критерию опасности образования горячих трещин. При этом важно отметить заметное влияние, которое оказывает способ механизированной сварки, а также диаметр электродной проволоки и режим сварки на стойкость угловых швов против образования горячих трещин. В связи с этим при установлении значений минимальных катетов швов для конструкций из стали Ст3 целесообразно учитывать возможность их снижения при соблюдении дополнительных технологических требований к условиям сварки.

Значения минимальных катетов швов, выполняемых механизированной сваркой, установленные по критериям технологической прочности, приведены в табл. 7.16.

Исходя из повышенной опасности возникновения холодных трещин в соединениях низколегированных сталей (I и II группы) при ручной дуговой сварке, которая выполняется, как правило, в монтажных условиях, значения минимальных катетов швов увеличивают на 1 мм по сравнению с приведенными в табл. 7.16.

Влияние величины катетов конструктивных угловых швов на эксплуатационные свойства соединений необходимо рассматривать главным образом с точки зрения изменения микроструктуры металла вследствие изменения тепловложения при сварке. Общая закономерность изменения микроструктуры с увеличением скорости охлаждения и содержания

Таблица 7.16. **Минимальные катеты угловых швов в сварных конструкциях, мм, при механизированной дуговой сварке**

Материал конструкции	Толщина более толстого из свариваемых элементов, мм				
	6—10	11—16	17—22	23—32	33—40
Высокопрочная низколегированная сталь 16Г2АФ и др., $\sigma_т$ = 410...440 МПа	5	6	7	8	9
Низколегированная сталь повышенной прочности 09Г2С, 10Г2С1, 15ХСНД, 10ХСНД и др., $\sigma_т$ = = 310...390 МПа	4	5	6	7	8
Низкоуглеродистая сталь обычной прочности Ст3, $\sigma_т$ = 225...275 МПа	4	4	5	5	6

легирующих элементов в шве состоит в переходе от игольчатого феррита к бейнитно-мартенситной структуре.

Связь между скоростью охлаждения при сварке, определяющей микроструктуру металла сварных соединений, и его механическими свойствами, установленная в работе [38], долгое время служила основой для назначения размеров минимально допустимых сечений продольных связующих швов в конструкциях. При этом в качестве критерия, ограничивающего сечения таких швов, принимался показатель относительного удлинения шва с ферритно-перлитной структурой.

Однако в ряде работ, например [39—41], не подтверждается ухудшение эксплуатационных свойств металла соединений при уменьшении сечений продольных швов. Эти противоречия объясняются тем, что вязкость металла зависит от конкретного типа микроструктуры шва, определяемой сварочными материалами и технологией сварки.

Кинетику изменения структуры шва с увеличением скорости охлаждения иллюстрирует рис. 7.40. Объектом исследования являлись однопроходные угловые швы, выполненные механизированной сваркой в углекислом газе проволокой Св-08Г2С на стали марок Ст3 и 16Г2АФ. Мгновенная скорость охлаждения при сварке W_{550} изменялась в диапазоне 25—230 °С, что соответствует условиям сварки швов катетом 10—3 мм.

В связи с легированием металла шва элементами, содержащимися в основном металле, химический состав швов, выполненных одинаковой электродной проволокой на стали разного состава, различен. Среднее содержание основных легирующих элементов в швах, выполненных на стали Ст3 и 16Г2АФ, составляет соответственно, %: С — 0,12 и 0,15; Мп — 0,52 и 1,37; Si — 0,11 и 0,47; V — 0,02 и 0,06.

Прочностные характеристики металла шва при увеличении скорости охлаждения возрастают (табл. 7.17). При этом для одинаковых скоростей охлаждения они выше у швов на стали 16Г2АФ. В то же время во всем диапазоне значений W_{550} пластические характеристики металла шва изменяются незначительно: снижаются на 2—3 % при увеличении скорости охлаждения, причем для швов, выполненных на обеих марках стали, эти показатели близки.

Микроструктурный анализ показывает, что наблюдаемое повышение прочности металла шва с увеличением скорости охлаждения при сварке обусловлено изменением микроструктуры от смеси феррита и верхнего бейнита до мартенсита. Температура начала мартенситного превращения низкоуглеродистых низколегированных сталей составляет около 400 °С, в связи с чем карбидная фаза выделяется в период охлаждения металла до нормальных температур — происходит про-

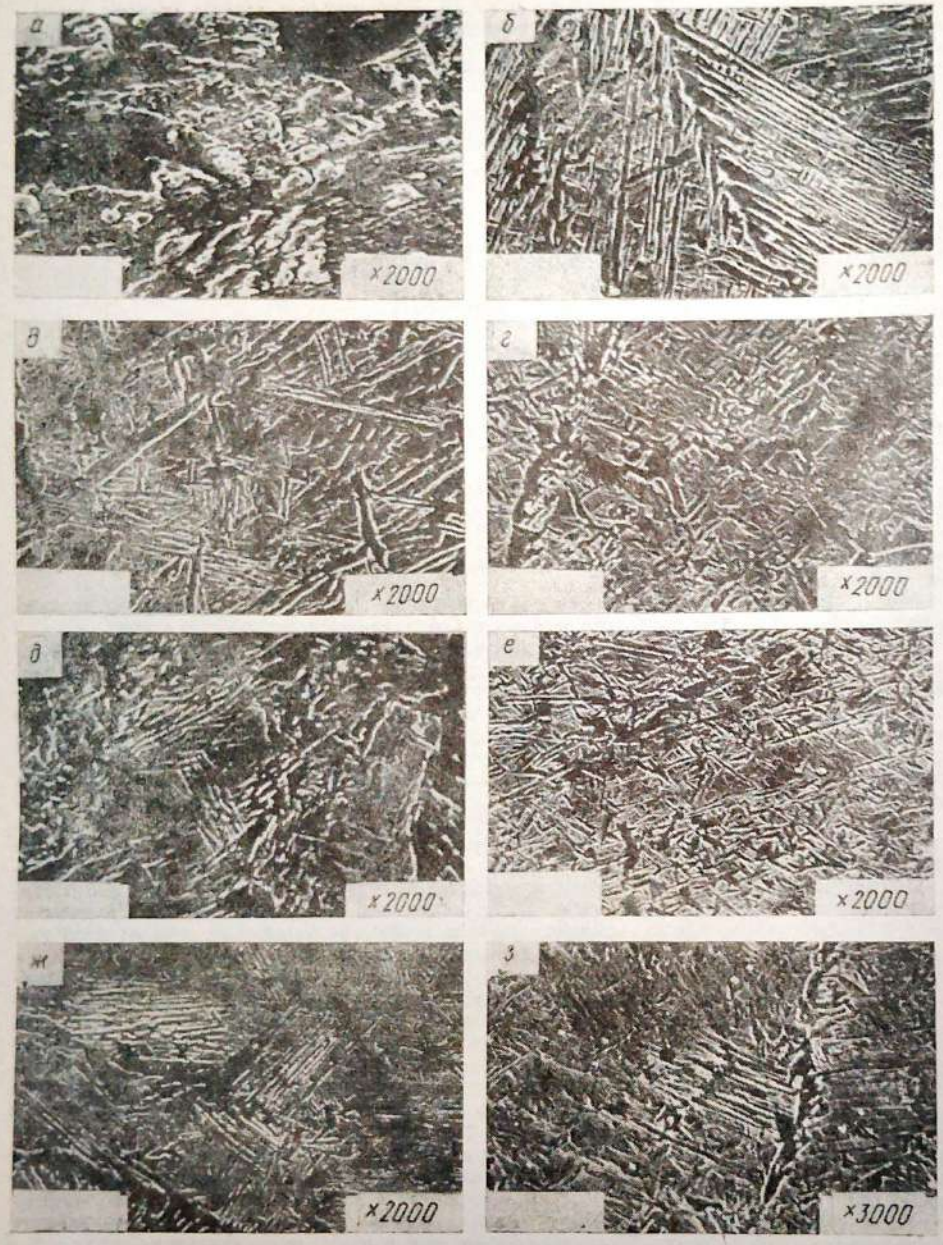


Рис. 7.40. Микроструктура металла шва на стали Ст3 (*а*, *в*, *д*, *ж*) и 16Г2АФ (*б*, *г*, *е*, *з*) в зависимости от скорости охлаждения W_{550} при сварке:
а, *б* — 25 °С/с; *в*, *г* — 65 °С/с; *д*, *е* — 130 °С/с; *ж*, *з* — 230 °С/с.

цесс, получивший название самоотпуска, а образующаяся при этом структура — мартенсит отпуска, который характеризуется более высокой пластичностью по сравнению с обычным мартенситом.

С увеличением скорости охлаждения при сварке формирование мартенсита отпуска в металле шва происходит более интенсивно. Эта микроструктура при металлографическом анализе практически не отличается от структуры нижнего бейнита. Поэтому о соотношении в микроструктуре стали мартенсита и нижнего бейнита следует судить по показателю твердости. Во всяком случае, повышение прочности (твердости) металла шва при увеличении скорости охлаждения от 25 до 65 °С/с обусловлено снижением содержания феррита и появлением составляющей типа мартенсита отпуска.

Увеличение скорости охлаждения до 130 °С/с вызывает существенное возрастание дисперсности структуры, в частности уменьшение межпластинчатого расстояния в бейнитных пластинках, а также рост дисперсности карбидов. При этом улучшаются прочностные свойства металла шва. Дальнейшее увеличение прочности металла при переходе к скорости охлаждения 230 °С/с связано с исчезновением феррита из структуры, дальнейшим увеличением дисперсности микроструктуры и увеличением содержания мартенсита отпуска до 60—70 %.

При скоростях охлаждения 130—230 °С/с в металле шва на стали 16Г2АФ существенно сильнее, чем на стали Ст3, растет дисперсность структуры, а также содержание нижнего бейнита и мартенсита отпуска (до 90—100 %). Этим и объясняется возрастание прочности металла шва; в частности, при $W_{550} = 230$ °С/с твердость 425 *HV*, что указывает на очень высокое содержание мартенсита отпуска в структуре.

Наблюдаемая слабая зависимость пластических свойств от скорости охлаждения металла шва также достаточно определенно объясняется тем, что по мере увеличения дисперсности структуры при возрастании скорости охлаждения металла шва возрастает и ее однородность.

Таблица 7.17. Влияние скорости охлаждения при сварке в углекислом газе проволокой Св-08Г2С на прочностные свойства металла шва

Марка стали	Свойство, единица измерения	$W_{охл}$, °С/с				
		25	65	130	170	230
Ст3	$\sigma_в$, МПа	530	630	720	780	—
	$\sigma_{0,2}$, МПа	380	470	570	620	—
	HV	200	250	300	330	380
	δ_5, %	14	13	12,5	12	—
	$\delta_р$, %	7,5	7	7	6	—
16Г2АФ	$\sigma_в$, МПа	630	720	800	850	—
	$\sigma_{0,2}$, МПа	460	560	630	680	—
	HV	250	300	350	390	425
	δ_5, %	15	13,5	13,5	12	—
	$\delta_р$, %	8	7,5	7	6,5	—

Примечание. Приведены усредненные значения, полученные при испытании трех однотипных цилиндрических образцов диаметром 3 мм.

Таким образом, при установлении минимальных сечений конструктивных швов определяющую роль играет технологическая прочность сварных соединений. При этом значения минимальных катетов швов не должны служить браковочным признаком при оценке надежности и несущей способности сварных соединений и конструкций в целом. Уменьшение катетов швов ниже установленных в табл. 7.16 минимальных значений допустимо при соблюдении следующих условий: 1) фактические размеры катетов швов должны обеспечивать несущую способность сварных соединений, определяемую расчетом на прочность; 2) дополнительным контролем качества сварных соединений должно подтверждаться отсутствие в них дефектов, в том числе технологических трещин.

7.6.2. Влияние размеров конструктивных швов на работу сварных элементов. Применение односторонних угловых швов

К наиболее распространенным конструктивным угловым швам относятся поясные швы сварных элементов двутаврового, коробчатого и прочих сечений, а также швы, прикрепляющие ребра жесткости, диафрагмы и другие дополнительные детали элементов конструкций. Основное назначение таких швов заключается в обеспечении совместной работы соединяемых деталей во всем диапазоне усилий, действующих на конструктивный элемент, вплоть до потери им несущей способности.

Главным показателем, определяющим минимально допустимые размеры швов в сварных конструкциях, в том числе в соединениях с конструктивными швами, должна служить несущая способность конструкции, характеристики ее работы под нагрузкой. С учетом этого положения рассмотрено влияние размеров конструктивных швов на достижение соединяемыми элементами и деталями конструкции предельного состояния.

Наиболее распространенными элементами сварных строительных металлоконструкций с конструктивными швами являются балки, работающие на поперечный изгиб, и стойки, воспринимающие сжатие. Уменьшение размеров швов в элементах конструкций приводит к значительному изменению запаса потенциальной энергии, что влияет на характеристики их работоспособности. В ряде случаев благодаря уменьшению отрицательного влияния остаточных сварочных напряжений и деформаций работоспособность элементов конструкций заметно повышается.

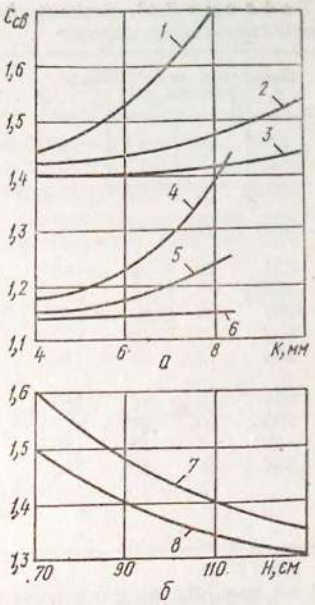


Рис. 7.41. Зависимость коэффициента $C_{св}$, учитывающего влияние ОСН на прогибы, от катета двухстороннего поясного шва (*а*) и высоты балки H (*б*); параметры сечения балок $H - \delta_с - \delta_п - b_п$, мм:
1 — 800—5—14—270; *2* — 1100—8—20—450; *3* — 1500—12—30—600; *4* — 800—7—10—200; *5* — 1100—8—12—270; *6* — 1500—12—16—360; *7* — H—12—25—400 при K = 10 мм; *8* — то же, при K = 6 мм.

Одним из характерных случаев влияния размера конструктивных швов на показатели работы сварного элемента могут служить прогибы балок при поперечном изгибе. Анализ влияния ОСН, определяемых катетами поясных швов, на прогибы двутавровых балок с различными геометрическими параметрами сечения (высотой H, толщиной стенки $\delta_с$, толщиной полки $\delta_п$ и шириной полки $b_п$) приведен на рис. 7.41, где в качестве показателя влияния ОСН принят коэффициент $C_{св}$ — отношение полного прогиба балки с учетом ОСН к прогибу, рассчитанному по положениям сопротивления материалов.

Общую картину зависимости прогибов сварных балок от ОСН и снижения отрицательного влияния ОСН в связи с уменьшением сечений поясных швов можно охарактеризовать следующим образом. Влияние остаточных напряжений на прогибы от внешней нагрузки возрастает с уменьшением высоты балки. Для балок большой высоты (1500 мм и более) степень влияния ОСН на прогибы мало зависит от катета поясного шва.

Разрушение поясных швов балок под нагрузкой происходит от сдвига полки относительно стенки, напряжения которого определяются расчетом по известной формуле Журавского. Однако в подавляющем большинстве случаев эти напряжения весьма малы и поясные швы балок относят к конструктивным.

Заслуживают внимания сварные соединения с односторонними конструктивными угловыми швами. Области их применения установлены на основании экспериментального исследования элементов конструкций при наиболее распространенных вариантах условий их работы и конструктивного оформления.

В табл. 7.18 в обобщенном виде представлены имеющиеся результаты исследования напряженно-деформированного состояния и несущей способности элементов стальных конструкций с односторонними угловыми швами. Эти данные послужили основанием для разработки положений по применению односторонних угловых швов, вошедших в действующие нормы и правила проектирования стальных конструкций. Введение в эти нормы ограничения на применение таких швов по большей части является следствием систематизированных данных о поведении подобных соединений в составе конструкции.

В заключение следует указать, что размеры поперечного сечения швов не определяют работоспособность металла соединений с продольными швами, а их уменьшение не снижает несущую способность элементов конструкций. В стальных конструкциях, изготовляемых из проката толщиной не менее

Таблица 7.18. Технические характеристики и показатели работоспособности элементов конструкций с односторонними швами

Параметры двухтаврового сечения, мм				Катет одностороннего шва, мм	Вид нагружения	Пролет или расчетная длина, мм	Предельная нагрузка (момент, сила)	Характер исчерпания несущей способности
H	δ_c	$\delta_п$	$b_п$					
800	16	30	320	9	Поперечный изгиб	2000	2150 кН·м	Текучесть в растянутом поясе
624	12	32	180	10	То же	5500	1040 кН·м	Потеря общей устойчивости
850	5	15	270	6	» »	6000	470 кН·м	Потеря устойчивости стенки
1090	8	20	360	7	» »	11 000	3700 кН·м	Текучесть в растянутом поясе
932	4	16	200	5	» »	7000	1110 кН·м	Потеря устойчивости стенки
304	12	32	180	10	Внецентренное сжатие, $l = 40$ мм	3000	2360 кН	Потеря общей устойчивости
284	12	22	180	8	То же, $l = 25$ мм	3000	1945 кН	То же
290	10	20	220	7	То же, $l = 50$ мм	3000	2960 кН	» »
142	5	10	110	4	Стесненное кручение	1500	1,7 кН·м	Текучесть в поясах
504	8	12	380	7	Сложное нагружение внецентренным сжатием и моментом	12 800	890 кН	Потеря общей устойчивости

4 мм, минимально допустимые катеты конструктивных угловых швов составляют, как правило, 4 мм. Этот размер определяется возможностями современной технологии дуговой сварки, применяемой при массовом производстве конструкций, ассортиментом сварочных материалов и оборудованием. Уменьшение минимально допустимых катетов швов до 3 мм возможно, но нуждается в специальном обосновании по толщине свариваемых элементов, состоянию проката, качеству сборки и дополнительным требованиям к технологии сварки.

Толщина свариваемых элементов влияет на технологическую прочность соединений, и с ростом толщины одним из приемов, уменьшающих опасность возникновения холодных и горячих трещин, служит увеличение сечения шва. Однако нормы проектирования сварных соединений не должны регламентировать минимально допустимые размеры связующих швов в зависимости от толщины свариваемых элементов. При этом должно соблюдаться требование обеспечения технологической прочности соединений. Такой подход открывает возможность при производстве конструкций выбирать эффективную технологию сварки с учетом конкретных условий и состояния сварочного производства на промышленном предприятии.

В отношении односторонних конструктивных швов следует отметить, что их применение существенно снижает трудоемкость сварочных работ. В ряде случаев с учетом сокращения объема транспортных операций и кантовок конструкции при серийном и массовом производстве применение односторонних швов может внести принципиальные изменения в цикл изготовления.

Минимальные размеры катетов односторонних поясных швов следует принимать такими, чтобы с учетом глубины проплавления расчетная высота шва составляла не менее 0,8 толщины стенки. При прикреплении ребер жесткости и диафрагм минимальный катет одностороннего шва можно принимать из условия обеспечения технологической прочности соединения.

Существуют определенные ограничения для применения односторонних швов, вызванные особенностями конструктивной формы подобных соединений, а также отсутствием анализа систематических наблюдений за поведением конструкций с такими швами в процессе их монтажа и эксплуатации. Ограничения, в основном, сводятся к следующему: а) недопустимость односторонних швов в конструкциях, эксплуатируемых в среднеагрессивной и сильноагрессивной средах, при низких отрицательных температурах, а также испытывающих непосредственное воздействие подвижных или вибрационных нагрузок; б) необходимость принятия конструктивных мер, предупреждающих возникновение момента, который поворачивает полку относительно стенки сварного двутавра с односторонним поясным швом (например, постановку ребра в месте приложения большой сосредоточенной силы).

7.7. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ТОЧЕЧНЫМИ И ПРОРЕЗНЫМИ ШВАМИ

Объем соединений с точечными и прорезными швами в современных сварных конструкциях (особенно строительных) невелик. Это в основном соединения, полученные точечной контактной сваркой в тонкостенных конструкциях, а также отдельные случаи применения прорезных швов. Вопросы расчета на прочность для этих соединений рассматривались главным образом в рамках классических подходов без учета примыкающей к шву острой полости. Между тем в подавляющем числе случаев даже при статическом нагружении разрушение начинается у вершины примыкания к металлу шва полости и распространяется либо по шву, либо по основному металлу (зоне сплавления). Таким образом, инициатором разрушения является острый концентратор напряжений по периметру сварной точки (прорезного шва), обусловленный примыкающей полостью. Достаточно естественным является стремление учесть этот концентратор на основе современных критериев механики разрушения, что отражено в работах, опубликованных в последние годы ([49] и др.). В 7.2 рассматривался вопрос распределения усилий и напряжений в однорядных и многорядных точечных швах соединений внахлестку. Было отмечено, что в случае однорядного и односрезного шва, загруженного усилием P_x на одну точку, характерными сечениями являются: 1) сечение шва в плоскости примыкания $A-\overline{A}$ (см. рис. 7.14, *а*); 2) цилиндрическая поверхность $B_1-\overline{B}_1$, $\overline{B}_2-B_2$ (в связи с описанием разрушения вырывом точки из j-го элемента ($j = 1, 2$)); 3) плоскость $x = \text{const}$ околошовной зоны j-го элемента; 4) сечение $x = \text{const}$ по основному материалу j-го элемента вдали от шва. В случае инициирования разрушения по сечению шва в плоскости примыкания $A-\overline{A}$ (вариант 1) интенсивность напряжений $\sigma_i^{ср}$, определяющая инициирование вязкого разрушения, может быть вычислена по зависимостям (7.28), для варианта 2 — по (7.29), для варианта 3 — по (7.30) и для варианта 4 — $\sigma_i = |\sigma_{xxj}^{\infty}| = P_x/t\delta_j$. Необходимость учета «охрупчивания» от прилегающей полости при инициировании разрушения воз-

никает обычно для вариантов 1 и 2. Согласно табл. 7.6

$$K_{\mathrm{I}} = P_z/2\sqrt{\pi}\,R^{3/2} + 3M/2\sqrt{\pi}\,R^{5/2};$$

$$K_{\mathrm{II}} = \overline{P}_x/2\sqrt{\pi}\,R^{3/2}. \qquad (7.60)$$

Из соотношения (7.51) следует при $K_{\mathrm{III}} \equiv 0$

$$K_{\omega_*} = K_{\mathrm{I}}\,\frac{1+3\sqrt{1+8\xi^2}}{4}\cos^3\frac{\omega_*}{2}, \qquad (7.61)$$

где $\xi = K_{\mathrm{II}}/K_{\mathrm{I}}$; ω_* — угол вероятного развития хрупкой трещины вглубь основного металла (рис. 7.42), определяющийся условием (7.51а),

$$\operatorname{tg}\frac{\omega_*}{2} = -\frac{2\xi}{1+\sqrt{1+8\xi^2}}. \qquad (7.62)$$

При $\beta \to 0$ и $\gamma = (S_1+S_2)/4R$ в пределах $0{,}2 < \gamma < 0{,}5$ величина ω_* изменяется в диапазоне $31{,}3° < |\omega_*| < 50{,}2°$. Увеличение угла β приводит к некоторому уменьшению угла ω_*. Количественное влияние примыкающей полости на предельную статическую нагрузку P_x можно получить из двухпараметрического критерия (7.48) при $q = 1$:

$$\left(\frac{\overline{\sigma}^{\max}_{i,\bar{n}}}{\sigma_{pj}}\right)^2 + \left(\frac{K^{\max}_{\omega_*}}{K_{1cj}\eta_j}\right)^2 = 1,$$

$$\eta_j = \overline{\eta}_j(r)\,\overline{\overline{\eta}}_j(\delta_j) \quad (j=1,\,2;\ \bar{n} = \text{ср. выр}), \qquad (7.63)$$

где $\overline{\eta}(r) = 1$ при $r < r_0 \cong 0{,}1$ мм и $\overline{\eta}(r) = \sqrt{r/r_0}$ при $r > r_0$; $\overline{\overline{\eta}}(\delta_j) = 1$, если $\delta_j < \delta_{mj} \approx (K_{1c}/\sigma_{\mathrm{T}})^2 \cdot 1{,}75$, $\overline{\overline{\eta}} = \sqrt{\delta_{mj}/\delta_j}$, если $\delta_j < \delta_{mj}$. Из (7.63) можно получить числовое значение предельной нагрузки $(P^{\mathrm{пр}}_x)_{\bar{n}}$ ($\bar{n}$ = ср. выр) при статическом нагружении.

Для варианта разрушения 3 предельная нагрузка $P^{\mathrm{пр}}_x$ с учетом (7.30) определяется из соотношения

$$P^{\mathrm{пр}}_x = \sigma^{j\mathrm{ЗТВ}}_p \delta_j t \overline{\gamma}_j, \qquad (7.64)$$

где $\overline{\gamma}_j$ учитывает изгибные напряжения в околошовной зоне, обусловленные моментом $M^{(0)}_j$, т. е.

$$\overline{\gamma}_j = \frac{1}{1+4M^{(0)}_j/P_x\delta_j} = \frac{1}{1+\beta/m_j\delta_j}. \qquad (7.65)$$

Для варианта разрушения по основному металлу (вариант 4)

$$P^{\mathrm{пр}}_x = \sigma^j_{\mathrm{в}}\delta_j t \quad (j=1,\,2). \qquad (7.66)$$

При циклическом нагружении рассматриваемого соединения условие предельного состояния можно, как и для угловых швов, сформулировать в виде

$$\Delta K_{\omega_*} = K^{\max}_{\omega_*} - K^{\min}_{\omega_*} = \Delta K^0_{\mathrm{th}}(1 - \overline{\alpha} r_\sigma), \qquad (7.67)$$

где величины $K^{\max}_{\omega_*}$ и $K^{\min}_{\omega_*}$ определяются по (7.61) при $P = P^{\max}_x$ и $P_x = P^{\min}_x$; $r_\sigma = P^{\min}_x/P^{\max}_x$ — коэффициент асимметрии цикла изменения нагрузки P_x; ΔK^0_{th} — пороговое значение размаха коэффициента интенсивности напряжений K_{ω_*}, практически не вызывающее распространения трещины нормального отрыва при циклическом нагружении; $\overline{\alpha}$ — экспериментальный коэффициент, $\overline{\alpha} \approx 0{,}5...0{,}85$. В случае ограниченной усталости, когда в (7.67) левая часть значительно больше правой, долговечность соединения определяется суммой

$$N = \min(N_l + N_{\mathrm{p}})_l \quad (j=1,\,2), \qquad (7.68)$$

где N_l — длительность инициирования усталостной трещины в виде поверхностной эллиптической трещины глубиной a_{0j} на внутренней поверхности одного из соединяемых листов ($j = 1, 2$). Этот процесс контролируется размахами величин K_{I} и K_{II} по (7.60); N_{p} — длительность распространения усталостной трещины до критических размеров a_{cj}. Здесь используются соответствующие зависимости механики разрушения для поверхностной эллиптической трещины [12]

$$K_{1j} = \sqrt{\pi a_j}\left[\frac{P_x}{tS_j}\,f_{\sigma_j} + 6\,\frac{M^0_j}{t\delta^2_j}\,f_{M_j}\right]. \qquad (7.69)$$

Здесь

$$f_{\sigma_j} = \frac{1{,}12 + 5\,(a_j/\delta_j)^4}{|1-(a/\delta)_j|\,\Phi_{0j}} \quad \text{при } \left(\frac{a}{\delta}\right)_j < 0{,}55;$$

$$f_{\sigma_j} = \frac{0{,}303\,[1+3{,}03\,(a/\delta)_j]}{\sqrt{(a/\delta)_j}\,[1-(a/\delta)_j]^3\,\Phi_{0j}} \quad \text{при } \left(\frac{a}{\delta}\right)_j > 0{,}55;$$

$$f_{M_j} = \frac{0{,}7}{\sqrt{\pi}\,\Phi_{0j}} \times \qquad (7.70)$$

$$\times\sqrt{\left(\frac{\delta}{a}\right)_j\left\{\left|1-\left(\frac{a}{\delta}\right)_j\right|^{-3} - \left[1-\left(\frac{a}{\delta}\right)_j\right]^3\right\}},$$

$$\Phi_{0j} = \int_0^{\pi/2}\left\{1-\left[1-\left(\frac{a}{l}\right)_j\right]\sin^2\theta\right\}^{1/2} d\theta;$$

l_j — длина поверхностной эллиптической трещины. Величина Φ_{0j} в зависимости от $(a/l)_j$ изменяется в пределах от 1 при $(a/l)_j = 0$ до $\pi/2$ при $(a/l)_j = 1$.

Величины N_i и N_{p} определяются из уравнения Пэриса (7.57), т. е. при $K_r = 0$ и $r_\sigma \geqslant 0$

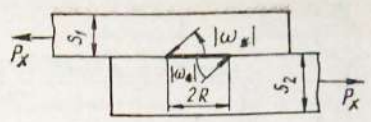
$$(N_i)_j = \int_0^{a_{0j}} \frac{c_j da_j}{[\Delta K_{\omega_*}(R-a_j)]^{n_j}};$$

$$(N_{\mathrm{p}})_j = \int_{a_{0j}}^{a_{cj}} \frac{c_j da_j}{(\Delta K_{1j}(a))^{n_j}}, \qquad (7.71)$$

где ΔK_{ω_*} определяется по (7.60), (7.61), (7.68), если вместо R подставить $R - a_j$, а ΔK_{1j} — по (7.69), если вместо P_x подставить $P_x(1 - r_\sigma)$, $a_0 \cong 0{,}2$ мм [50]; a_{cj} — критический размер поверхностной трещины при $P_x = P^{\max}_x$, рассчитываемый по (7.60), при $(\sigma_i)_j$ — по (7.30) при замене величины δ_j на $\delta_j - a_{cj}$, а K_{ω_*} — на $K^{\max}_{\mathrm{I}}$ (a_{cj}).

В качестве иллюстрации возможностей описанного расчетного алгоритма, реализованного на ПЭВМ, рассмотрим его применение к экспериментальным данным [11] по испытанию на статическую и циклическую прочность соединений внахлестку тонких листов с однорядным точечным швом, полученным электроконтактной сваркой. Испытывались однородные листовые соединения из нержавеющей стали толщиной $\delta = 1{,}5$ мм, а также разнородные соединения, один элемент которых из той же нержавеющей стали $\delta = 1{,}5$ мм, а второй из низкоуглеродистой стали $\delta = 1{,}6$ мм. Состав и свойства материалов из [11] приведены в табл. 7.19. Во всех случаях диаметр сварной точки $2R = 7$ мм. Соединения испытывались на растяжение. На рис. 7.43, *а* приведены результаты испытаний на предельную статическую нагрузку однородного соединения, а на рис. 7.43, *б* — разнородного

Рис. 7.42. Направление хрупкого разрушения сварной точки.



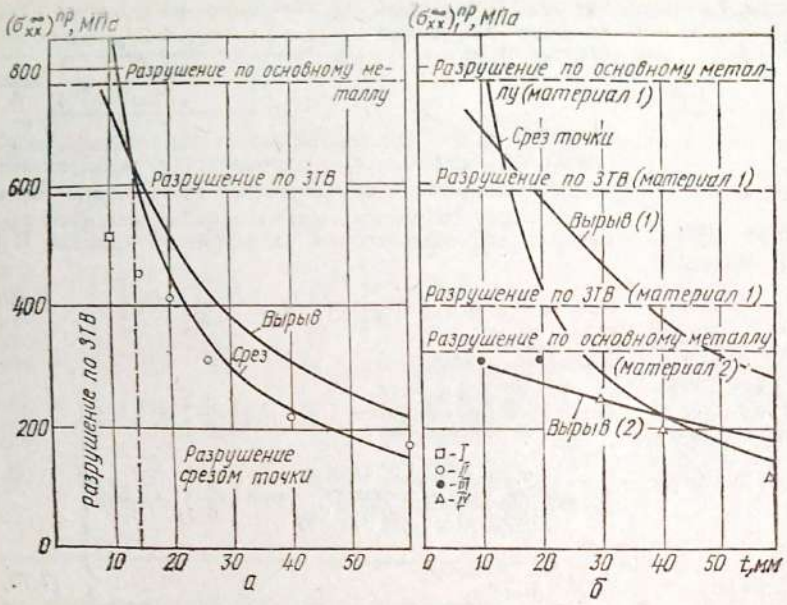


Рис. 7.43. Зависимость расчетных и экспериментальных [11] предельных значений напряжений $(\sigma_{xx}^{\infty})^{пр}$ при статическом нагружении однородных (*а*) и разнородных (*б*) соединений от шага t:

I — экспериментальные данные разрушений по ЗТВ; *II* — то же, разрушение срезом точки; *III* — то же, разрушение по основному металлу (материал 2); *IV* — то же, вырыв.

соединения в зависимости от шага между точками t. Здесь же приведены расчетные данные для четырех вариантов механизма инициирования разрушения (срез точки, вырыв точки, по ЗТВ и основному металлу). Принималось при этом, что прочностные свойства сварной точки аналогичны свойствам основного металла при сварке указанных однородных соединений и близки к свойствам более прочного элемента из нержавеющей стали при сварке указанных разнородных соединений, что подтверждается анализом распределения твердости [11]. Кроме того учитывали, что в ЗТВ элемента из низкоуглеродистой стали прочность также заметно возрастает, что характерно для многих сварных соединений [30]. С учетом изложенного принимались следующие данные о прочностных свойствах различных зон при оценке предельной нагрузки статического нагружения. Для нержавеющей стали (материал 1) $\sigma_р = 755$ МПа для основного металла и ЗТВ. Величина секущего модуля $\overline{E_1} = E = 2 \cdot 10^5$ МПа при напряжениях разрушения $(\sigma_{xx}^{\infty})_1 \leqslant 425$ МПа. При $(\sigma_{xx}^{\infty})_1 > \sigma_{т_1} = 425$ МПа $\overline{E}_1 = 10^3$ МПа. У низкоуглеродистой стали $\sigma_р = \sigma_в = 310$ МПа для основного металла. Для околошовной зоны с учетом влияния термического цикла $\sigma_р = 400$ МПа; секущий модуль $\overline{E}_2 = E = 2 \cdot 10^5$ МПа при $(\sigma_{xx}^{\infty})_2 < 220$ МПа, $\overline{E}_2 = 10^3$ МПа при $(\sigma_{xx}^{\infty})_2 > \sigma_{т_2} = 220$ МПа. Окрупчивающее влияние примыкающей полости при рассматриваемых толщинах незначительно, поэтому приближенно $K_{Ic_1} = K_{Ic_2} \approx 1200$ Н/мм$^{3/2}$. Из рис. 7.43 видно, что экспериментальные данные предельных значений $(\sigma_{xx}^{\infty})_1^{пр} = P_x^{пр}/t\delta_1$

Таблица 7.19. **Химический состав, %, и механические свойства, МПа, свариваемых материалов**

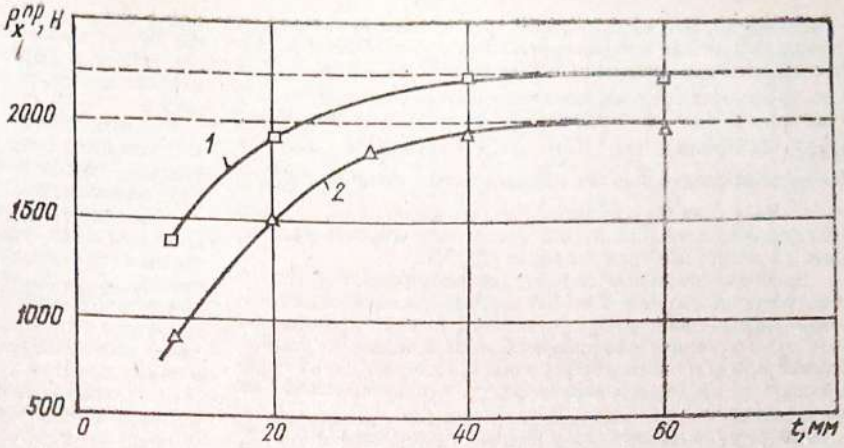
Материал	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	$\sigma_в$	$\sigma_т$
Нержавеющая сталь	0,10	0,70	1,16	17,71	6,78	0,029	0,005	775	426
Низкоуглеродистая сталь	0,07	—	0,29	—	—	0,012	0,016	310	220

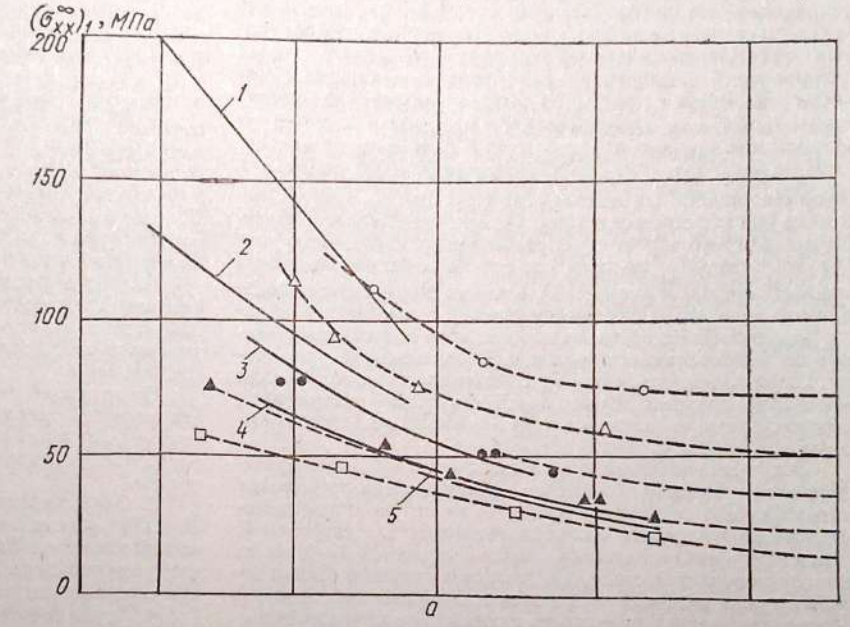
Таблица 7.20. **Экспериментальные предельные нагрузки и средние значения $T^{пр}$ на одну точку многорядного соединения**

Режим сварки	Номер варианта	$\delta = 1$ мм		$\delta = 2$ мм		$\delta = 3$ мм	
		Q, Н	$T^{пр}$, Н	Q, Н	$T^{пр}$, Н	Q, Н	$T^{пр}$, Н
I	1	10 016—10 350	5091	28 073—30 130	14 700	54 567—55 072	27 409
	2	13 194—13 842	4506	42 379—43 164	14 240	84 357—85 225	28 269
	3	17 127—17 404	4316	59 813—60 859	15 084	113 609—114 197	28 475
	4	20 654—21 288	4194	70 521—71 363	14 188	141 304—142 526	28 383
	5	24 782—25 420	4183	83 468—84 364	13 986	164 517—166 129	27 553
II	1	11 813—13 082	6382	32 488—33 556	16 511	60 624—61 491	30 526
	2	16 527—16 906	5572	48 598—49 187	16 297	92 478—93 991	31 078
	3	21 972—22 526	5562	65 559—66 365	16 490	126 448—127 254	31 800
	4	23 443—24 471	4791	79 949—81 006	16 095	152 312—153 223	30 553
	5	31 525—32 727	5354	95 441—96 797	16 020	175 688—177 136	29 402

Рис. 7.44. Зависимость предельных усилий $P_x^{пр}$ при отнулевом цикле нагружения однородного и разнородного соединений по данным расчета (штриховые линии) и эксперимента (сплошные линии) [11] от шага t ($N = 10^6$ циклов):

1 — однородное соединение; *2* — разнородное соединение.





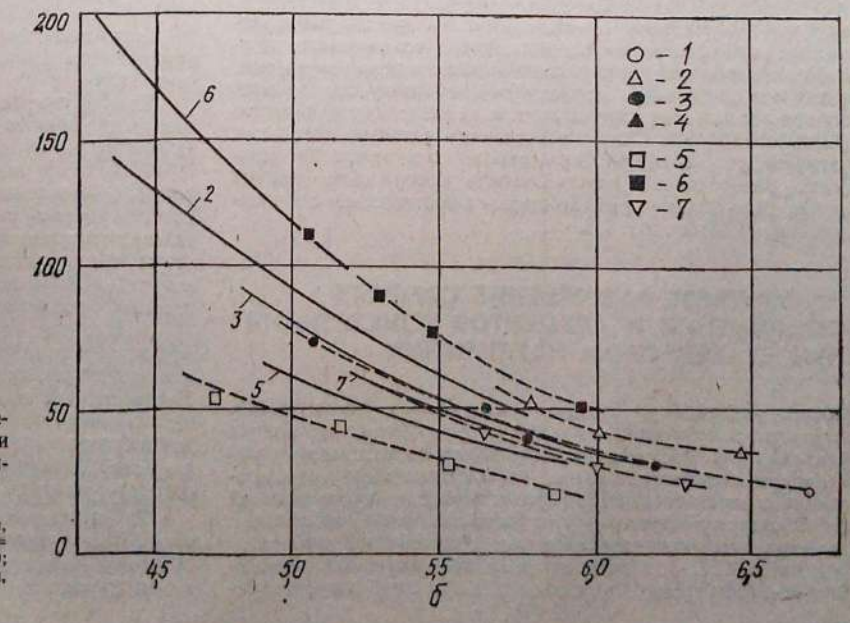


Рис. 7.45. Зависимость расчетных и экспериментальных значений [11] долговечности однородного (*а*) и разнородного (*б*) соединений от напряжений $(\sigma_{xx}^{\infty})_1$:

1 — $t = 10$ мм, $\Phi_0 = 1{,}25$; *2* — $t = 20$ мм, $\Phi_0 = 1{,}25$; *3* — $t = 30$ мм, $\Phi_0 = 1{,}25$; *4* — $t = 40$ мм, $\Phi_0 = 1{,}0$; *5* — $t = 60$ мм, $\Phi_0 = 1{,}0$; *6* — $t = 10$ мм, $\Phi_0 = 1{,}0$; *7* — $t = 40$ мм, $\Phi_0 = 1{,}25$.

достаточно хорошо согласуются с расчетными кривыми как количественно, так и качественно. Результаты расчетов сопротивления циклическому нагружению по (7.67) при $r_\sigma = 0$ и их сопоставление с экспериментальными данными из [11] о влиянии шага t на предельную нагрузку показаны на рис. 7.44. Принято для ЗТВ $\Delta K^0_{th} = 216$ МПа · мм$^{1/2}$ в однородном соединении из нержавеющей стали и $\Delta K^0_{th} = 175$ МПа · мм$^{1/2}$ — в разнородном соединении, как для низкоуглеродистой стали, что достаточно хорошо укладывается в известные представления [33, 50].

Экспериментальные данные, соответствующие усталостному разрушению при $N = 10^6$ циклов, показывают, что определенное влияние на сопротивление усталости оказывают свойства материала околошовной зоны и величина шага t. Однако при обычно рекомендуемых значениях $t > 6R$ влияние шага на предельное сопротивление усталости весьма незначительно.

Более существенно влияние шага t проявляется при ограниченной усталости [11]. На рис. 7.45 приведены результаты расчета в сопоставлении с экспериментальными данными из [11] по ограниченной усталости для рассматриваемых однородных и разнородных соединений с однорядным точечным швом при $r_\sigma = 0$. При этом использовались следующие данные для зависимостей (7.71) из [33]: $c = 1{,}7191 \times 10^{-4}/977^n$ (мм$^{3/2}$/Н)^n · мм/цикл; $n_1 = 2{,}25$; $n_2 = 3{,}25$.

В случае двухсрезных, а также многорядных точечных швов соединений внахлестку роль изгибных деформаций невелика при типичном силовом нагружении в плоскости соединяемых элементов, поэтому определение предельной нагрузки связано главным образом со срезом точек по плоскости примыкания $A—\overline{A}$ (вариант 1), в плоскости x=const в околошовной зоне j-го элемента (вариант 3) и по основному металлу (вариант 4). Естественно, что при этом необходимы сведения по максимальным усилиям, приходящимся на одну точку. Выше отмечалось, что при развитом пластическом течении материала сварных точек, предшествующем разрушению, можно считать, что нагрузка равномерно распределяется между отдельными точками.

В качестве подтверждения сказанного в табл. 7.20 приведены экспериментальные данные о разрушающих статических нагрузках для различных вариантов многоточечного (многорядного по отношению к направлению действия нагрузки Q) шва соединений внахлестку пластин толщиной 1—3 мм из низкоуглеродистой стали. По каждому варианту сварка велась на двух режимах электроконтактной сваркой. Режим I обеспечивал величину диаметра пятна на внешней поверхности $d_I = 4\sqrt{\delta}$, а режим II — $d_I = 6\sqrt{\delta}$. Количество рядов равно номеру варианта плюс единица. Видно, что в пределах каждой серии, определяемой толщиной листа и режимом сварки, величины предельной нагрузки на одну точку практически одинаковы для всех вариантов, т. е. не зависят от количества поперечных рядов. Однако в случае относительно невысоких нагрузок, что характерно при работе соединения на усталость, распределение усилий между поперечными рядами может быть далеко не равномерным в соответствии с зависимостями (7.33) и табл. 7.5.

7.8. ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Общие сведения о хрупких разрушениях конструкций. Стальные конструкции, надежно работающие в нормальных условиях, иногда внезапно разрушаются при понижении температуры окружающей среды. Это явление, получившее название хладостойкости, привлекает внимание исследователей и специалистов-практиков уже более ста лет — сообщения о хрупких разрушениях появляются в технической литературе с конца XIX в., постепенно учащаясь, достигают максимума в 40-е годы нашего столетия, когда при создании конструкций в качестве одного из основных технологических процессов начала широко использоваться сварка. Эти разрушения, по основным признакам аналогичные хрупким разрушениям клепаных конструкций, имели и некоторые особенности.

Обращают на себя внимание аварии при необычно низких или полностью отсутствующих рабочих нагрузках. Характерен также рост количества частичных разрушений в виде остановившихся трещин.

Как правило, разрушения зарождаются в сварных соединениях или в непосредственной близости от них и распространяются в основной материал. Часто приходится говорить преимущественно о недостаточной надежности — из общего числа однотипных сварных сооружений разрушается только некоторая их часть. Целесообразно привести некоторые сведения общего характера, связанные с сопротивлением сварных конструкций хрупким разрушениям.

1. С понижением температуры вероятность хрупких разрушений конструкций возрастает. Однако в некоторых случаях разрушения могут происходить при нормальных и даже при повышенных температурах.

2. Как правило, очагами хрупких разрушений служат концентраторы напряжений конструктивного, технологического или эксплуатационного характера.

К технологическим концентраторам напряжений можно отнести дефекты сварных соединений (непровары, несплавления, трещины, подрезы, неудаленные прихватки, шлаковые включения), а также дефекты основного металла (расслоения и трещины, образовавшиеся при резке). Технологические дефекты в некоторых случаях связаны с процессами термообработки (трещины), правки (вмятины и надрывы) и монтажа конструкций (царапины и вмятины).

Наиболее распространенными эксплуатационными дефектами являются трещины усталостного происхождения. Значительно реже хрупкие разрушения обусловлены коррозионными трещинами или другими эксплуатационными повреждениями.

Опыт аварий сварных сооружений показывает, что конструктивные, технологические и эксплуатационные концентраторы напряжений представляют наибольшую опасность, когда они расположены в зоне термомеханического цикла сварки.

3. Опасность хрупкого разрушения возрастает при увеличении рабочих нагрузок, особенно если они носят динамический характер. Вместе с тем разрушения, как отмечалось, часто происходят и при рабочих напряжениях, существенно меньших предела текучести материала.

4. Хрупкие разрушения могут возникать как непосредственно после сварки, так и в процессе работы сооружений.

Статически нагруженные конструкции наиболее часто разрушаются в первые годы эксплуатации, хотя известны и другие случаи.

Количество разрушений конструкций, работающих в условиях циклического нагружения, при прочих равных условиях обычно увеличивается с течением времени.

5. Хрупкие разрушения непосредственно связаны с вязкостью применяемых конструкционных материалов: при увеличении ударной вязкости количество разрушений и их протяженность уменьшаются. Важно, тем не менее, отметить, что случаи хрупких разрушений наблюдаются и при довольно высоких значениях ударной вязкости основного материала сварных соединений.

6. При увеличении толщины конструктивных элементов вероятность возникновения хрупких разрушений возрастает, а температуры, при которых они происходят, повышаются. Неизвестны хрупкие разрушения конструкций, изготовленных из низкоуглеродистых и низколегированных сталей обычной и средней прочности при толщине рабочих элементов менее 8 мм. Исключение в этом отношении могут составлять высокопрочные стали.

7. Протяженность хрупких трещин возрастает при увеличении запаса упругой энергии в конструкции. В связи с этим следует отметить такие конструкции, как газопроводы, воздухонагреватели и др. Например, длина хрупких разруше-

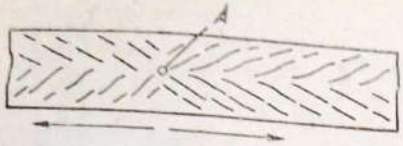


Рис. 7.46. Направление распространения магистральной хрупкой трещины по шевронному узору на поверхности излома (*A* — начало разрушения, стрелками показано направление движения трещины).

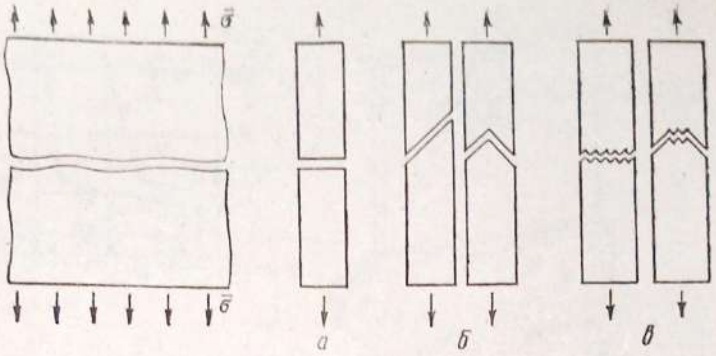


Рис. 7.47. Характерная ориентация поверхности хрупких и вязких изломов:
а — хрупкий; *б* — вязкий; *в* — смешанный излом.

ний в газопроводах может достигать нескольких километров.

Важно также отметить, что в таких конструкциях возможно быстрое нестабильное распространение на большие расстояния не только хрупких трещин, но и вязких разрывов.

8. В инженерной практике хрупкие и вязкие разрушения различают, в основном, по внешнему виду и ориентации поверхности излома. Для хрупких разрушений характерны следующие признаки: а) поверхность излома блестящая, кристаллическая, с характерным шевронным узором, по структуре которого можно определить направление распространения магистральной трещины, а следовательно, и место возникновения разрушения (рис. 7.46); б) плоскость излома всегда ориентирована перпендикулярно направлению действия максимальных нормальных напряжений (рис. 7.47, *а*). В механике разрушения такие трещины получили название трещин нормального отрыва; в) распространение хрупких трещин в обычных условиях происходит, как правило, нестабильно, с большими скоростями.

Для вязких разрушений характерны следующие особенности: а) поверхность излома матовая, волокнистая, обычно сильно деформированная, шевронный узор отсутствует; б) плоскость излома ориентирована преимущественно в направлении действия максимальных касательных напряжений. При растяжении плоскость излома ориентирована под углом 45° к направлению действия максимальных нормальных растягивающих напряжений (рис. 7.47, *б*).

В зонах, характеризующихся высокой степенью объемности напряженного состояния (нормальные компоненты тензора напряжений одного знака и близки по величине), плоскость магистрального излома может быть полностью или частично ориентирована перпендикулярно действию нормальных напряжений (вязкий отрыв) (рис. 7.47, *в*). При этом на участках вязкого отрыва обычно видны следы микросрезов в виде характерной «ямочной структуры», а распространение вязких разрывов может протекать как стабильно, вслед за изменением нагрузки, так и нестабильно — с высокими скоростями.

Описанные признаки хрупких и вязких разрушений проявляются, главным образом, при разрушении сварных конструкций, изготовленных из низкоуглеродистых и низколегированных сталей обычной и средней прочности. У сталей высокой прочности, алюминиевых и титановых сплавов, у которых нет ярко выраженного вязкохрупкого перехода, основным фактографическим признаком, отличающим вязкое разрушение от хрупкого, является ориентация поверхности излома. Изломы, показанные на рис. 7.47, классифицируют как хрупкие (рис. 7.47, *а*), смешанные (рис. 7.47, *в*) или вязкие (рис. 7.47, *б*).

Таким образом, хрупкое разрушение включает в себя три стадии: возникновение (инициирование) разрушения, распространение трещины, остановка трещины (наблюдается не всегда).

Сопротивление конструкций возникновению разрушения определяется, в основном, местными условиями : с одной стороны, напряженно-деформированным состоянием материала в отдельных, наиболее напряженных точках конструкции (зоны концентрации напряжений), с другой — способностью материала без разрушения выдерживать возникающие локальные упруго-пластические деформации — вязкостью материала. Стандартные характеристики прочности и пластичности конструкционных сталей, определяемые в условиях одноосного растяжения ($\sigma_т$, $\sigma_в$, $S_к$, δ, ψ), не отражают работоспособность материала в конструкции при сложном напряженном состоянии. Обычно материал разрушившихся конструкций обладает достаточно высокими стандартными показателями прочности и пластичности в соответствии с действующими техническими нормами.

Значительно большую информацию в этом отношении дают стандартные испытания на ударную вязкость (на образцах Шарпи и Менаже), которые были введены в инженерную практику задолго до широкого внедрения сварки в строительство. Как известно, эти испытания обладают двумя главными достоинствами — высокой чувствительностью к изменению вязкости металла при изменении его химического состава структуры и температуры; простотой, которая делает их доступными для широкого практического применения при сдаточных, контрольных и сравнительных испытаниях материалов. Однако при нормировании значений ударной вязкости основного металла в сварных соединениях с целью обеспечения безопасности конструкции и ее экономичности возникают трудности.

Различные условия работы материала в конструкции (скорость нагружения, характер напряженного состояния, наличие собственных напряжений, размеры возможных дефектов, локальные изменения свойств материала при сварке и т. д.) далеко не всегда находят прямое отражение в результатах испытаний на ударную вязкость. Кроме того, конкретные нормативные значения ударной вязкости не могут быть непосредственно использованы проектировщиком, который оперирует понятиями «напряжения» и «деформации». Поэто-

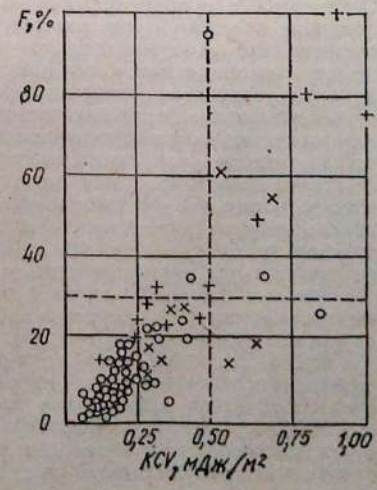
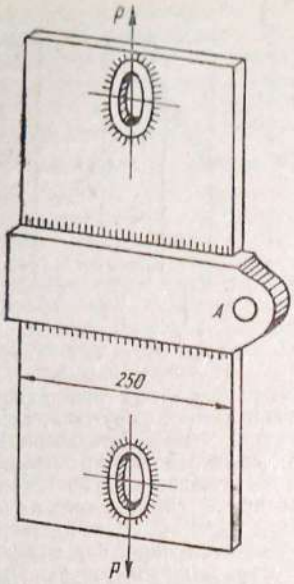
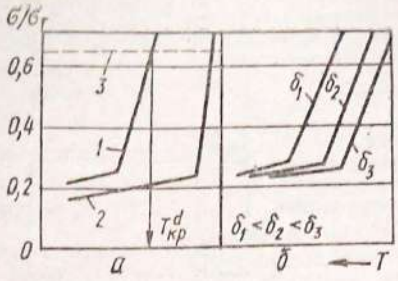
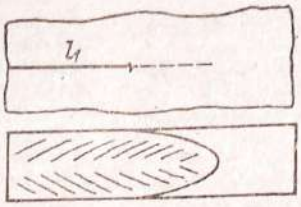


Рис. 7.48. Зависимость доли волокнистого излома в образцах Шарпи от ударной вязкости сталей при 0 °С для разрушенных сварных судов [48].







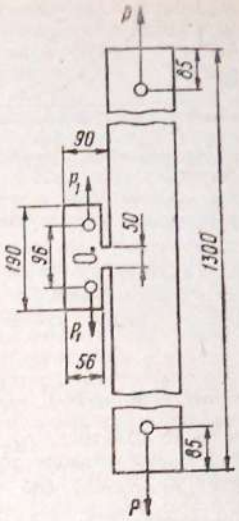


Рис. 7.49. Образец Робертсона (*А* — место нанесения удара).

Рис. 7.50. Зависимость номинальных напряжений остановки хрупкой трещины от температуры испытаний для разных сталей (*а*) и разных толщин листа (*б*):

1 — низколегированная сталь; *2* — низкоуглеродистая сталь; *3* — рабочие напряжения в конструкции.

Рис. 7.51. Форма поверхности излома в месте остановки хрупкой трещины (l_1 — наблюдаемая длина трещины).

Рис. 7.52. Образец для испытаний на двойное растяжение.

му, когда при внедрении сварки в строительство начались массовые аварии, основная информация при нормировании значений ударной вязкости черпалась из практического опыта, т. е. из статистических зависимостей, полученных при анализе разрушений конкретных конструкций (рис. 7.48).

Вместе с тем при изменении условий работы конструкций, применении новых материалов или выборе нестандартных конструктивно-технологических решений прежний опыт оказывается недостаточным основанием для инженерных решений. В связи с этим ведутся поиски путей обеспечения надежности сварных конструкций с учетом конкретных особенностей возникновения и распространения хрупких разрушений. Один из наиболее популярных путей такого типа основан на принципе предотвращения распространения хрупкого разрушения. Его основная идея заключается в том, чтобы отказаться от рассмотрения конкретных условий возникновения хрупкого разрушения, которые зависят от местных, нередко случайных и не всегда хорошо контролируемых причин. Предполагается, что если в конструкции существуют условия для распространения разрушения, то его возникновение достаточно трудно исключить. Такой подход представляет большой интерес потому, что распространение разрушения и его остановка контролируются условиями общего характера и, прежде всего, уровнем номинальных напряжений, который устанавливается при проектировании конструкции.

Впервые подобный подход к обеспечению надежности сварных конструкций с помощью выбора основного материала был предложен Робертсоном [45], который установил, что для каждой стали при данной температуре и толщине листа существуют свои критические напряжения, ниже которых трещина останавливается, а выше которых — распространяется. Сущность методики испытаний ясна из рис. 7.49. Широкая пластина растягивается усилием, обеспечивающим заданные в ней напряжения. В пластине создается градиент температур. На охлажденном краю пластины имеется искусственный надрез. При определенных заданных напряжениях по выступу наносится удар. В надрезе возникает хрупкая трещина, распространяющаяся в направлении, перпендикулярном действию усилия. Трещина останавливается на участке металла с критической температурой, соответствующей заданному уровню номинальных напряжений. Характерные кривые таких испытаний для различных сталей при постоянной толщине листа и для одной и той же стали при различных толщинах листа (δ_1, δ_2, δ_3) показаны на рис. 7.50.

Таким образом, если эксплуатационные температуры не снижаются ниже критической температуры остановки трещины ($T^d_{кр}$), то вероятность распространения хрупких разрушений невелика. По этой методике можно учитывать не только качество стали, но и проектно-технологические особенности сварной конструкции: толщину, уровень рабочих напряжений, наличие в конструкции остаточной напряженности и т. д.

Несмотря на рациональность самой идеи определения критических температур остановки трещины, предложенная Робертсоном методика имеет определенные недостатки. В образце температурное поле неравномерное, с большим градиентом, что не соответствует реальным условиям. Весьма приближенным является также определение температуры остановки трещины, так как в глубинных слоях листа длина трещины больше, чем на поверхности (рис. 7.51).

На основе идеи Робертсона, но с учетом ее недостатков в США и Японии были разработаны новые методики исследования сталей. Так, Ф. Н. Фили с сотрудниками [46] предложил образцы в виде пластин с симметричными боковыми надрезами, которые равномерно охлаждаются до определенной температуры и на которых после приложения к ним растягивающей нагрузки в вершине надреза инициируется хрупкая трещина. В зависимости от уровня номинальных напряжений трещина либо останавливается, либо пересекает все сечение образца. Критические напряжения определяются как средние между минимальными, при которых трещина пересекла все сечение, и максимальными, при которых она остановилась.

Японские исследователи для аналогичных целей предложили образец, испытываемый на двойное растяжение (рис. 7.52). Он состоит из двух частей — основной и вспомогательной. Образец зажимается в захватах специальной машины и охлаждается до необходимой температуры. Основная часть образца нагружается требуемой нагрузкой, а вспомогательная часть независимо подвергается растяжению вплоть

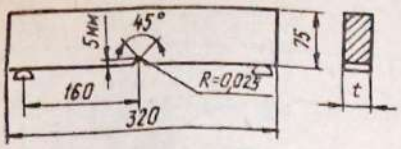


Рис. 7.53. Образец ДВТТ.

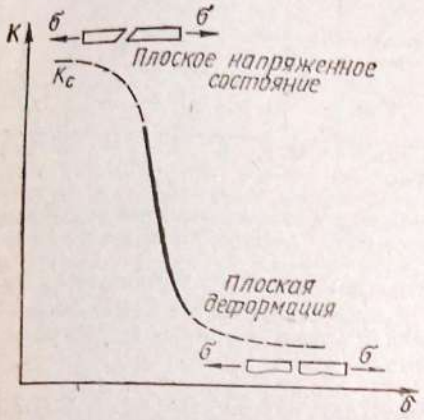


Рис. 7.54. Зависимость K_c от толщины образца.

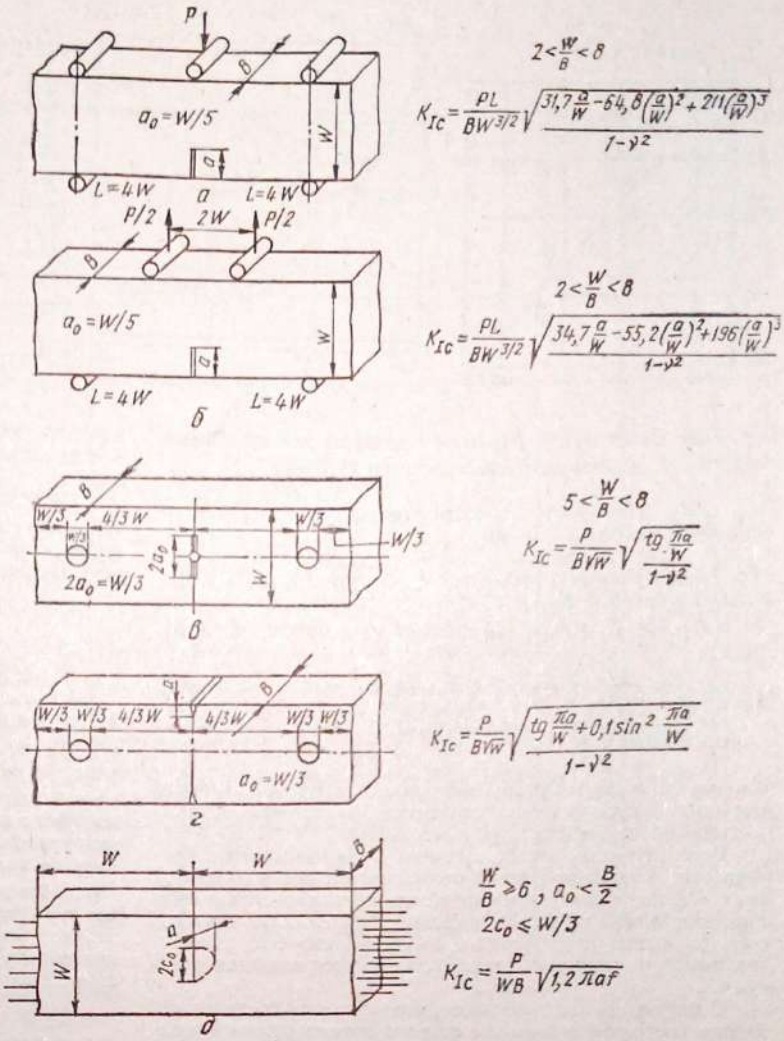


Рис. 7.55. Образцы для определения вязкости разрушения K_{1c} испытанием на изгиб (*а*, *б*) и растяжение (*в*, *г*, *д*).

до возникновения хрупкого разрушения, которое распространяется в основную часть образца и останавливается либо пересекает все рабочее сечение.

Описанные методы испытаний, несмотря на ряд несомненных достоинств, обладают также некоторыми существенными недостатками. Прежде всего эти испытания слишком сложны для широкого практического использования, например в условиях металлургических предприятий. Кроме того критическая температура остановки трещины при прочих равных условиях зависит от длины трещины l, поскольку максимальные напряжения перед фронтом разрушения пропорциональны $\sqrt{l}$. Иными словами, при неизотермических испытаниях критическая температура изменяется при изменении температурного градиента. При изотермических испытаниях критическая температура и минимальные напряжения, необходимые для распространения разрушения в закритической области, также изменяются, если вместо качественных показателей «трещина останавливается» или «трещина распространяется» использовать величину пробега трещины. Это затрудняет практическую интерпретацию результатов подобных испытаний.

В последнее время довольно широкое практическое применение получили так называемые испытания ДВТТ [47]. Образец с прессованным надрезом, толщина которого соответствует толщине исследуемого материала, подвергается на копре динамическому испытанию на изгиб (рис. 7.53). Динамический характер нагружения обеспечивает скорости деформирования материала перед фронтом разрушения, соответствующие таковым в реальных конструкциях для длинных трещин, распространяющихся в поле высоких растягивающих напряжений. При испытаниях фиксируется процентное соотношение вязкой составляющей в изломе образца F и энергии, поглощенной при разрушении. У материалов, имеющих выраженный вязкохрупкий переход, оба показателя резко возрастают в узком диапазоне температур. Критическая температура обычно соответствует значениям $F = 50...80\ \%$. Считается, что при температуре выше критической распространение хрупких трещин (вне зависимости от их длины) становится невозможным.

Относительно небольшие размеры образцов ДВТТ и несложная методика этих испытаний способствуют достаточно широкому их практическому использованию, например при выборе материалов для магистральных газопроводов. Большой запас упругой энергии в газопроводах, обусловленный пневматическим характером нагружения, способствует распространению хрупких разрушений на очень большие рас-

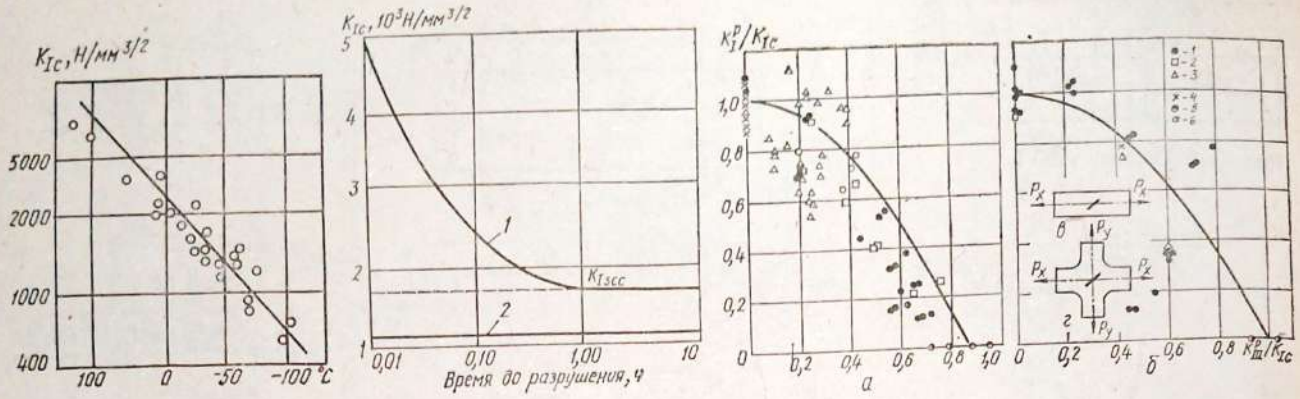


Рис. 7.56. Зависимость K_{1c} от температуры для низколегированной стали повышенной прочности НТ60 [48].

Рис. 7.57. Зависимость вязкости разрушения материала от влияния агрессивной среды.

Рис. 7.58. Сравнение расчетных и экспериментальных предельных значений K_I, K_{II}, K_{III} при сложном нагружении (K_I и K_{II} (*а*), K_I и K_{III} (*б*)) плоских (*в*) и крестовых (*г*) образцов:

1 — плоский образец с наклонной трещиной; *2 — 4* — крестовый образец (*2* — $P_x/P_y = 0/1$, *3* — $P_x/P_y = 1/2$, *4* — $P_x/P_y = 1/1$); *5* — плоский образец с криволинейной трещиной; *6* — плоский балочный образец.

стояния (до нескольких километров). Поэтому для уменьшения длины разрыва важно полностью исключить возможность распространения хрупких трещин.

Рассмотренный подход к выбору материалов может применяться, когда речь идет об особо ответственных конструкциях. Однако с экономической точки зрения он может быть оправдан далеко не всегда, поскольку критические температуры (особенно при больших толщинах рабочего сечения) для низкоуглеродистых сталей оказываются слишком высокими.

В параграфе 7.2 отмечалось, что в упругой среде напряженное состояние в вершине острого концентратора трещинообразной формы полностью определяется коэффициентами интенсивности напряжений K_I, K_{II}, K_{III}. Поскольку хрупкие разрушения, как правило, сопровождаются небольшими пластическими деформациями, то для оценки трещиностойкости материалов (сварных соединений) при хрупком разрушении в последние десятилетия используется аппарат линейной механики разрушения тел с трещинами. Вводится понятие критического значения коэффициента интенсивности напряжений K_c для данного материала, при котором трещина нормального отрыва еще сохраняет равновесие (не увеличивается). Величина K_c обычно зависит от толщины материала (при прочих равных условиях) (рис. 7.54). При малых толщинах в условиях плоского напряженного состояния обычно реализуется вязкое разрушение с большой зоной пластического деформирования, а при больших толщинах в условиях плоской деформации зона пластического деформирования минимальная и соответствующие критические значения коэффициента интенсивности напряжений K_c наиболее низки. Значения K_c по результатам испытания в условиях плоской деформации трещины нормального отрыва называют вязкостью разрушения материала при статической нагрузке и обозначают K_{Ic}.

Существуют различные образцы для практических испытаний материалов (сварных швов) при получении значений K_{Ic}. Некоторые из этих образцов показаны на рис. 7.55 и применяются при испытаниях на трехточечный и четырехточечный изгибы, а также на растяжение. Здесь приведены ограничения на размеры образцов из условий реализации в зоне трещины состояния, близкого к плоской деформации.

На рис. 7.56 приведена типичная зависимость K_{Ic} от температуры для низколегированной стали повышенной прочности (типа НТ60) [48]. Эти данные достаточно хорошо аппроксимируются выражением

$$K_{Ic} = K_0 \exp\left(-\frac{T_*}{T + 273}\right) \qquad (7.72)$$

при $T_* = 300°$ С; $K_0 = 1090$ Н/мм$^{3/2}$.

Накоплено достаточно много информации о вязкости разрушения материала K_{Ic} как при различных температурах, так и в различных средах. Влияние агрессивной среды сказывается на величине K_{Ic} тем существенней, чем больше время пребывания материала в этой среде (рис. 7.57). Однако начиная с некоторого времени t это влияние становится незначительным, т. е. происходит процесс насыщения. Минимальное значение $K_{Ic} = K_{Iscc}$ принимается в качестве характеристики вязкости разрушения в данной среде. Таким образом, в случае хрупкого разрушения (разрушения в условиях плоской деформации) в виде трещины нормального отрыва критерий предельного состояния равновесия трещины представляется равенством

$$K_I - K_{Ic} = 0. \qquad (7.73)$$

В более общем случае нагружения, когда K_{II} и K_{III} не равны нулю, используются различные обобщения [12] для предельного состояния нераспространения трещины. Эти обобщения обычно основаны на связи K_I, K_{II}, K_{III} с максимальными нормальными напряжениями либо со скоростью освобождения упругой энергии в зоне у вершины трещины.

В первом случае исходим из соотношения, определяющего значение коэффициента интенсивности напряжений $K_{\omega\theta}$ в произвольной точке O_i на контуре трещины, где ω — широтный угол, а θ — угол по меридиану локальной сферической системы координат с центром в рассматриваемой точке O_i:

$$K_{\omega\theta} = \left(K_I \cos\frac{\omega}{2} - 3K_{II}\sin\frac{\omega}{2}\right)\cos^2\frac{\omega}{2}\cos^2\theta + \\ + K_{III}\cos\frac{\omega}{2}\sin^2\theta. \qquad (7.74)$$

Критическое состояние определяется условием

$$K^{\max}_{\omega_*\theta_*} - K_{Ic} = 0, \qquad (7.75)$$

где $K^{\max}_{\omega_*\theta_*}$ — экстремальные значения $K_{\omega\theta}$ в рассматриваемой точке O_i при $\omega = \omega_*$ и $\theta = \theta_*$, значения которых находятся из системы уравнений

$$\left.\frac{\partial K_{\omega\theta}}{\partial\omega}\right|_{\omega=\omega_*} = 0; \quad \left.\frac{\partial K_{\omega\theta}}{\partial\theta}\right|_{\theta=\theta_*} = 0. \qquad (7.76)$$

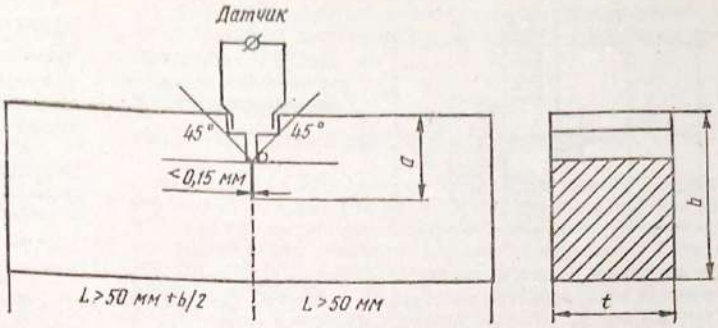


Рис. 7.59. Схема измерений при испытаниях на определение δ_c.

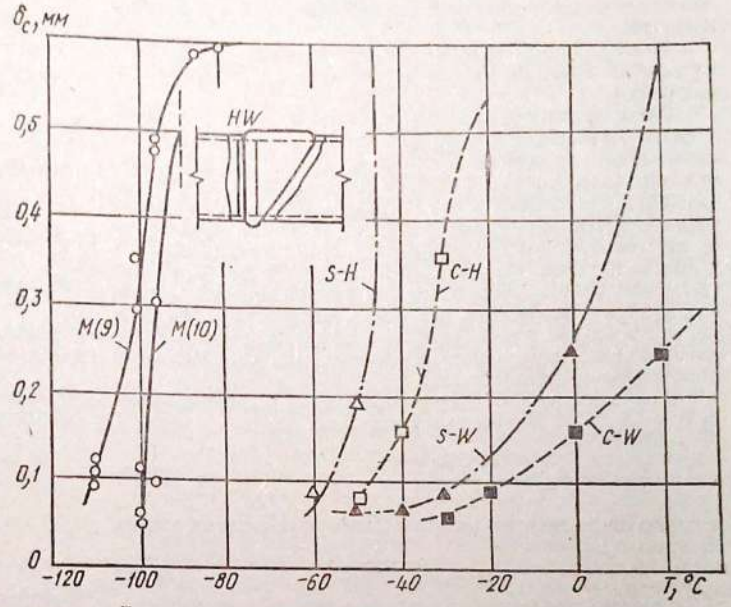


Рис. 7.60. Типичная зависимость критического раскрытия трещины δ_c от температуры испытания для различных участков сварного соединения при сварке стали 18G2AV [54]:

C — сварка покрытыми электродами; *S* — сварка под флюсом; *W* — металл шва; *H* — металл ЗТВ; *M* — основной металл.

В достаточно общем случае получить из (7.74), (7.76) аналитическую зависимость для $K^{\max}_{\omega_*\theta_*}$ при произвольных значениях K_I, K_{II}, K_{III} не представляется возможным. Здесь наиболее реальными для получения конкретного решения являются численные методы. Однако для отдельных характерных частных случаев из (7.74) — (7.76) можно получить удобные для инженерного применения зависимости. Например, если в рассматриваемой точке O_i на поверхности трещины $K_{III} \equiv 0$, то в этом случае $\theta_* = 0$, а величину ω_*, определяющую наиболее вероятное направление распространения трещины (см. рис. 7.42), находим из выражения

$$\operatorname{tg}\frac{\omega_*}{2} = \frac{1}{4\xi}\left(1 - \sqrt{1+8\xi^2}\right) = -\frac{2\xi}{1+\sqrt{1+8\xi^2}}, \quad (7.77)$$

где $\xi = K_{II}/K_I$.

Обычно считают [12], что хрупкое разрушение возможно, в основном, только при $K_I > 0$, что соответствует значениям ω_* по (7.77) в пределах $-71° < \omega_* < 71°$. С учетом (7.77) из (7.74) следует при $K_{III} \equiv 0$

$$K_{\omega_*\theta_*} = K_I \frac{1+3\sqrt{1+8\xi^2}}{4}\cos^3\frac{\omega_*}{2} = K_I\left(1+\frac{6}{1+\sqrt{1+8\xi^2}}\right)\times \times \frac{(1+\sqrt{1+8\xi^2})^3}{\left[(1+\sqrt{1+8\xi^2})^2+16\xi^2\right]^{3/2}}. \quad (7.78)$$

Для частного случая, когда $K_{II} \equiv 0$, получим

$$K_{\omega_*\theta_*} = \frac{K_I + \sqrt{K_I^2 + K_{III}^2}}{2}; \quad \omega_* = 0;$$

$$\operatorname{tg} 2\theta_* = \frac{2K_{III}}{K_I}. \quad (7.79)$$

На рис. 7.58 приведены кривые предельных состояний, рассчитанные по (7.75) с помощью (7.78) и (7.79), и экспериментальные данные из [51, 52], подтверждающие достаточную приемлемость такого подхода при хрупком разрушении тел с трещинами, нагруженных статической нагрузкой.

Однако следует отметить, что чисто хрупкое разрушение сварных соединений и узлов — достаточно редкое явление даже при наличии трещинообразных дефектов, поэтому строгое применение критериев линейной механики разрушения для сварных конструкций, нагруженных статической нагрузкой, приемлемо только в отдельных случаях.

Более универсальным является использование подходов нелинейной механики разрушения, в основу которой положены представления об упруго-пластическом поведении материала в зоне трещинообразных дефектов. Однако на данном этапе строгие методы нелинейной механики разрушения, требующие численных методов решения соответствующих упруго-пластических задач, имеют ограниченное практическое применение. Более распространены приближенные методы, основанные на различных подходах, позволяющих обобщить фундаментальные результаты линейной механики разрушения на случай упруго-пластического поведения материала. В обзорной статье [53] рассматривается 13 различных под-

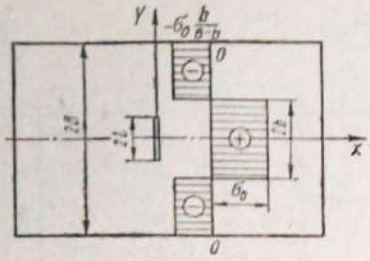


Рис. 7.61. Пластина с трещиной с остаточными напряжениями.

ходов такого типа и анализируются возможности их использования при сравнении вязкости разрушения различных материалов и при оценке допустимости трещинообразных несовершенств (дефектов) при эксплуатационной статической нагрузке.

Такое количество подходов свидетельствует о сложности вопроса и отсутствии достаточно эффективного единого метода решения.

Среди приближенных подходов для решения первой задачи наиболее известен подход, основанный на использовании критического раскрытия трещины δ_c, которое считается константой материала при заданных температуре, скорости деформации и толщине элемента. На рис. 7.59 показана схема таких измерений, а на рис. 7.60, *б* — типичная зависимость δ_c от температуры для различных участков сварного соединения из стали 18G2AV (0,18 % C; 1,46 % Mn; 0,34 % Si; 0,17 % V; 0,03 % Al) при двух вариантах дуговой сварки: под флюсом и покрытыми обычными электродами [54]. Видно, что в данном случае основной металл отличается более высокой вязкостью при низких температурах, чем металл шва и зоны термического влияния.

В случае упругого деформирования материала связь между $\delta_c = \delta_{1c}$ и K_{1c} определяется зависимостью

$$\delta_{1c} = \frac{K_{1c}^2 (1 - \nu^2)}{2E\sigma_T}, \qquad (7.80)$$

которую применяют на практике для приближенных оценок K_c через δ_c:

$$K_c \approx \sqrt{2\delta_c E \sigma_T}. \qquad (7.81)$$

При решении второй задачи, связанной с оценкой допустимости трещинообразных несовершенств (как это сделано в 7.4, 7.5, 7.7) или дефектов, использование критерия

$$\delta \leqslant \delta_c \qquad (7.82)$$

сопряжено с достаточно большими трудностями при определении истинного раскрытия трещины в реальной конструкции при сложном напряженном состоянии. Например, для неограниченной пластины со сквозной трещиной длиной $2l$, нагружаемой нормальной нагрузкой σ_{xx}, раскрытие у кончика трещины определяется формулой

$$\delta = \frac{8\sigma_T l}{\pi E} \ln \sec\left(\frac{\pi \sigma_{xx}}{2\sigma_T}\right). \qquad (7.83)$$

Учет геометрических особенностей сварных соединений из-за нелинейности задачи не поддается простому табулированию, как для K_I, K_{II}, K_{III} (см. 7.2), поэтому критерий (7.82) не нашел практического применения для решения этой задачи.

В параграфах 7.4, 7.5, 7.7 приведены алгоритмы расчета на прочность сварных соединений с трещинообразными несовершенствами на основе так называемого двухпараметрического критерия, предложенного в [55]:

$$(\sigma_l/\sigma_p)^{1+q} + (K^{\max}_{\omega_*\theta_*}/K_c)^2 = 1, \qquad (7.84)$$

где первое слагаемое в левой части равенства характеризует вязкое разрушение материала, а второе слагаемое — хрупкое. В общем случае $q \geqslant 1$, $\sigma_в < \sigma_p < S_к$, $K_c \geqslant K_{1c}$, σ_l — интенсивность напряжений в рассматриваемом месте без учета остаточных сварочных напряжений, $K^{\max}_{\omega_*\theta_*}$ — коэффициент интенсивности напряжений по теории обобщенного нормального отрыва с учетом остаточных сварочных напряжений, т. е. $K^{\max}_{\omega_*\theta_*}$ определяется по (7.74), (7.76) через суммы $K_I + K_I^r$, $K_{II} + K_{II}^r$, $K_{III} + K_{III}^r$, где индекс r соответствует коэффициентам интенсивности напряжений, обусловленным нерелаксированными остаточными сварочными напряжениями.

Учитывая важность влияния остаточных сварочных напряжений на статическую прочность при наличии трещинообразных концентраторов, рассматриваем его более подробно. Используем модель длинной полосы $-B < y < B$, $-\infty < x < \infty$ с продольными напряжениями $\sigma_{xx}^{ост}$, распределенными по идеализированной схеме

$$\sigma_{xx}^{ост} = \sigma_0, \quad -b < y < b; \quad \sigma_{xx}^{ост} = -\sigma_0 \frac{b}{B-b}, \quad B > |y| > b. \qquad (7.85)$$

Имеется сквозная трещина $-l < y < l$ ($l \ll B$), расположенная по нормали к оси x (рис. 7.61). Внешняя нагрузка создает только напряжения σ_{xx}. Нерелаксированные остаточные напряжения $\sigma_{xx}^{нг}$ определяются зависимостями:

$$\left.\begin{array}{l} \text{если } \sigma_{xx} < \sigma_T - \sigma_0, \quad \text{то} \quad \sigma_{xx}^{нг} = \sigma_{xx}^{ост}; \\ \text{если } \sigma_{xx} > \sigma_T - \sigma_0, \quad \text{то} \quad \sigma_{xx}^{нг} = \sigma_T - \sigma_{xx} \\ \text{при } -b < y < b, \\ \sigma_{xx}^{нг} = -(\sigma_T - \sigma_{xx}) \dfrac{b}{B-b} \quad \text{при} \quad b \leqslant |y| < B. \end{array}\right\} \qquad (7.86)$$

Поскольку принято, что $l \ll B$, то для описания коэффициентов интенсивности напряжений от напряжений σ_{xx} (внешняя нагрузка) и нерелаксируемых остаточных $\sigma_{xx}^{нг}$ можно использовать следующие зависимости [56]:

$$K_I = \sigma_{xx}\sqrt{\pi l}; \quad K_{II} = K_{III} \equiv 0; \quad K_I^r = 2\sqrt{\frac{l}{\pi}} \times \int_0^l \frac{\sigma_{xx}^{нг}(y)}{\sqrt{l^2 - y^2}}\, dy; \quad K_{II}^r = K_{III}^r \equiv 0. \qquad (7.87)$$

Из (7.87) следует при $l < b$, что $K^{\max}_{\omega_*\theta_*} = (\sigma_{xx} + \sigma_{xx}^{нг})\sqrt{\pi l}$. При $\sigma_l = \sigma_{xx}$, $q = 1$ предельное состояние определяется условием (см. (7.84))

$$\sigma_{xx} = \sigma_p / n_{x_0}, \qquad (7.88)$$

где $n_{x_0} \geqslant 1$ характеризует влияние острого концентратора в сочетании с остаточными напряжениями:

$$n_{x_0} = \frac{\bar\sigma_{xx}^{нг} + \sqrt{1 + K_0^2 - (\bar\sigma_{xx}^{нг})^2}}{K_0^2 - (\bar\sigma_{xx}^{нг})^2}; \quad \bar\sigma_{xx}^{нг} = \frac{\sigma_{xx}^{нг}}{\sigma_p}; \quad K_0 = \frac{K_c}{\sigma_p\sqrt{\pi l}}. \qquad (7.89)$$

В табл. 7.21 приведены значения n_{x_0}, рассчитанные по (7.89), в зависимости от $\sigma_{xx}^{нг}$ и K_0^2. Видно, что с увеличением параметра K_0 снижается чувствительность сварного соединения к трещинообразному концентратору и уменьшается влияние остаточных сварочных напряжений, иными словами, увеличение вязкости материала, снижение его прочности и уменьшение размеров дефекта обусловливают снижение влияния остаточных напряжений на предельную статическую нагрузку при наличии острых концентраторов.

В отсутствие острых концентраторов влияние остаточных сварочных напряжений на сопротивление разрушению при статическом нагружении проявляется весьма редко, поскольку они, как правило, успевают существенно релаксировать еще до разрушения. Тем не менее можно указать случаи, когда релаксация остаточных напряжений не происходит не-

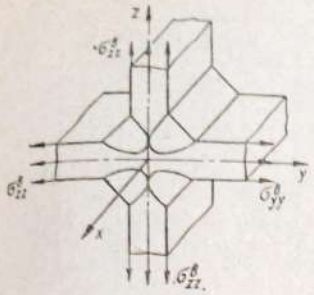


Рис. 7.62. Нагружение массивного крестового соединения, в котором реализуется объемное напряженное состояние.

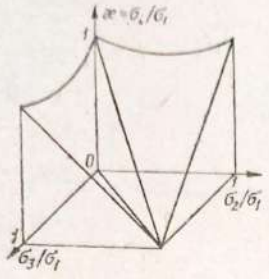


Рис. 7.63. Зависимость $\varkappa = \sigma_i/\sigma_1$ от отношений σ_2/σ_1 и σ_3/σ_1.

смотря на высокий уровень суммарных напряжений. Это, во-первых, случаи низкой пластичности материала, когда $\sigma_в \approx \sigma_т \approx S_к$, что наблюдается для некоторых материалов при очень низких температурах. Во-вторых, это случаи объемного суммарного (остаточные напряжения σ^r_{ij} и напряжения от внешней нагрузки σ^b_{ij}) напряженного состояния, когда для тензора $\sigma_{ij} = \sigma^r_{ij} + \sigma^b_{ij}$ интенсивность напряжений $\sigma_i < \sigma_т$, а максимальные главные напряжения $\sigma_1 > S_к$. В качестве примера на рис. 7.62 показано крестовое соединение толстостенных элементов, нагруженных вдоль осей x, y, z внешней нагрузкой $\sigma^в_{xx}$, $\sigma^в_{yy}$, $\sigma^в_{zz}$ и остаточными напряжениями σ^r_{xx}, σ^r_{yy}, σ^r_{zz}. Полагая, что направления x, y, z в центре соединения можно принять в качестве главных, получаем

$$\sigma_1 = \sigma^в_{xx} + \sigma^r_{xx}, \quad \sigma_2 = \sigma^в_{yy} + \sigma^r_{yy}, \quad \sigma_3 = \sigma^в_{zz} + \sigma^r_{zz}.$$

Соответственно

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]} = \sigma_1 \varkappa;$$

$$\varkappa = \sqrt{\frac{1}{2}[(1 - \sigma_2/\sigma_1)^2 + (1 - \sigma_3/\sigma_1) + (\sigma_2/\sigma_1 - \sigma_3/\sigma_1)]}$$

— характеристика степени объемности напряженного состояния. На рис. 7.63 приведена зависимость $\varkappa$ от σ_2/σ_1 и σ_3/σ_1. В точке $\sigma_2/\sigma_1 = \sigma_3/\sigma_1 = 1$ значение $\varkappa = 0$, в плоскостях $\sigma_2/\sigma_1 = 1$, $\sigma_3/\sigma_1 = 1$, $\sigma_2/\sigma_1 = \sigma_3/\sigma_1$ значение $\varkappa$ изменяется по линейному закону от 0 до 1.

Если $\sigma_1 \varkappa < \sigma_т$, то пластическое течение исключается независимо от значения σ_1. Следовательно, если нагружать соединение возрастающими нагрузками $\sigma^в_{xx}$, $\sigma^в_{yy}$, $\sigma^в_{zz}$ таким образом, чтобы $\sigma_1 \varkappa < \sigma_т$, то релаксации остаточных сварочных напряжений не будет до разрушения при

$$\sigma^в_{xx} = S_к - \sigma^r_{xx}. \qquad (7.90)$$

Таблица 7.21. Значения $n_{\varkappa_0}$ (7.89)

K_0^2	$\sigma^{нг}_{xx}$			
	0	0,1	0,2	0,3
10	1,05	1,06	1,07	1,08
2	1,22	1,28	1,34	1,42
1,0	1,41	1,52	1,67	1,85
0,5	1,78	1,97	2,20	2,78
0,25	2,24	2,74	3,57	5,14
0,125	3,00	4,12	6,68	19,10
0,0625	4,12	6,78	20,10	—

Здесь видно влияние остаточных сварочных напряжений, но такой случай — достаточно редкое явление в реальных конструкциях.

7.9. СЛОИСТОЕ РАЗРУШЕНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Наиболее часто слоистые трещины возникают в основном металле вблизи сварных швов. Они могут появляться и развиваться при сварке или непосредственно после ее окончания под воздействием термопластических деформаций и остаточных напряжений в результате их перераспределения; при монтаже и эксплуатации сварных конструкций в условиях статического и циклического нагружения, когда материал работает в z-направлении.

Траектория слоистых трещин имеет специфическую ступенчатую форму (рис. 7.64). Преобладают прямые участки, параллельные поверхности проката, которые чередуются с более короткими разрывами, перпендикулярными к этой поверхности. Иногда слоистые разрушения начинаются от непроваров и других дефектов сварного шва, расположенных вблизи околошовной зоны и создающих концентрацию термопластических деформаций.

Известно, что механические свойства металла (стального проката) в направлении толщины (z-направлении) существенно отличаются от свойств в плоскости листа. Однако если анизотропия механических свойств в плоскости листа отражена в стандартизованных методах сдаточных испытаний проката, то низкие механические характеристики в z-направлении долгое время не учитывались в связи с использованием клепаных и болтовых соединений, в которых непосредственная передача усилий в направлении толщины элементов конструкций практически исключалась. Это положение не изменилось и после того, как на смену клепаным соединениям пришли сварные, хотя термомеханический цикл сварки вызывает появление растягивающих напряжений в z-направлении уже на стадии изготовления, а конструктивные решения крестообразных и тавровых соединений обусловливают непосредственную передачу эксплуатационных усилий в направлении толщины проката. Это сказывается на технологической и эксплуатационной прочности сварных соединений и узлов. Однако долгое время специфические технологические трещины и разрушения не связывали с анизотропией свойств металлопроката в направлении толщины.

Участившиеся (по мере возрастания толщин элементов, объемов сварочных работ и использования сталей повышенной прочности) случаи образования характерных трещин при сварке заставили исследовать причины их возникновения [57—61 и др.]. Полученные экспериментальные данные показали, что решающим фактором появления слоистых (ламелярных) трещин является известная, но не в полной мере учитываемая в инженерной практике анизотропия стали этого проката, выражающаяся преимущественно в низкой пластичности в z-направлении.

При механических испытаниях конструкционной стали в z-направлении наблюдаются две разновидности слоистого растрескивания, которые в дальнейшем условно классифицируются как «высокотемпературное» и «низкотемпературное». В первом случае существенное снижение характеристик пластичности, прежде всего относительного сужения, а также максимальных значений ударной вязкости, наблюдается при нормальных и повышенных температурах. Естественно, при снижении температуры и изменении вида разрушения от слоисто-вязкого к слоисто-хрупкому значения ударной вязкости дополнительно снижаются. Однако типичным для данной стали является существенное уменьшение именно показателей пластичности и вязкости при положительных температурах по сравнению с аналогичными характеристиками, полученными при испытании образцов, ориентированных параллельно плоскости прокатки (рис. 7.65, *а*, *б*). Это связано со склонностью материала к «высокотемпературному» слоистому растрескиванию, которое может проявляться в процессе сварки, наплавки и при других технологических операциях, осуществляемых при повышенных и нормальных температурах.

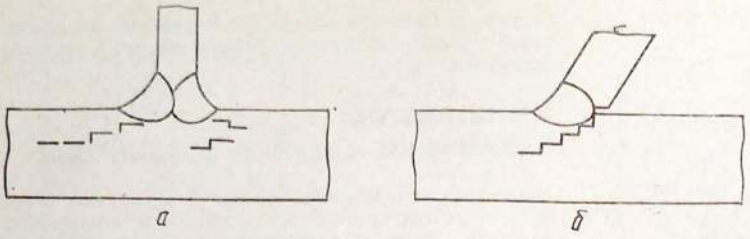


Рис. 7.64. Траектории слоистых трещин, возникших в ЗТВ (*а*) и от непровара сварного шва (*б*).

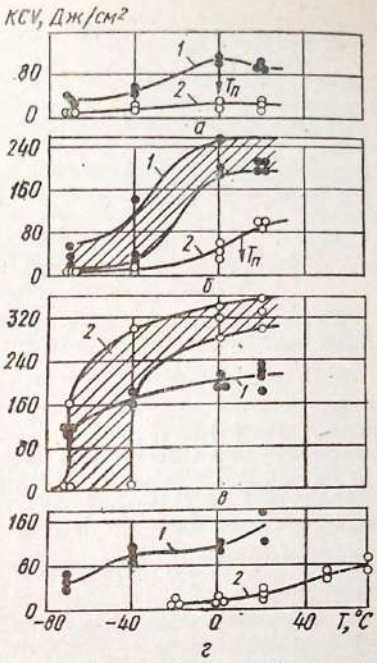


Рис. 7.65. Анизотропия механических свойств стального проката при испытании на ударную вязкость:

а, б — примеры слабовыраженной анизотропии переходной температуры $T_п$: *1* — $\psi = 63...65$ и $\psi = 65...78$ % соответственно; *2* — $\psi = 0...15$ и $\psi = 63...67$ % соответственно; *в, г* — анизотропия переходной температуры в сталях контролируемой прокатки (*1* — $\psi = 64...67$ %; *2* — $\psi = 40...50$ и $\psi = 50$ % соответственно).

Наиболее распространенной характеристикой сопротивления конструкционных сталей «высокотемпературному» слоистому растрескиванию является величина ψ_z — относительное сужение гладких образцов, вырезаемых перпендикулярно плоскости листа. Чаще всего трещины при сварке металлоконструкций возникают при значениях ψ_z, не превышающих 15 %, и практически исключаются при $\psi_z \geq 25$ % [59], хотя в лабораторных исследованиях зафиксировано возникновение слоистых трещин и при более высоких значениях ψ_z.

Стали, изготовляемые по методу контролируемой прокатки, обычно обладают достаточно высокой изотропностью при нормальных и повышенных температурах. Однако с понижением температуры характеристики вязкости разрушения в *z*-направлении резко уменьшаются, что является следствием не столько обычного перехода металла в хрупкое состояние, сколько результатом склонности металлопроката к «низкотемпературному» слоистому растрескиванию (рис. 7.65, *в, г*). Иными словами, в подобных случаях высокое значение ψ_z при нормальной температуре является необходимым, но недостаточным условием для предотвращения развития слоистых трещин в процессе эксплуатации.

Основную роль в процессе зарождения высокотемпературных слоистых и слоисто-вязких трещин играют неметаллические включения, деформированные в большей или меньшей степени при прокатке. В процессе упруго-пластического деформирования в *z*-направлении они либо растрескиваются, отслаиваясь от матрицы, либо играют роль микроконцентраторов напряжений. В дальнейшем образовавшиеся микротрещины сливаются между собой, что находит отражение в фрактографических особенностях изломов. Видны следы растрескивания либо отслаивания крупных неметаллических включений, между которыми находятся участки обычного вязкого разрушения. При пониженных температурах участки слоистого разрушения чередуются с фасетками скола.

Размеры отдельных зародышевых трещин могут достигать 1—3 мм, поскольку неметаллические включения распределяются неравномерно, оксисульфиды и сульфиды образуют клинообразные колонии в плоскости прокатки, наследующие границы первичного аустенитного зерна, а силикаты и оксиды вытянуты в строчку.

Итак, очаги зарождения «высокотемпературных» слоистых и слоисто-вязких трещин в подобных случаях связаны, в основном, с размерами и распределением неметаллических включений в материале, а их развитие определяется вязкостью разрушения металлической матрицы. В связи с этим более или менее жесткие ограничения по содержанию неметаллических включений являются необходимым, но недостаточным условием для обеспечения требуемых *z*-свойств. Текстура матрицы играет не менее существенную роль.

«Низкотемпературное» слоистое растрескивание сталей с незначительным содержанием неметаллических включений, изготовляемых по методу контролируемой прокатки, связано, в основном, с кристаллографической текстурой и ослаблением границ субзерен. В процессе прокатки при низких температурах формируется кристаллографическая текстура, уменьшающая разориентацию микротрещин скола перед фронтом магистральной хрупкой трещины, развивающейся параллельно плоскости прокатки. Соответственно вязкость разрушения в *z*-направлении резко снижается при понижении температуры и переходе от слоисто-вязкого к слоисто-хрупкому разрушению. Этому способствует ослабление границ субзерен. В этих условиях прочность крестообразных сварных соединений катастрофически падает при наличии небольших трещинообразных дефектов (непроваров) в корне шва.

С учетом этого предотвращение слоистых разрушений может быть связано прежде всего с установлением оптимальных требований к показателям вязкости разрушения материала в *z*-направлении. Это может быть сделано средствами механики разрушения подобно тому, как было описано при рассмотрении квазихрупких и вязких разрушений.

Вязкость материала должна быть достаточной, чтоы выдерживать без разрушения термопластические сварочные деформации при наличии зародышевых трещин, размеры которых соизмеримы с максимальными размерами неметаллических включений. Если форма сварного соединения не исключает появления трудноустранимых дефектов сварного шва, расположенных вблизи ЗТВ, вязкость разрушения основного металла в *z*-направлении дополнительно должна быть увеличена в соответствии с возможными размерами дефектов. Аналогично могут быть проанализированы и эксплуатационные условия, чтобы исключить развитие слоистых трещин и хрупкое разрушение.

Определенные на основе такого анализа требования к вязкости разрушения материалов в *z*-направлении могут быть представлены либо непосредственно в нормативных значениях характеристик механики разрушения, либо в соответствующих характеристиках ударной вязкости образцов Шарпи.

Наряду с обеспечением необходимых свойств металла для предотвращения слоистых разрушений могут достаточно эффективно использоваться технологические приемы, призванные уменьшить термопластические сварочные деформации в *z*-направлении: наплавка на поверхность материала тонкого облицовочного слоя, имеющего несколько более низкий, чем у основного металла, предел текучести; закрепление свариваемых элементов, а также применение конструктивно-технологических решений, по возможности исключающих сварку в жестком контуре.

ГЛАВА 8

ПРОЧНОСТЬ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

Значительная часть повреждений строительных металлоконструкций вызывается усталостью сварных соединений, испытывающих воздействие нагрузок, переменных во времени. Доля усталостных разрушений продолжает расти, составляя примерно 30 % общего числа преждевременных повреждений и отказов сварных металлоконструкций.

Основные положения прочности и долговечности металлов при переменных нагрузках остаются справедливыми и в отношении сварных соединений. Вместе с тем последним свойственны такие специфические особенности, как характерная форма соединений и швов, неоднородность механических свойств, возможность возникновения при сварке технологических дефектов, высокие остаточные деформации и напряжения. Влиянию этих факторов на долговечность сварных соединений в связи с условиями нагружения и стадийностью процесса усталостного разрушения ниже уделено основное внимание. Более кратко излагаются общие представления о явлении усталости и сопротивления металлов воздействию переменных нагрузок.

8.1. ПЕРЕМЕННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Многие сварные конструкции испытывают воздействие большого числа перемен временных нагрузок: перемещающихся или перевозимых грузов, волн, ветра, грунта и т. д. Возникающая при этом переменность напряжений тех или иных элементов конструкции может вызвать их разрушение от усталости. Наиболее часто усталостные трещины зарождаются в сварных соединениях.

Усталость материалов и сварных соединений — процесс многостадийный. Он начинается с постепенного накопления необратимых физико-механических изменений в материале, которые вызывают образование микротрещин. Затем некоторые из них при своем дальнейшем развитии образуют макротрещину. Макротрещина на определенной стадии своего распространения вызывает полное разрушение изделия, элемента конструкции или испытываемого образца.

Вопросы природы и теории усталости материалов нашли достаточно полное отражение в известных монографиях и сборниках [1—7 и др.].

Усталостное разрушение отличается от статического рядом характерных особенностей. Оно может вызываться невысокими напряжениями, составляющими примерно половину статической прочности. При знакопеременных напряжениях разрушающие напряжения уменьшаются еще больше. Внешний вид усталостного разрушения также существенно отличается от разрыва, вызванного статическим приложением нагрузки. Усталостное разрушение обычно начинается с поверхности металла и происходит без видимой предшествующей макропластической деформации; следы ее обнаруживаются лишь в отдельных зернах. По своей внезапности и опасности усталостное разрушение сопоставимо только с мгновенным хрупким. В усталостном изломе выделяют три основные зоны: чисто усталостную, характеризующуюся наличием усталостных макро- и микрополос, наблюдаемых в электронном микроскопе; зону смешанного разрушения (как результат локальных разрушений впереди трещины), имеющую хрупкие участки и усталостные полосы, и зону долома.

В отличие от статического разрушения изделия усталостное весьма чувствительно к состоянию поверхности металла, концентрации напряжений, остаточным напряжениям. Царапины, трещины, риски от резца, ожоги от сварочной дуги, коррозионные повреждения существенно изменяют сопротивление усталости материала. Резкие изменения сечения элемента, различного рода выкружки, отверстия, переходы сварных швов на основной металл, дефекты металла швов — потенциальные места преждевременного зарождения усталостных трещин.

Характеристики сопротивления усталости. Кривая усталости. Сопротивление усталости данного материала или сварного соединения зависит прежде всего от характера изменения напряжений во времени и возможного сочетания статических и переменных напряжений. Чаще всего изучение закономерностей изменения сопротивления усталости под влиянием различных факторов проводится при синусоидальном цикле напряжений или деформаций. Синусоидальный цикл может быть симметричным, отнулевым, асимметричным, в общем случае — знакопеременным или знакопостоянным. Общепринятые буквенные обозначения его параметров и их взаимосвязь приведены в соответствующем ГОСТе [8]. Отношение минимального напряжения (или деформации) цикла к максимальному характеризует асимметрию цикла и выражается через коэффициент асимметрии цикла напряжений $R_\sigma = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ ($R_\varepsilon = \varepsilon_{min}/\varepsilon_{max}$). Под размахом напряжений (или деформаций) понимается алгебраическая разность максимального и минимального напряжений (деформаций) цикла $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}$). Средние значения ($\sigma_m$, ε_m) и амплитуды (σ_a, ε_a) напряжений (деформаций) цикла выражаются соотношениями: $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$; $\varepsilon_m = (\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min})/2$ и $\sigma_a = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/2$; $\varepsilon_a = (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min})/2$.

Одним из основных показателей сопротивления усталости является циклическая долговечность N — число циклов напряжений или деформаций, выдержанных нагружаемым объектом (образцом, элементом, изделием) до образования усталостной трещины определенных размеров (протяженности, глубины) или до полного усталостного разрушения. Связь между максимальными напряжениями (деформациями) цикла (σ_{max}, ε_{max}) или же размахами напряжений (деформаций) ($2\sigma_a$, $2\varepsilon_a$) и циклической долговечностью, установленная по параметру среднего напряжения цикла (т. е. при $\sigma_m = \text{const}$) или по параметру коэффициента асимметрии цикла напряжений ($R_\sigma = \text{const}$) и отраженная графически, представляет собой кривую усталости (рис. 8.1). Кривая усталости (или кривая Велера) является основной характеристикой сопротивления материала или сварного соединения воздействию переменных напряжений.

При сравнительно низких уровнях напряжений образование макротрещин и полное разрушение образцов происходит после весьма большого числа перемен нагрузок, вплоть

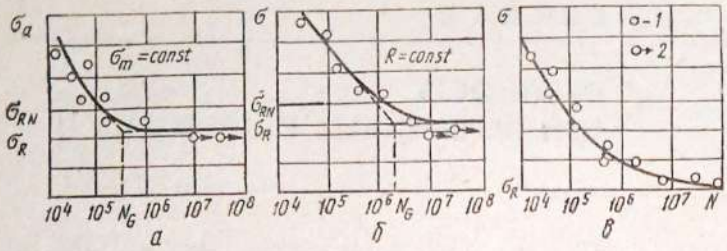


Рис. 8.1. Кривые усталости (схемы):

1 — результаты испытаний однотипных образцов, отвечающие максимальным по абсолютным значениям, напряжениям цикла; *2* — неразрушившийся образец прошедший заданную базу испытаний.

до 10^7 — 10^8 циклов и более. Эта область называется многоцикловой. Принято считать, что она начинается от $5 \cdot 10^4$ циклов перемен напряжений. В районе $1{,}5 \cdot (10^6 \ldots 10^7)$ циклов кривая усталости большинства сталей и сварных соединений начинает переходить в горизонталь. В полулогарифмических координатах (σ, lg N) или логарифмических (lg σ, lg N) кривую усталости обычно аппроксимируют двумя отрезками прямых: одним крутопадающим, другим — горизонтальным. Абсцисса точки их пересечения обозначается N_G и называется точкой перелома кривой усталости.

Напряжение σ_R, отвечающее горизонтальному участку кривой усталости, служит важнейшим ее параметром — пределом выносливости. Напряжения ниже σ_R не приводят к усталостному разрушению при сколь угодно большом числе циклов нагружения. Следует, однако, иметь в виду, что при испытании сталей и сварных соединений в коррозионной среде или же при высоких температурах, а для ряда сплавов и при нормальной температуре кривые усталости понижаются непрерывно (см. рис. 8.1, *в*). В этой связи наиболее точно предел выносливости определяется как максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, при котором еще не происходит усталостное разрушение до базы испытания. Под базой испытания понимается предварительно задаваемая наибольшая продолжительность испытаний на усталость [8]. Максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, соответствующее задаваемой циклической долговечности на крутопадающем участке кривой усталости (σ_{RN}), носит название предела ограниченной выносливости, а максимальное и минимальное напряжения цикла, соответствующие пределу выносливости,— предельных напряжений цикла.

Во всем диапазоне многоцикловой области (т. е. при $N > 5 \cdot 10^4$) пределы ограниченной выносливости σ_{RN}, как и предел выносливости σ_R, выражаются в номинальных напряжениях. Область нагружения, отвечающая числам циклов $N < 5 \cdot 10^4$ и высоким уровням деформаций, носит название малоцикловой. В этой области в качестве основных расчетных характеристик используются деформации — их пластические и упругие составляющие.

Для аналитического описания кривых усталости материалов и сварных соединений используется ряд уравнений [9—11]. В основе их лежат либо некоторые гипотетические предпосылки, либо результаты обработки экспериментальных данных. В том и другом случаях основным показателем пригодности уравнений является точность аппроксимации ими результатов усталостных испытаний. Помимо описания результатов испытаний уравнения кривых усталости применяются в расчетах на усталость для экстраполяционного определения пределов выносливости и построения полных вероятностных диаграмм усталости сварных соединений по результатам испытания образцов в области ограниченной долговечности.

Для расчета металлоконструкций широкое распространение получило двухпараметрическое степенное уравнение

$$\sigma^m N = \sigma_R^m N_G, \qquad (8.1)$$

где m — показатель наклона крутопадающего участка кривой усталости; N_G — долговечность, отвечающая точке перелома кривой (см. рис. 8.1, *а*, *б*).

Значение N_G в ряде случаев принимается равным $2 \cdot 10^6$ циклов. Следует отметить, что пренебрежение асимптотическим характером перехода крутопадающего участка к горизонтальному может вносить заметную погрешность в расчетное значение предела выносливости σ_R. Результаты получаются более достоверными [11, 12] при использовании трехпараметрического уравнения, которое имеет горизонтальную асимптоту $\sigma = \sigma_R$ [13, 14]:

$$\sigma = \sigma_R e^{\frac{A}{N+B}}. \qquad (8.2)$$

Уравнение (8.2) достаточно аппроксимирует результаты испытаний сварных соединений в многоцикловой области (при $N > 5 \cdot 10^4$) и рекомендуется для экстраполяционного определения характеристик сопротивления усталости в их вероятностной трактовке, а также для использования в расчетах на усталость сварных конструкций, работающих при случайных режимах нагружения.

Полная вероятностная диаграмма усталости. Для всех усталостных испытаний характерно существенное рассеяние получаемых результатов. При испытании в одинаковых условиях на одном уровне нагружения совершенно идентичных гладких шлифованных образцов отношение наибольшего числа выдержанных циклов нагружения к наименьшему может доходить до 10, а в ряде случаев и более, особенно при напряжениях, близких к пределу выносливости [15]. Объяснение этому следует искать в структурной и механической неоднородности конструкционных материалов, неравномерности микродефектов и микронапряжений по объему образца, т. е. в самой природе усталостного разрушения. Все это приводит в необходимости подвергать результаты усталостных испытаний соответствующей статистической обработке, конечной целью которой является установление функции распределения предела выносливости. Искомую функцию распределения предела выносливости определяют из полной вероятностной диаграммы усталости, которая отображает на плоскости трехмерную корреляционную взаимосвязь между напряжениями, долговечностью и вероятностью разрушения образцов [8]. Изображают ее в каждом из трех квадрантов соответствующим семейством кривых: равной вероятности усталостного разрушения, распределения циклической долговечности и распределения пределов выносливости (рис. 8.2).

Диаграмма предельных напряжений цикла (диаграмма Смита). Зависимости пределов выносливости (или пределов ограниченной выносливости) от среднего напряжения цикла, коэффициента асимметрии цикла; предельных амплитуд цикла от среднего напряжения цикла и т. п. устанавливаются экспериментальным путем и выражаются обычно графическим способом. Применительно к сварным металлоконструкциям наибольшее распространение получила диаграмма предельных напряжений цикла (рис. 8.3), отражающая зависимость между значениями предельных напряжений σ_{max}, σ_{min} и значениями средних напряжений цикла σ_m.

По оси ординат диаграммы откладывают значения предельных максимальных и минимальных напряжений цикла σ_{max} и σ_{min}, а по оси абсцисс — соответствующие средние напряжения цикла σ_m; на схематизированной диаграмме это точки A и A', B и B', C и C', D и D'. Соединяя их, получают ветви диаграммы предельных напряжений, которые сходятся в точке F, отвечающей прочности при однократном статическом нагружении. Часто строят только верхнюю ветвь диаграммы, которая характеризует зависимость пределов вы-

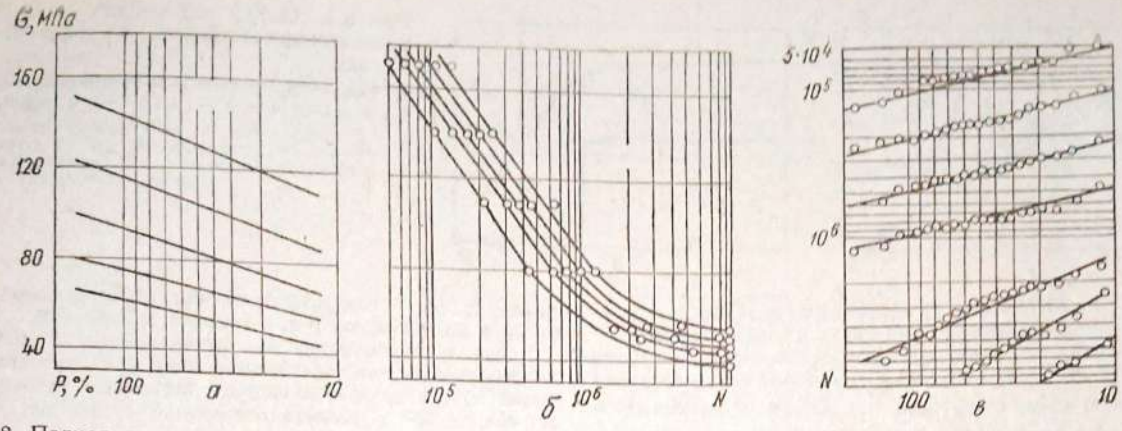


Рис. 8.2. Полная вероятностная диаграмма усталости образцов с угловыми швами:
а — N = const; *б* — P = const; *в* — σ = const.

носливости σ_R (или σ_{RN}) от среднего напряжения цикла σ_m. Точки, лежащие ниже кривой $ABCDEF$, характеризуют те сочетания напряжений σ_m и σ_{max}, которые не вызывают разрушения образцов до базового числа циклов $N_б$. Выше кривой $ABCDEF$ разрушение происходит при $N < N_б$.

Соответственные точки A и A', B и B', C и C' равноудалены от луча OF, проведенного из начала координат под углом 45°. Ординатами этого луча являются средние напряжения цикла. Расстояния между ветвями диаграммы равны предельным размахам напряжений, а отрезки по вертикали между лучом OF и ветвью диаграммы — предельным амплитудам цикла. Луч, проходящий через начало координат диаграммы, является геометрическим местом точек, характеризующих циклы с одинаковыми коэффициентами R_σ.

Построение диаграммы можно выполнить различными способами. Если имеются заранее построенные кривые усталости, отвечающие различным значениям R_σ (или σ_m), то установленные при этом значения пределов выносливости (или пределов ограниченной выносливости) наносят на диаграмму (это точки A, B, C, D на схематизированном графике). Предельное значение σ_{min} (для нанесения точек A', B', C', D') получают путем умножения σ_{max} на коэффициент асимметрии цикла R_σ. При статическом нагружении в качестве предельного состояния обычно принимают предел текучести материала. Поэтому верхнюю область диаграммы ограничивают от-

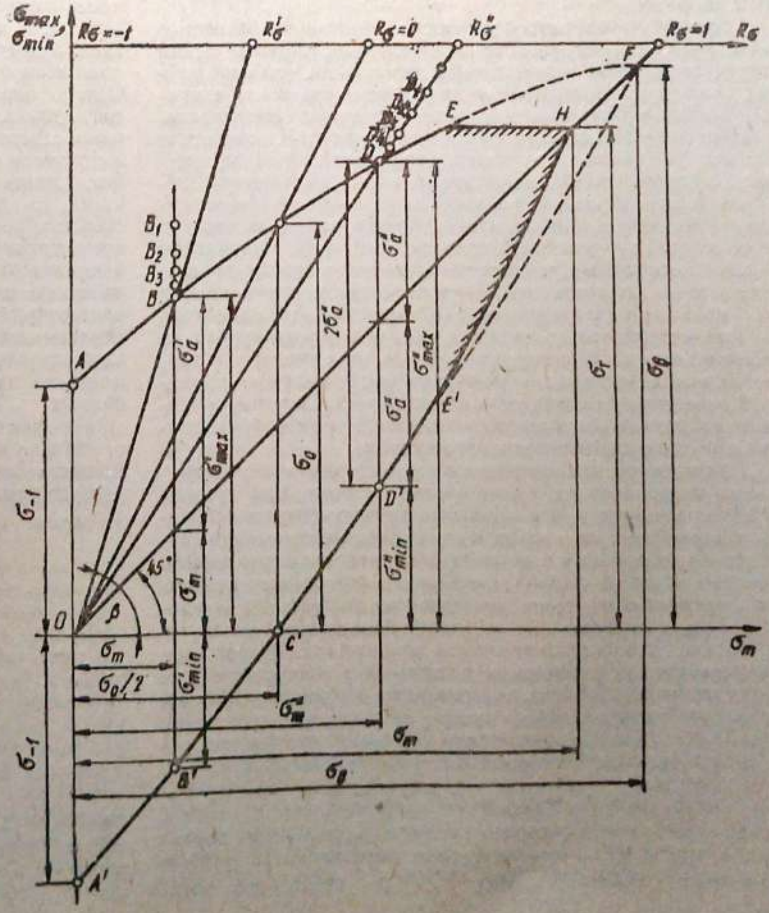


Рис. 8.3. Диаграмма предельных напряжений цикла для сталей.

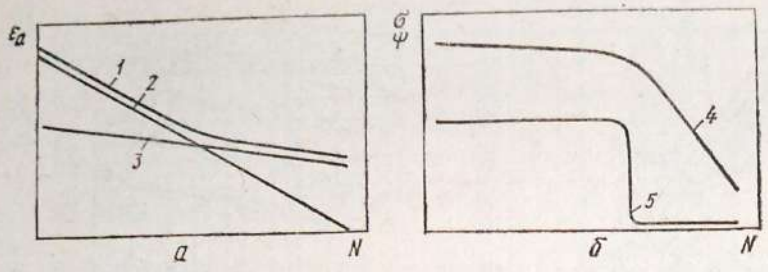


Рис. 8.4. Общий вид кривых малоцикловой усталости при жестком (*а*) и мягком (*б*) нагружениях:
1 — $\varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = f(N)$; *2* — $\varepsilon_{ap} = f_1(N)$; *3* — $\varepsilon_{ae} = f_2(N)$; *4* — $\sigma = f(N)$; *5* — $\psi = f(N)$.

резками EH и $E'H$. Без предварительного построения отдельных кривых усталости значения амплитуд каждого испытанного образца σ_a откладывают непосредственно на диаграмме от луча OF по вертикали, абсцисса которой равна среднему напряжению цикла (например, σ'_m). Таким образом получают точки B_1, B_2, B_3, отвечающие разрушенным образцам, и точку B, характеризующую амплитуду σ'_a, при которой не наблюдалось разрушения образцов до заданной базы испытаний при среднем напряжении цикла σ'_m.

При другом способе испытаний, основанном на сохранении неизменным значения коэффициента асимметрии цикла нап ример, R''_σ), точки, отвечающие максимальным напряжениям цикла σ_{max} (D_1, D_2, ..., D), наносятся на луч R''_σ. Диаграммы, построенные описанными способами, не отличаются друг от друга.

Известно, что сварочные остаточные напряжения при определенных условиях оказывают существенное влияние на сопротивление усталости сварных соединений. При учете их влияния заметно меняется и характер диаграммы предельных напряжений.

Кривые малоцикловой усталости. Основной особенностью малоциклового нагружения является упруго-пластический характер развития напряжений и деформаций, особенно в зонах их концентрации. Нелинейная зависимость между напряжениями и деформациями за пределом текучести материалов, а также нестабильностьих циклических упруго-пластических свойств усложняют получение представительных характеристик сопротивления деформированию и разрушению образцов в рассматриваемой области нагружения. В общем случае испытания в малоцикловой области выполняются при двух режимах — мягком и жестком (рис. 8.4). При мягком режиме нагружения неизменными по числу циклов поддерживаются в процессе испытания образцов максимальные и минимальные напряжения. В таких условиях нестабильность свойств материалов проявляется в поцикловом изменении их деформационных характеристик. В условиях жесткого нагружения определяющими параметрами цикла являются максимальные и минимальные деформации образца, которые в процессе испытаний остаются постоянными. Поцикловое изменение при этом претерпевают напряжения.

Характеристики сопротивления малоцикловому разрушению материалов исследуют преимущественно при жестком режиме нагружения, что в большей степени отвечает условиям деформирования в зонах концентрации напряжений, накопление деформаций в которых сдерживается окружающим упругим объемом образца. Особенности проведения испытаний, связанные со стеснением развития деформаций, приводят к тому, что при жестком режиме нагружения реализуется только усталостный механизм разрушения. Результаты, получаемые при проведении испытаний в жестком режиме нагружения, графически представляют в виде зависимостей амплитуда деформаций — число циклов до разрушения (рис. 8.4, *а*). При аналитическом описании получаемых результатов используются обычно степенные зависимости:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = C_e N^{m_e} + C_p N^{m_p}, \qquad (8.3)$$

где ε_a — амплитуда суммарной упруго-пластической деформации (ε_{ae} и ε_{ap} — соответственно амплитуды упругой и пластической составляющих); C_e, C_p — постоянные материала; m_e, m_p — показатели степени соответственно для упругой и пластической составляющих деформации.

Для долговечностей, не превышающих $5 \cdot 10^3 - 10^4$ циклов нагружения, результаты испытаний достаточно надежно описываются одночленным степенным уравнением с использованием в качестве параметра суммарной упруго-пластической деформации:

$$\varepsilon_e N^{m_t} = C_t, \qquad (8.4)$$

где C_t, m_t — экспериментально определяемые константы материала.

Кривые усталости, отвечающие испытанию при мягком режиме нагружения, графически представляют в виде зависимостей номинальные напряжения или относительное сужение — число циклов до разрушения (рис. 8.4, *б*). Они позволяют оценить в целом несущую способность конструктивного элемента в области малых долговечностей с учетом влияния конструктивных и технологических факторов.

Диаграмма усталостного разрушения. Стадия развития трещины является завершающей в процессе усталостного разрушения. Она определяет живучесть конструкции и поэтому имеет важное практическое значение. Кривые усталости и диаграммы предельных напряжений, построенные по результатам испытаний образцов до их полного разрушения, не позволяют оценить количественно стадию развития трещины. Однако они могут служить основными характеристиками сопротивления зарождению видимой трещины, если критерием завершения усталостных испытаний служит момент достижения трещиной определенного небольшого размера (протяженности или глубины). Что же касается стадии развития, то для нее более характерным показателем является скорость роста усталостной трещины dl/dN — отношение приращения длины трещины к приращению числа перемен напряжений. Установление зависимости между dl/dN и ΔK — размахом коэффициента интенсивности напряжений, характеризующего поле напряжений у вершины трещины при упругом напряженно-деформированном состоянии, составляет основную цель испытаний материалов и сварных соединений на циклическую трещиностойкость в многоцикловой области.

График зависимости скорости роста усталостной трещины от размаха или максимального значения коэффициента интенсивности напряжений называется диаграммой усталостного разрушения материала. Построение обычно выполняют в

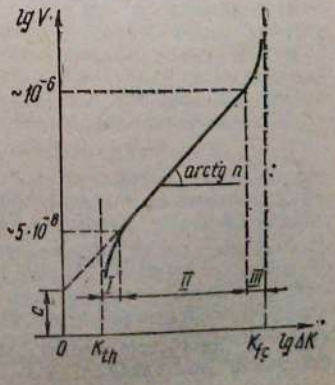


Рис. 8.5. Полная кинетическая диаграмма усталостного разрушения для сталей и сплавов.

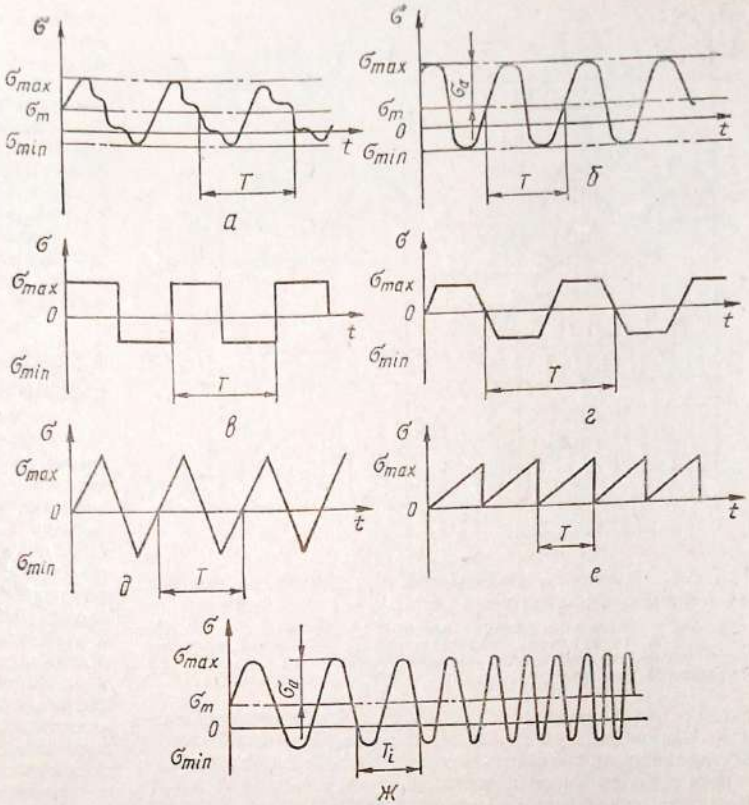


Рис. 8.6. Изменение напряжений при регулярном нагружении:

а — в общем случае; *б* — синусоидально; *в* — прямоугольное; *г* — трапецеидальное; *д* — треугольное; *е* — пилообразное; *ж* — квазигармоническое с непрерывным изменением частоты.

логарифмических координатах и получают в большинстве случаев *S*-образную кривую (рис. 8.5), которая асимптотически приближается к обоим граничным условиям распространения трещины. Диаграмма охватывает весь диапазон изменения скорости развития трещины от нуля до критического значения, соответствующего окончательному разрушению. Она имеет три наиболее характерных участка: припороговый ($0 < dl/dN < 5 \cdot 10^{-8}$ м/цикл) (*I*), линейный участок стабильного роста трещины ($5 \cdot 10^{-8} < dl/dN < 10^{-6}$ м/цикл) (*II*) и участок нестабильного роста трещины ($dl/dN > 10^{-6}$ м/цикл) (*III*). При этом основными характеристиками циклической трещиностойкости материала служат размахи порогового ΔK_{th} и критического ΔK_{fc} коэффициентов интенсивности напряжений, а также параметры C и m степенной зависимости Пэриса, описывающей линейный участок [16],

$$dl/dN = C\,(\Delta K)^m. \qquad (8.5)$$

Значения ΔK_{th} и ΔK_{fc} устанавливают экспериментально [17]. Постоянные C и m уравнения (8.5) определяются методами регрессионного анализа и физического смысла не имеют.

Переменные нагрузки. Циклическая долговечность конструкций предопределяется характером периодически повторяющихся и непрерывно изменяющихся во времени нагрузок. Значение, повторяемость и закон изменения действующих переменных нагрузок характеризуют режим нагружения конструкции. Но при этом следует иметь в виду, что при одной и той же нагрузке характер изменения напряжений в разных элементах конструкции может существенно различаться [8]. Это может объясняться особенностями передачи нагрузки на конструкцию и взаимным влиянием элементов при наличии связей между ними. Поэтому для оценки сопротивления усталости необходимо знать не только действующие переменные нагрузки, но и правильно определить реакцию на них отдельных элементов конструкции. Следовательно, и сопротивление усталости сварных соединений определяется не нагруженностью конструкции в целом, а нагруженностью элемента, в составе которого работает рассматриваемое соединение. Режим нагружения соединения должен определяться значением, повторяемостью и законом изменения переменных напряжений, возникающих в данном конкретном элементе конструкции.

Регулярный режим нагружения. Регулярным называется такое нагружение, которое характеризуется периодическим законом изменения нагрузок с одним максимумом и одним минимумом в течение одного периода T при постоянстве параметров цикла напряжения в течение всего времени испытаний или эксплуатации (рис. 8.6, *а*). Сопротивление усталости материалов и элементов конструкций исследуется обычно при регулярном синусоидальном нагружении образцов (рис. 8.6, *б*). Однако в чистом виде такой режим эксплуатационного нагружения встречается сравнительно редко. Наряду с синусоидальным существуют и другие режимы регулярного нагружения. При экспериментальных исследованиях они могут моделироваться регулярным нагружением с треугольным, трапецеидальным, прямоугольным и пилообразным циклами изменения нагрузки (рис. 8.6, *в*, *г*, *д*, *е*). Из практических случаев регулярного нагружения наиболее близко к синусоидальному квазигармоническое нагружение с непрерывным изменением частоты. Внешне изменение напряжений, возникающих при этом виде нагружения, как и при синусоидальном, выглядит достаточно просто и характеризуется постоянством амплитуды σ_a и среднего напряжения σ_m (рис. 8.6, *ж*).

Регулярное нагруженне является наиболее изученным. Все другие виды нагружения обычно рассматриваются как воздействие совокупности циклов регулярного нагружения.

Периодическое нагружение — нагруженне, характеризующееся периодическим изменением нагрузки. В ряде случаев периодическое нагружение конструкций может быть обусловлено суммарным воздействием двух синусоидальных режимов с кратными частотами. Изменение результирующего воздействия существенно зависит от соотношения амплитуд и частот слагающих гармоник и из регулярного может превра-

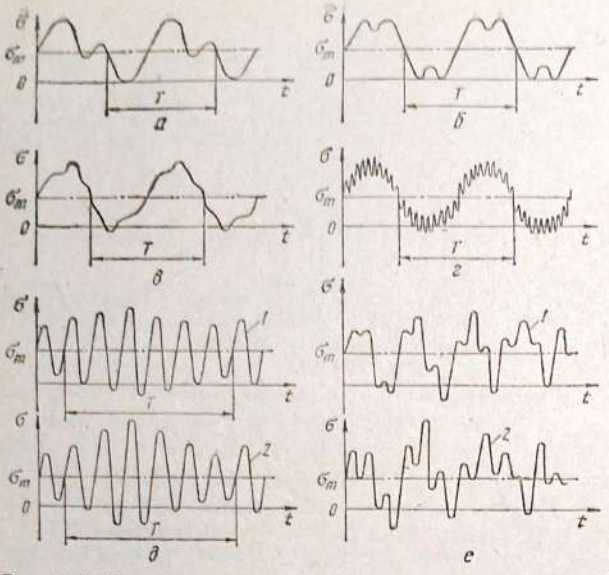


Рис. 8.7. Изменение напряжений в элементах конструкций при периодическом нагружении:

а, б, в, г — сложение двух гармоник с соотношением частот 1 : 2; 1 : 3; 1 : 4; 1 : 10 соответственно; *д, е* — сложение колебаний с отношением частот, примерно равным 1 : 1 и 1 : 3, при отношениях амплитуд 0,2 (кривая *1*) и 0,5 (кривая *2*).

титься в периодическое. На рис. 8.7, *а, б, в, г* показаны примеры сложения двух гармоник при амплитуде низкочастотных колебаний, значительно превышающей амплитуду гармоники с более высокой частотой. Отклонение, даже незначительное, соотношения частот двух складываемых гармоник от кратного может приводить к сильному усложнению закономерностей изменения результирующих напряжений. Еще более заметны искажения колебаний при других нецелочисленных соотношениях частот. Когда отношение частот слагаемых гармоник выражается иррациональным числом, результирующее нагружение перестает быть периодическим.

Случайное нагружение. Нагружение, при котором закон изменения нагрузки во времени является случайным процессом, называется случайным. В соответствии с теорией случайных процессов все реальные режимы переменного нагружения металлических конструкций принято разделять на два самостоятельных класса — случайные стационарные и случайные нестационарные. Априорно под случайным стационарным режимом нагружения понимают такой режим, вероятностно-статистические параметры которого не изменяются со временем. Случайным нестационарным называется режим нагружения с изменяющимися во времени вероятностно-статистическими параметрами. Для учета случайных режимов нагружения при оценке сопротивления усталости элементов конструкций необходимо, во-первых, установить, какие из его вероятностных параметров достаточно полно характеризуют процесс применительно к решению рассматриваемой задачи, и, во-вторых, определить значения этих параметров. Так, например, для учета случайных режимов нагружения в расчетах на усталость важно правильно установить величину и повторяемость переменных напряжений. В процессе экспериментального исследования влияния различных режимов нагружения на сопротивление усталости образцов может возникнуть необходимость и в соблюдении последовательности чередования циклов нагружения.

При решении большинства практических задач в качестве моделей реальных режимов нагружения принимаются случайные стационарные процессы. При этом обычно оцениваются среднее значение и дисперсия переменной составляющей, корреляционная функция, функция спектральной плотности, плотность распределения вероятностей и статистики, характеризующие число пересечений среднего уровня.

Случайные нестационарные режимы нагружения более сложны в описании. Для их характеристики требуется значительно больше исходных данных, чем для стационарных. В инженерных расчетах такие режимы нагружения, как правило, не рассматриваются. Вместе с тем многие металлические конструкции работают под воздействием нагрузок, которые изменяются по типу случайных нестационарных процессов. В качестве примера можно назвать нагрузки, действующие на пролетные строения мостов, величина и интенсивность которых со временем возрастают. Случайные нестационарные режимы нагружения характерны также для конструкций антенно-мачтовых сооружений, башен, высотных труб, морских глубоководных платформ, испытывающих воздействие ветра или морских волн. В ряде случаев такой режим удается представить в виде квазистационарного ступенчатого процесса.

8.2. РОЛЬ ФАКТОРОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ СВАРКОЙ

Сопротивление усталости металлов и сплавов определяется преимущественно их механическими свойствами, характером изменения напряжений во времени, концентрацией деформаций и напряжений, абсолютными размерами сечений и окружающей средой. Рассмотрению влияния этих факторов на усталостную долговечность материалов посвящены многие фундаментальные работы [9, 10, 15, 18—22 и др.]. Установленные общие закономерности справедливы и для сварных соединений. Вместе с тем помимо концентрации напряжений, обусловленной формой соединения и технологическими дефектами, сварка вызывает изменение свойств металла в зоне термического влияния и порождает высокие остаточные напряжения. В этой связи рассмотрение вопросов сопротивления усталости соединений целесообразно начать с выяснения роли концентрации напряжений, неоднородности механических свойств и остаточных сварочных напряжений.

Концентрация напряжений и деформаций. Под концентрацией напряжений понимают местное повышение напряжений в зонах резкого изменения сечения деформируемого тела, например вблизи отверстий, вырезов, выкружек, переходов сварных швов на основной металл, дефектов металла и сварных соединений (рис.8.8). Количественно концентрация напряжений в упругой области оценивается теоретическим коэффициентом концентрации α_σ, зависящим от вида нагружения и геометрических параметров концентратора:

$$\alpha_\sigma = \sigma_к/\sigma_н = \varepsilon_к/\varepsilon_н \quad (\sigma_к < \sigma_н), \tag{8.6}$$

где $\sigma_к$ и $\varepsilon_к$ — соответственно максимальные напряжения и деформации в зоне концентрации; $\sigma_н$, $\varepsilon_н$ — номинальные напряжения и деформации.

Фактическое снижение пределов выносливости образцов или элементов конструкций под влиянием концентрации напряжений оценивается эффективным коэффициентом концентрации напряжений

$$K_\sigma = \sigma_R/\sigma_{Rк}, \tag{8.7}$$

где σ_R — предел выносливости гладкого образца; $\sigma_{Rк}$ — то же, для образца с концентратором напряжений. Для сталей и сплавов значения K_σ остаются ниже значений α_σ, тогда как для сварных соединений, вследствие влияния в основном остаточных сварочных напряжений, эффективный коэффициент

Таблица 8.1. **Ориентировочные параметры стыковых швов низколегированных сталей**

Способ сварки	ρ, мм	θ, град	*b*, мм	*h*, мм
Механизированная под флюсом	0,5	126	29	2,5
Механизированная в CO_2	0,8	144	18	2,2
Ручная	0,5	137	16	2,3
Стыковая электроконтактная	15,0	172	20	4,8

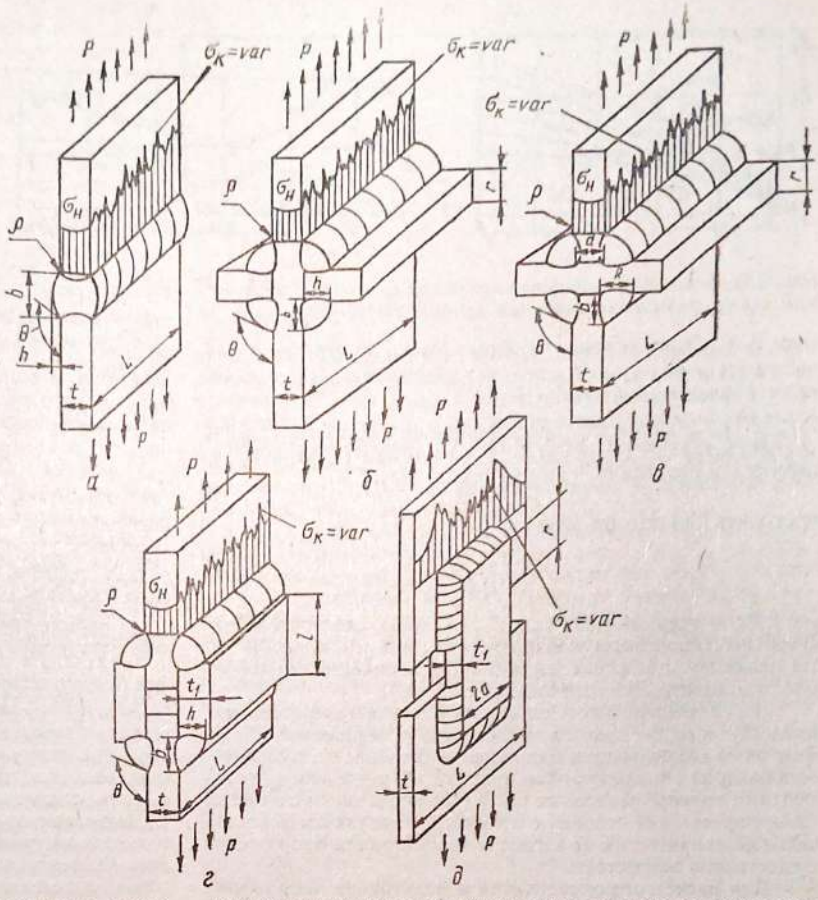


Рис. 8.8. Основные виды сварных соединений:
а — стыковое; *б* — тавровое; *в* — крестообразное; *г* — нахлесточное с лобовыми швами; *д* — нахлесточное с обваркой по контуру.

концентрации напряжений K_σ может превышать значения α_σ.

Концентрация напряжений сварных соединений определяется видом последних, условиями нагружения и геометрическими параметрами швов. Основными размерами стыковых швов являются ширина b и высота h выпуклости, угол перехода θ и радиус сопряжения ρ с основным металлом. Общие очертания угловых швов определяются размерами их катетов (см. рис. 8.8).

Способ и режим сварки заметно изменяют основные размеры швов (табл. 8.1). Последние зависят также от применяемых сварочных материалов, разделки кромок, шероховатости поверхности, коэффициента поверхностного натяжения и других факторов.

Размеры шва не являются стабильными и могут заметно изменяться по его длине [24, 25]. Следствием этого является существенная нестабильность коэффициента α_σ (см. рис. 8.8).

Механизированные способы сварки обеспечивают формирование швов с более стабильными размерами, а следовательно, и концентрацией напряжений, чем выполненных сваркой вручную. Самую низкую концентрацию напряжений создают стыковые соединения, формирование зон повышенной напряженности в которых обусловлено выпуклостью шва. Для качественно выполненного стыкового соединения средние значения коэффициентов концентрации напряжений α_σ обычно не превышают 1,3—2,0. Эти значения существенно возрастают для соединений с подрезами, порами, непроварами, наплывами, при наличии угловатости, смещении стыкуемых кромок. Известные формулы для расчетного определения коэффициентов концентрации напряжений стыковых соединений, полученные аппроксимацией аналитических решений функциями соответствующих видов, приведены в работах [28—33].

Характер зависимости теоретического коэффициента концентрации напряжений от основных размеров стыкового шва показан на рис. 8.9. Наибольшее влияние на концентрацию напряжений оказывает радиус кривизны ρ в месте перехода шва на основной металл.

В тавровых соединениях, угловые швы которых не передают основной нагрузки (см. рис. 8.8, *б*), концентрация напряжений ненамного выше, чем в стыковых соединениях. В основном она определяется радиусом перехода углового шва на основной металл и так же, как в стыковых соединениях, переменна по длине шва. Расчетная оценка коэффициентов концентрации напряжений тавровых соединений может производиться на основе ряда соотношений, приведенных в работах [26, 27, 32, 35].

В угловых швах крестообразных и нахлесточных соединений (см. рис. 8.8, *в*, *г*, *д*) создается значительно большая концентрация напряжений и деформаций. Она вызывается не только резкостью перехода углового шва на основной металл, но и общей формой соединения, соотношением размеров его отдельных элементов. Наиболее высокую концентрацию напряжений создают нахлесточные соединения с фланговыми швами. Неравномерность распределения срезывающих напряжений по длине накладки вызывает дополнительную концентрацию напряжений у концов фланговых швов, где, как правило, зарождаются усталостные трещины в основном металле. Коэффициенты концентрации напряжений нахлесточных соединений с фланговыми швами в значительной мере изменяются под влиянием соотношения ширины накладки и основной пластины a_1/a и в меньшей степени зависят от длины нахлестки b (рис. 8.10). При соотношениях геометрических размеров накладок и основных пластин, наиболее часто встречающихся на практике, коэффициенты концентрации напряжений у концов фланговых швов изменяются в пределах 1,8—3,2.

Расчетную оценку концентрации напряжений и деформаций в нахлесточных соединениях с фланговыми швами можно

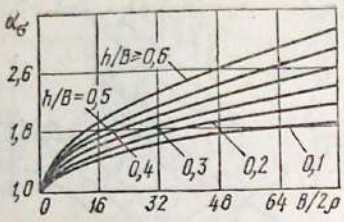


Рис. 8.9. Зависимость коэффициента концентрации напряжений α_σ от размеров стыкового соединения [24].

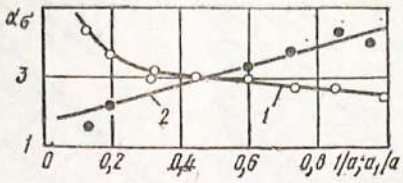


Рис. 8.10. Зависимость коэффициента α_σ от относительной длины (*1*) и ширины (*2*) накладки в нахлесточных соединениях с фланговыми швами [13].

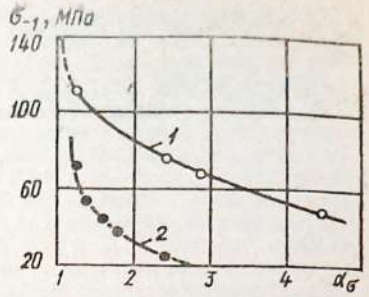


Рис. 8.11. Зависимость пределов выносливости образцов с концентраторами (*1*) и сварных соединений (*2*) от коэффициента концентрации напряжений α_σ [13].

проводить [36] по соотношению

$$\alpha_\sigma = \frac{\text{cth } 2{,}3a/l}{l/a}, \qquad (8.8)$$

где $2{,}3a$ — ширина накладки; l — длина флангового шва. В соответствии с формулой (8.8) увеличение отношения ширины накладки к ее длине вдвое (с 0,5 до 1) повышает коэффициент концентрации напряжений с 2 до 3,4.

Добавление лобового шва снижает неравномерность распределения напряжений в нахлесточных соединениях. Коэффициенты концентрации напряжений соединений, выполненных обваркой по контуру (см. рис. 8.8, *д*), ниже, чем при применении только фланговых швов. Но когда имеются только швы, передающие основную нагрузку, появляются дополнительные напряжения от изгиба и концентрация напряжений существенно возрастает.

Для расчетного определения концентрации напряжений крестообразных и нахлесточных соединений с лобовыми швами могут быть использованы зависимости, рекомендуемые для тавровых соединений [26, 27, 32, 35]. Учет дополнительной концентрации напряжений, вызываемой передачей силовых потоков через угловые швы, в крестообразных и нахлесточных соединениях осуществляется согласно [32].

После наступления текучести в зонах концентрации линейная зависимость между напряжениями и деформациями нарушается. Поэтому коэффициенты концентрации упруго-пластических напряжений $K_\sigma^{уп}$ и деформаций K_ε не совпадают и их рассматривают раздельно. В сравнении с α_σ коэффициент $K_\sigma^{уп}$ за пределом текучести уменьшается, а K_ε повышается. Взаимосвязь коэффициентов концентрации упругих и упруго-пластических напряжений и деформаций устанавливается на основе соотношения [19]

$$K_\sigma^{уп} K_\varepsilon / \alpha_\sigma^2 = F(\alpha_\sigma, \sigma_n, m), \qquad (8.9)$$

где $F(\alpha_\sigma, \sigma_n, m)$ — некоторая функция геометрии α_σ, уровня нагружения σ_n, упруго-пластических свойств материала m. В случае $F(\alpha_\sigma, \sigma_n, m) = 1$ приходим к известному соотношению Г. Нейбера, связывающему рассматриваемые коэффициенты концентрации напряжений и деформаций.

Пределы выносливости сварных образцов заметно ниже соответствующих значений, полученных на образцах основного металла с искусственными концентраторами напряжений (выкружками) в том же диапазоне изменения коэффициента α_σ (рис. 8.11). С повышением уровня концентрации напряжений возрастает разница между пределом выносливости образца с выкружками и пределом выносливости сварного соединения. Эта разница может достигать значения 50—80 МПа и быть соизмеримой с падением сопротивления усталости, вызываемым концентрацией напряжений, обусловленной только геометрией сварного соединения. Следовательно, влияние концентрации напряжений как одного из основных факторов, определяющих долговечность соединений, проявляется в сочетании с действием других факторов — прежде всего остаточных сварочных напряжений.

Неоднородность механических свойств. В сварном соединении выделяют три основные зоны: металл шва, зону термического влияния и основной металл [37]. Свойства металла сварного шва определяются исходными характеристиками сварочных материалов и их изменениями под воздействием термического цикла сварки. Заметное влияние оказывает также деформационный цикл сварки, сопровождающий

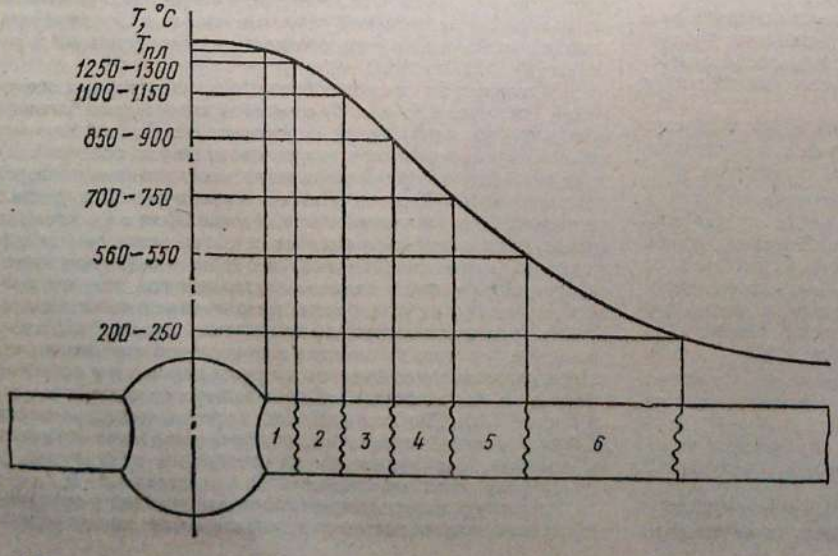


Рис. 8.12. Участки зоны термического влияния:

1 — твердо-жидкого состояния; *2* — перегрева; *3* — полной перекристаллизации; *4* — неполной перекристаллизации; *5* — рекристаллизации; *6* — старения.

процесс кристаллизации шва. Это приводит к тому, что металл шва и основной металл различаются между собой как в структурном отношении, так и по механическим свойствам. Однако сами по себе эти отличия не становятся причинами преждевременных усталостных повреждений металла шва, если в нем нет трещин, непроваров, пор, шлаковых включений и других дефектов сварки.

Иное положение занимает зона термического влияния, под которой понимают участок основного металла, непосредственно прилегающий к сварному шву и претерпевший в процессе термодеформационного цикла сварки различные структурные и фазовые превращения [37]. Свойства данной зоны в значительной мере определяют чувствительность соединений к концентрации напряжений, поскольку шов переходит на основной металл в ее пределах. Поэтому влияние неоднородности механических свойств на долговечность соединений может проявиться прежде всего в связи с различием свойств основного металла и зоны термического влияния.

По своему строению ЗТВ неоднородна (рис. 8.12). В зависимости от температур разогрева в процессе сварки в ее пределах выделяют участки: твердо-жидкого состояния, перегрева, полной и неполной перекристаллизации, рекристаллизации, старения [37]. Размеры отдельных участков зоны термического влияния в зависимости от способа и режимов сварки колеблются в довольно широких пределах. Общая закономерность изменения размеров отдельных участков и в целом зоны термического влияния состоит в их увеличении с ростом тепловложения и длительности сварочного цикла [37, 38]. Наибольшая протяженность участков наблюдается при ЭШС, а наименьшая — при сварке с применением высококонцентрированных источников энергии (табл. 8.2).

Структурные и фазовые превращения, вызывающие образование участков зоны термического влияния, протекают на фоне деформационного цикла сварки, связанного с формированием временных и остаточных напряжений и деформаций. Термодеформационный цикл сварки и сопровождающие его процессы диффузии в металле шва и околошовной зоне приводят к развитию существенной неоднородности механических свойств различных участков соединений.

В сварных соединениях низкоуглеродистых сталей изменение твердости, а следовательно, и прочностных свойств в перпендикулярном шву направлении носит монотонный характер с постепенным повышением их значений в пределах зоны термического влияния (рис. 8.13, *а*). Изменение механических свойств в соединениях низколегированных сталей носит более сложный характер, обусловленный многообразием структурных и фазовых превращений, сопровождающих термодеформационный цикл сварки сталей данных классов (рис. 8.13, *б*). Однако механическая неоднородность не оказывает существенного влияния на изменение пределов выносливости сварных образцов [13]. В гладких сварных образцах трещины усталости зарождаются, как правило, по линии сплавления, но долговечность этих образцов такая же, как и ос-

Таблица 8.2. **Ориентировочные размеры отдельных участков зоны термического влияния**

Способ сварки	Погонная энергия, кДж/см	Длительность пребывания выше 900 °С, с	Ширина участка, мм		
			перегрева	перекристаллизации	неполной перекристаллизации
Электронно-лучевая	1—5	1,5—3,0	0,0—0,1	0,1—0,3	0,3—1,0
Ручная дуговая	5—15	6—18	0,1—0,3	0,3—1,0	3—8
Под флюсом	40—60	14—100	0,1—0,5	0,3—2,0	3—15
Электрошлаковая	300—600	220—560	0,5—5,0	1—10	5—50

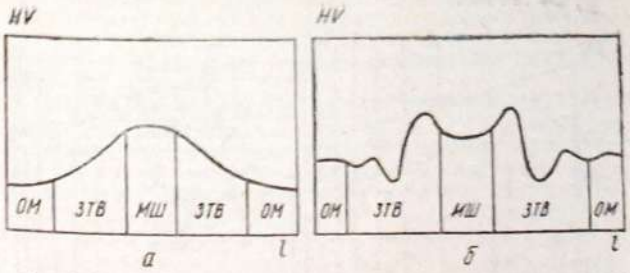


Рис. 8.13. Характер изменения твердости в соединениях низкоуглеродистых (*а*) и низколегированных (*б*) сталей.

новного металла (рис. 8.14, *а*). Малозаметно влияние свойств зоны термического влияния и при наличии концентраторов напряжений [40]. Полученные расчетно-экспериментальные зависимости в широком диапазоне изменения коэффициента концентрации напряжений показывают, что при обычных скоростях охлаждения металл зоны термического влияния и основной металл одинаково сопротивляются усталостному разрушению в многоцикловой области (рис. 8.15).

То же самое наблюдается при испытании сварных соединений низколегированных сталей (см. рис. 8.14, *б*, *в*, *г*), а также при исследовании специальных модельных образцов с вваренными контактной сваркой твердыми прослойками [41]. При наличии концентратора напряжений в пределах твердой прослойки разрушение локализуется в данной зоне. Однако заметного изменения долговечности вследствие повышенной чувствительности металла твердой прослойки к концентрации напряжений обычно не происходит. При испытании на усталость гладких сварных образцов с мягкими прослойками проявляется эффект их контактного упрочнения [42]. Наиболее заметно предел выносливости увеличивается при отношении толщины прослойки h к диаметру образца d, не превышающем 0,2. Следовательно, в соединениях низкоуглеродистых сталей с небольшими по протяженности разупрочненными участками в зоне термического влияния эффект контактного упрочнения будет проявляться наиболее полно. Это положение подтверждается результатами испытаний гладких сварных образцов низколегированных сталей (см. рис. 8.14, *б*). Несмотря на то что трещины в сварных соединениях со снятой выпуклостью шва инициируются в зоне термического влияния, заметного снижения долговечности по сравнению с долговечностью гладких образцов основного металла не наблюдалось.

Контактное упрочнение мягких прослоек происходит и при наличии концентраторов напряжений [32, 43]. Степень контактного упрочнения зависит от соотношения размеров концентратора напряжений и мягкой прослойки. Чем тоньше прослойка, тем при более резких концентраторах напряжений будет проявляться упрочняющий эффект. В реальных соединениях непосредственно к линии сплавления примыкает обезуглероженный участок, обладающий пониженной прочностью. Крайне малая протяженность данного участка обусловливает заметное проявление эффекта контактного упрочнения даже при наличии концентратора напряжений вдоль линии сплавления. В этой связи мягкие прослойки, расположенные в пределах обезуглероженного участка, а также участков полной и неполной перекристаллизации, в обычных условиях не снижают предел выносливости соединений низколегированных сталей.

Общий вывод о несущественной роли неоднородности механических свойств в изменении пределов выносливости может быть распространен и на соединения высокопрочных сталей. Иллюстрацией могут служить результаты усталостных испытаний сварных образцов из термообработанной стали с пределом текучести 860 МПа [45]. В различных зонах соединений наносились надрезы, создающие концентрацию напряжений в диапазоне $\alpha_\sigma = 2...5$. Испытания, выполненные при переменном растяжении и отнулевом цикле, не выявили заметных различий в пределах выносливости основного металла, металла шва, крупнозернистого и мелкозернистого участков зоны термического влияния при локализации в них

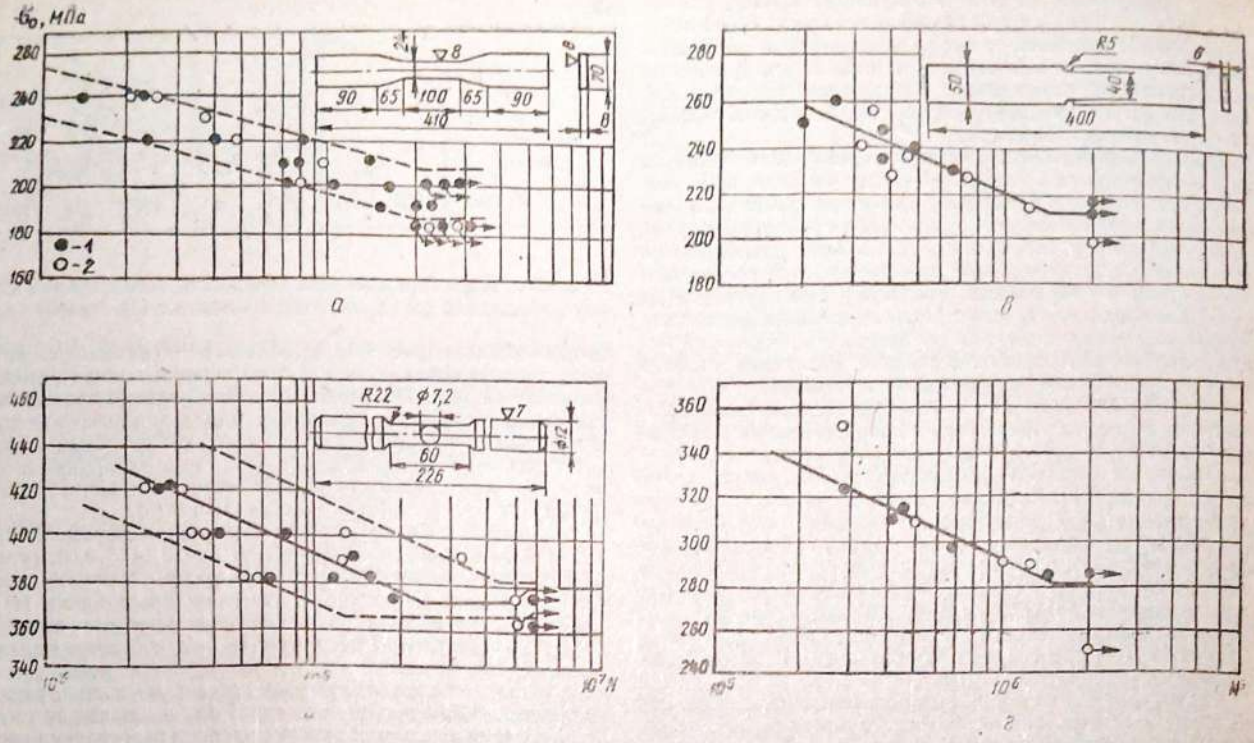


Рис. 8.14. Долговечность основного металла (*1*) и зоны термического влияния (*2*) сталей Ст3 (*а*); 15ХСНД (*б*, *в*) и 10Г2С1 (*г*).

надрезов одинаковой остроты (рис. 8.16). Практическое совпадение характеристик сопротивления усталости наблюдается несмотря на существенные различия структуры и механических свойств рассмотренных зон сварного соединения.

Таким образом, химическая, структурная, механическая и другие виды неоднородности, связанные с образованием сварных швов, как правило, не оказывают заметного влияния на сопротивление соединений низкоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей усталостному разрушению при многоцикловом нагружении.

С повышением уровня переменных напряжений, особенно в упруго-пластической области деформирования, влияние различий механических свойств отдельных зон и участков соединений несколько усиливается [46]. В результате различного сопротивления статическому и циклическому упруго-пластическому деформированию при нагружении за пределом текучести гладких сварных образцов происходит перераспределение деформаций между отдельными зонами соединений [47].

Наиболее полно механическая неоднородность проявляется в диапазоне квазистатических разрушений соединений [48, 49]. Переход в данную область нагружения сопровождается сменой механизма разрушения от усталостного к квазистатическому, при котором определяющую роль приобретают механические свойства отдельных зон и эффекты контактного упрочнения. В соединениях низкоуглеродистых и низколегированных сталей это приводит к преимущественной локализации статических и квазистатических разрушений в основном металле, обладающем пониженной прочностью по сравнению с другими зонами соединения [48, 49].

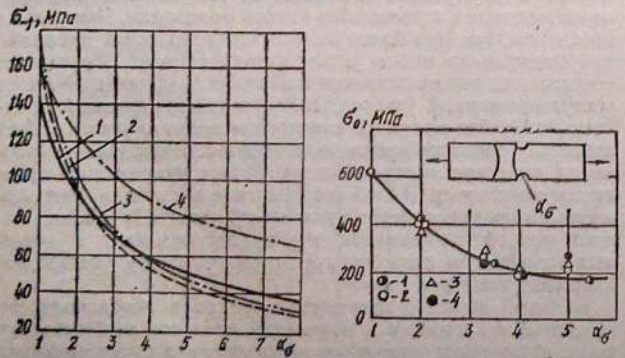


Рис. 8.15. Зависимость предела выносливости от коэффициента концентрации напряжений [40]:

1 — основной металл; *2—4* — металл зоны термического влияния при $v_{охл}$ = 1000; 2, 8 и 6,8 °С/с соответственно.

Рис. 8.16. Сопротивление усталости соединений высокопрочной стали с различной концентрацией напряжений [45]:

1 — основной металл; *2* — металл шва; *3* — мелкозернистый участок зоны термического влияния; *4* — крупнозернистый участок зоны термического влияния.

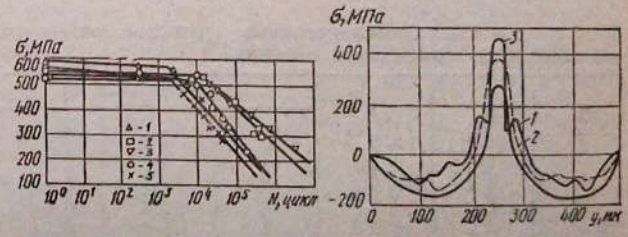


Рис. 8.17. Циклическая долговечность сварных соединений стали Х70, выполненных различными способами (R_σ = = 0):

1 — механизированная сварка под флюсом; *2* — стыковая электроконтактная сварка с гратом; *3* — то же, без грата; *4* — сварка порошковой проволокой; *5* — ручная сварка.

Рис. 8.18. Эпюры продольных остаточных напряжений в пластинах различной прочности:

1 — сталь М16С ($\sigma_т$ = 250 МПа); *2* — сталь 15ХСНД ($\sigma_т$ = = 400 МПа); *3* — сталь 14ХМНДФР ($\sigma_т$ = 600 МПа).

В диапазоне малоцикловых усталостных разрушений, в отличие от квазистатической области, роль неоднородности механических свойств в изменении долговечности соединений не столь ощутима. В реальных сварных соединениях преобладающее влияние оказывает концентрация напряжений при заметном контактном упрочнении участков с пониженной прочностью. Подтверждением этому могут служить результаты испытаний сварных соединений низколегированной стали, выполненных различными способами (рис. 8.17). Во всех случаях долговечность соединений определялась главным образом выпуклостью шва. Формируемая при различных способах сварки неоднородность механических свойств соединений в конечном итоге оказывает второстепенное влияние на сопротивление последних малоцикловому усталостному разрушению.

Таким образом, влияние различных видов неоднородностей свойств на сопротивление соединений разрушению при переменном нагружении необходимо рассматривать с учетом наблюдаемых эффектов контактного упрочнения мягких и тонких прослоек, наличия концентраторов напряжений, уровня напряжений. В многоцикловой области влияние неоднородности свойств соединений на изменение долговечности последних можно не учитывать. Этот фактор оказывает второстепенное влияние и в диапазоне малоцикловых усталостных разрушений. Несущая способность соединений в квазистатической области определяется механическими свойствами наименее прочной зоны.

Остаточные напряжения. Основной причиной образования остаточных напряжений является местный неравномерный нагрев и последующее охлаждение шва и основного металла в зоне сварки при наличии связей, препятствующих свободной деформации при остывании (см. гл. 6).

На основе расчетных [50—52] и экспериментальных [53, 55] исследований сложились следующие основные представления о величине и характере распределения остаточных напряжений. В продольных стыковых соединениях узких и достаточно длинных пластин остаточные напряжения вдоль шва σ_x достигают предела текучести материала. Поперечная составляющая остаточных напряжений σ_y в таких пластинах мала по сравнению с продольной. Остаточные напряжения здесь одноосные.

В широких пластинах продольные и поперечные остаточные напряжения достигают значений, соизмеримых с пределом текучести материалов. Максимальных значений оба компонента достигают в зоне сварного шва в средней части пластины, убывая и переходя в сжимающие напряжения по мере удаления к краям пластины. В однопроходных электродуговых швах остаточные напряжения в направлении толщины σ_z незначительны. С повышением предела текучести материала возрастают и остаточные напряжения (рис. 8.18).

В многослойных стыковых швах остаточные напряжения зависят от свойств металла, числа слоев, режима сварки и условий закрепления. Распределение продольных напряжений подчиняется примерно тем же закономерностям, что и в однопроходных соединениях. При сварке незакрепленных пластин вследствие поперечной усадки отдельных слоев и поворота пластин относительно друг друга в корне шва поперечные напряжения могут превышать предел текучести материала, а при больших толщинах (80—100 мм и более) могут достигать значений, вызывающих разрушение.

В противоположность этому при сварке пластин, угловой поворот которых невозможен, а поперечная усадка происходит беспрепятственно, в конце шва возникают сжимающие поперечные напряжения. В последних слоях шва напряжения $\sigma_y \approx (0{,}4 \ldots 0{,}6)\,\sigma_т$ и являются растягивающими. В зависимости от режима укладки валиков вышележащих слоев остаточные напряжения в направлении толщины σ_z могут быть и сжимающими, и растягивающими. В сварных соединениях с угловыми швами распределение остаточных напряжений по характеру аналогично распределению их в стыковых соединениях.

В сталях остаточные напряжения весьма стабильны во времени. Их релаксация протекает крайне медленно и составляет несколько процентов. В то же время значение и распределение остаточных напряжений существенно изменяются под воздействием внешнего нагружения. Высокие уровни растягивающих остаточных напряжений приводят к появлению пластических деформаций в зоне шва даже при незначительной внешней нагрузке, вызывая изменение исходного поля напряжений.

Выполненные на основе ультразвукового неразрушающего метода измерений исследования [54, 56] показали, что в многоцикловой области нагружения изменение остаточных напряжений происходит, главным образом, при первом цикле нагружения. Последующие циклы вызывают значительно меньшие изменения, и уровень остаточных напряжений можно считать практически установившимся. Установившийся уровень остаточных напряжений $\sigma_{ост}^{уст}$ зависит от значений и характера распределения исходных остаточных напряжений, амплитуды и асимметрии цикла внешнего нагружения, а также концентрации напряжений, обусловленной типом соединения и формой шва [54, 56].

Наиболее полное представление об установившихся остаточных напряжениях в зонах концентрации дает пространственная диаграмма в координатах $\sigma_{max} - \sigma_{ост}^{уст} - \alpha_\sigma$ (рис. 8.19). Пересечение поверхности диаграммы плоскостью $\sigma_{max} - \sigma_{ост}$ дает кривую зависимости уровня установившихся остаточных напряжений от максимальных напряжений цикла для фиксированного значения теоретического коэффициента концентрации напряжений. Наибольшая крутизна этой кривой наблюдается в области невысоких уровней номинальных напряжений. С ростом нагрузки интенсивность изменения растягивающих остаточных напряжений уменьшается. Дальнейшее увеличение номинальных напряжений приводит к формированию в зонах концентраторов остаточных напряжений обратного знака.

Пересечение поверхности диаграммы плоскостями $\sigma_{ост}^{уст} - \alpha_\sigma$ выявляет зависимости уровня установившихся остаточных напряжений от теоретического коэффициента концентрации напряжений. С ростом концентрации напряжений $\sigma_{ост}^{уст}$ снижается. Градиент установившихся остаточных напряжений с увеличением значений α_σ вначале несколько возрастает, а затем постепенно уменьшается. С повышением значений α_σ в зонах концентраторов могут формироваться сжимающие остаточные напряжения.

По схеме идеально упруго-пластического материала после первого цикла внешнего нагружения остаточные напряжения в зоне концентратора составят

$$\sigma_{ост} = \sigma_т - \alpha_\sigma \sigma_{max}, \qquad (8.10)$$

а при его отсутствии

$$\sigma_{ост} = \sigma_т - \sigma_{max}. \qquad (8.11)$$

Если у края гладких пластин растягивающие остаточные напряжения уменьшаются до нулевых значений при $\sigma_{max} = \sigma_т$, то в зонах концентраторов, например при $\alpha_\sigma = 2{,}5$, для этого достаточно уровня напряжения, равного $0{,}4\sigma_т$ (рис. 8.20). Дальнейшее повышение внешней нагрузки, особенно в случае весьма острых концентраторов, приводит к формированию сжимающих остаточных напряжений.

В рамках принятой расчетной модели второй и последующие циклы нагружения при том же уровне номинальных напряжений будут проходить при упругом деформировании материала по всему сечению сварного элемента и не приведут к изменению остаточных напряжений в сварных пластинах с концентраторами и без них. В действительности циклы нагружения, следующие за первым, приводят к незначительному изменению остаточных напряжений [54]. Это обусловлено, очевидно, несовершенной упругостью материала, а также возможным изменением его свойств с ростом числа циклов нагружения. Поскольку такое изменение невелико (обычно не превышает 10—30 МПа), то в инженерных расчетах ими можно пренебречь.

При циклическом нагружении сварного соединения уровень напряжений в зоне сварного шва под влиянием исходных остаточных напряжений изменяется. Вследствие этого изме-

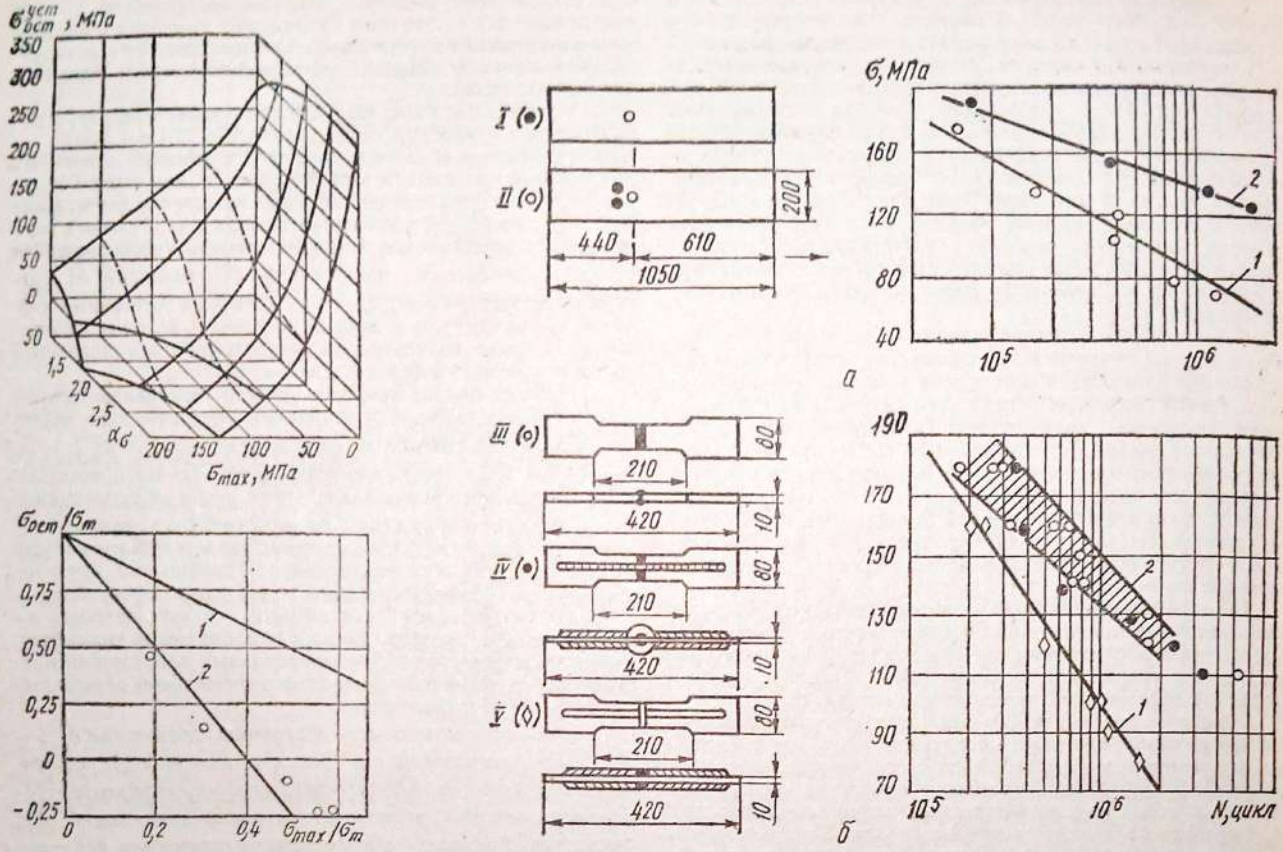


Рис. 8.19. Пространственная диаграмма установившихся остаточных напряжений.

Рис. 8.20. Зависимость уровня остаточных напряжений от внешнего нагружения для $\alpha_\sigma = 1$ (*1*) и $\alpha_\sigma = 2{,}5$ (*2*) по формулам (8.10), (8.11) (точки — эксперимент).

Рис. 8.21. Сопротивление усталости образцов с остаточными напряжениями (*1*) и без них (*2*):

а — образцы с концентратором напряжений; *б* — сварные образцы.

няется и сопротивление усталости сварного соединения. При наличии концентраторов напряжений и с понижением уровня внешних нагрузок остаточные напряжения усиливают свое действие.

В исследованиях, выполненных в ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины [13], роль растягивающих остаточных напряжений оценивалась путем сопоставления кривых усталости однотипных образцов с высокими и низкими остаточными напряжениями. В зонах концентраторов они наводились путем выполнения наплавок либо точечным нагревом (рис. 8.21). В обоих случаях остаточные напряжения в зонах концентраторов достигали предела текучести основного металла. В образцах с отверстиями предел ограниченной долговечности на базе $2 \cdot 10^6$ циклов вследствие влияния остаточных напряжений понизился вдвое (см. рис. 8.21, *а*). Примерно такое же снижение сопротивления усталости под влиянием остаточных напряжений наблюдалось и при испытании сварных образцов (см. рис. 8.21, *б*). В образцах, вырезанных из общей сварной заготовки (тип III), и образцах, стыковой шов которых заваривался после разрезки пластин с продольными наплавками (тип IV), остаточные напряжения были невысокими. Эти образцы оказались намного долговечнее образцов типа V с высокими исходными остаточными напряжениями.

Во всех опытах наблюдалась одна и та же закономерность: при напряжениях ± (180—200) МПа, т. е. близких к пределу текучести основного металла исследованной низкоуглеродистой стали М16С, сопротивление усталости образцов с высокими остаточными напряжениями становилось практически одинаковым. С понижением уровня переменных напряжений действие остаточных напряжений усиливалось и в равной мере снижалась долговечность сварных и несварных образцов.

Неоднозначность проявления остаточных сварочных напряжений на различных уровнях нагрузки связана с их релаксацией и неодинаковыми установившимися значениями $\sigma_{ост}^{уст}$ на каждом из этих уровней. При уровнях номинальных напряжений, близких к пределу выносливости, ус-

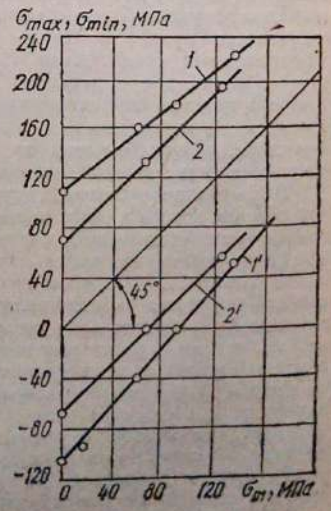


Рис. 8.22. Диаграммы предельных напряжений стыковых соединений низкоуглеродистой стали:

1, *1'* — без остаточных напряжений; *2*, *2'* — с высокими растягивающими напряжениями.

Таблица 8.3. Влияние отдельных факторов при плоском и линейном напряженном состояниях на изменение предела выносливости

Действующий фактор	R_σ	Снижение (—) или повышение (+) $\Delta\sigma_R$, %		
		линейное напряженное состояние	плоскостное напряженное состояние	
			$\sigma_3/\sigma_1 = -0{,}47$	$\sigma_3/\sigma_1 = -1$
Концентрация напряжений	—1	—43	—	—19
Изменение свойств зоны термического влияния	—1	+17	—	0
Остаточные напряжения	—1	—27	—34	—36
	0	0	—	—23

Примечание. Здесь σ_1, σ_3 — главные напряжения, отношение $\sigma_3/\sigma_1 = -1$ соответствует чистому сдвигу (кручению)

тановившиеся значения остаточных напряжений в зонах концентраторов сварных соединений достаточно высоки. В этих условиях остаточные сварочные напряжения существенно снижают сопротивление усталости соединений. С ростом внешней нагрузки уровень установившихся остаточных напряжений вследствие их релаксации уменьшается. В результате этого происходит сближение кривых усталости соединений с растягивающими остаточными напряжениями и без них.

По тем же причинам роль остаточных напряжений снижается с повышением асимметрии цикла внешнего нагружения. В наибольшей степени влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости сварных соединений проявляется при симметричном цикле нагружения. С ростом значений коэффициента асимметрии цикла R_σ разница пределов выносливости сварных соединений с остаточными напряжениями и без них уменьшается, что влечет за собой изменение наклона линии предельных напряжений (рис. 8.22). Если ветви *1, 1'* диаграммы предельных напряжений сварных соединений без остаточных напряжений при их продолжении пересекаются, то ветви *2—2'*, соответствующие образцам с высокими растягивающими остаточными напряжениями, практически параллельны [13].

Интенсивность влияния растягивающих остаточных напряжений зависит также от характера передачи усилия в элементе или образце и вида напряженного состояния. Об этом, в частности, можно судить по результатам испытания на изгиб и изгиб с кручением сварных образцов размерами 400×820×12 мм из стали 10Г2С1 [57]. Концентрация напряжений и остаточная напряженность в них создавались пересекающимися швами. Сопоставление пределов выносливости образцов в исходном состоянии, после нормализации и высокого отпуска показывает (табл. 8.3), что при плоском напряженном состоянии (изгиб с кручением), когда главные напряжения имеют разные знаки, влияние остаточных напряжений сказывается сильнее, чем при линейном напряженном состоянии (изгиб). В то же время влияние концентрации напряжений больше проявляется при изгибе, чем при чистом сдвиге.

Таким образом, степень влияния растягивающих остаточных напряжений зависит от вида соединения, асимметрии цикла, напряженного состояния и характера передачи усилий в элементе или образце. В ряде случаев это влияние может быть соизмеримо с эффектом концентрации напряжений. Стыковые и нахлесточные соединения, участвующие в передаче основного силового потока, наиболее заметно изменяют пределы выносливости под влиянием растягивающих остаточных напряжений при знакопеременных нагрузках. В области положительных асимметрий нагружения снижение циклической долговечности под действием остаточных напряжений может наблюдаться в местах прикрепления конструктивных элементов (ребер, фасонок, диафрагм и т. п.).

8.3. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Основная особенность малоциклового нагружения состоит в упруго-пластическом характере развития местных, а в предельных случаях — и номинальных напряжений и деформаций. Для расчетной оценки долговечности сварных соединений в малоцикловой области нагружения необходимо располагать информацией о напряженно-деформированном состоянии и механических свойствах основного металла и различных зон соединения. Ниже приводится информация о неоднородности свойств металла сварных соединений при статических и переменных напряжениях, превышающих предел текучести, и режимах нагружения, отвечающих различным условиям изменения напряженно-деформированного состояния. Рассматриваются закономерности развития упруго-пластических деформаций вблизи сварных швов с учетом конструктивно-технологических особенностей их выполнения, а также приводятся результаты изучения долговечности реальных соединений, позволяющие наиболее полно и комплексно оценить роль специфических для сварки факторов.

Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Сопротивление малоцикловому деформированию и разрушению основного металла, ЗТВ и металла шва во многом предопределяется их свойствами при статическом нагружении. Характеристики прочности и пластичности металла шва определяются в основном применяемыми сварочными материалами и режимами сварки, выбираемыми в зависимости от функционального назначения шва. Общей тенденцией является получение металла шва с механическими свойствами, близкими к свойствам основного металла.

Прочностные показатели $\sigma_т$, $\sigma_в$ металла ЗТВ по сравнению с аналогичными характеристиками основного металла с повышением характеристик механических свойств стали устойчиво снижаются, несмотря на заметное рассеяние опытных данных (рис. 8.23). При этом пластичность данной зоны по сравнению с ее значением для основного металла несколько повышается. Практически одинаковые прочностные и пластические свойства рассматриваемых зон соединений наблюдаются у сталей с отношением предела текучести к временному сопротивлению около 0,75—0,80, что характерно для низколегированных сталей повышенной прочности.

О характере поведения материалов при малоцикловом деформировании судят по изменению ширины петли упруго-пластического гистерезиса, регистрируемому обычно при нагружении с заданными напряжениями [19, 58]. Сужение ширины петли гистерезиса с числом циклов нагружения характерно для циклически упрочняющихся материалов, ее расширение свидетельствует о склонности к циклическому разупрочнению. Поцикловая кинетика ширины петли у циклически стабильных материалов несущественна.

Отдельные зоны сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей обладают не только различными по интенсивности, но и контрастными свойствами при циклическом упруго-пластическом деформировании (табл. 8.4).

В реальных условиях отдельные зоны соединений, обладающие различными характеристиками сопротивления деформированию, нагружаются совместно. Следствием этого является поцикловое перераспределение деформаций и напряжений между материалами с различными свойствами. Интенсивность процесса поциклового перераспределения напряжений и деформаций определяется степенью различия в

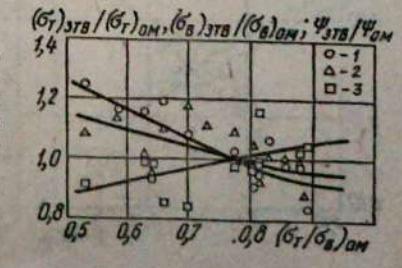


Рис. 8.23. Взаимосвязь характеристик прочности и пластичности основного металла и зоны термического влияния:
1 — $(\sigma_т)_{ЗТВ}/(\sigma_т)_{ОМ}$; *2* — $(\sigma_в)_{ЗТВ}/(\sigma_в)_{ОМ}$; *3* — $\psi_{ЗТВ}/\psi_{ОМ}$

Таблица 8.4. Характеристика сопротивления сталей малоцикловому деформированию и разрушению отдельных зон соединений

Марка стали	Способ сварки	Зона соединения	Показатель степени m_t	Постоянная C_ψ	Характер поведения материала
М16С	Ручная	ОМ	0,440	0,222	Стабилизирующийся
		ЗТВ	0,426	0,224	Разупрочняющийся
Ст3спТУ	»	ОМ	0,531	0,199	При $N < 350$ — разупрочняющийся, при $N > 350$ — упрочняющийся
		ЗТВ	0,485	0,257	Разупрочняющийся
		МШ	0,531	0,231	Стабилизирующийся
18Гпс	—	ОМ	0,516	0,265	Упрочняющийся
Сталь 20	Ручная	ОМ	0,571	0,255	»
		ЗТВ	0,554	0,267	Стабилизирующийся
		МШ	0,592	0,218	»
13ХГМФ	»	ОМ	0,470	0,273	Разупрочняющийся
		ЗТВ	0,430	0,188	»
		МШ	0,460	0,322	Стабилизирующийся
	Электрошлаковая	ЗТВ	0,430	0,142	Разупрочняющийся
		МШ	0,460	0,230	Стабилизирующийся
09Г2ФБ	—	ОМ	0,420	0,189	»
	Механизированная под флюсом	ОМ	0,430	0,223	»
		ЗТВ	0,450	0,237	Упрочняющийся
		МШ	0,440	0,205	Разупрочняющийся
20ХГСА	Ручная	ОМ	0,518	0,153	»
		ЗТВ	0,565	0,287	»
		МШ	0,539	0,231	»
07Х3ГНМЮА	—	ОМ	0,521	0,208	»
12ДХНМФА	—	ОМ	0,538	0,247	»
12Х1Н2МФДРА	—	ОМ	0,442	0,239	»
12Х2Н4МД	Электронно-лучевая	ОМ	0,511	0,189	»
		ЗТВ	0,509	0,182	»
		МШ	0,494	0,199	»

свойствах материалов отдельных зон соединений и уровнем нагружения. Наиболее ощутимо этот эффект наблюдается в сварных образцах без конструктивных концентраторов напряжений [59].

При наличии концентраторов напряжений процесс накопления усталостных повреждений в области перехода шва на основной металл в зоне дефектов заметно интенсифицируется. В таких случаях эффекты перераспределения напряжений и деформаций между отдельными зонами соединения играют менее заметную роль.

Сопротивление материалов малоцикловому разрушению оценивают преимущественно по результатам испытаний при жестком нагружении, т. е. с контролируемыми деформациями [19, 58]. Для долговечностей, не превышающих $5 \cdot (10^3 \ldots 10^4)$ циклов, линейный характер кривых сопротивления усталостному разрушению сохраняется при использовании в качестве параметра суммарных упруго-пластических деформаций:

$$\varepsilon_a N^{m_t} = C_\psi, \qquad (8.12)$$

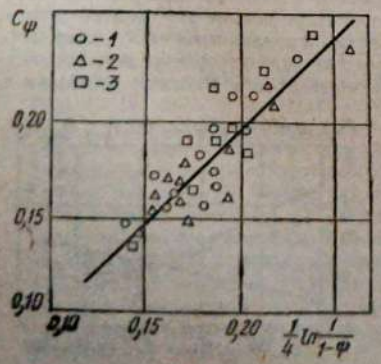


Рис. 8.24. Взаимосвязь постоянной C_ψ с пластичностью стали:
1 — основной металл; *2* — металл зоны термического влияния; *3* — металл шва.

где ε_a — амплитуда деформаций; N — число циклов до разрушения. Характеристиками, отражающими влияние свойств материалов в степенном уравнении, являются показатель степени m_t и постоянная C_ψ [58]. Значения этих параметров для ряда исследованных сталей и отдельных зон их сварных соединений приведены в табл. 8.4. Показатель степени m_t в широком диапазоне изменения механических свойств сталей колеблется от 0,41 до 0,59 при среднем значении 0,5. В данной области рассеяния располагаются результаты испытаний, относящиеся к различным зонам соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей повышенной и высокой прочности. Это указывает на слабую зависимость показателя степени m_t от прочности стали, зоны соединения и способа его выполнения.

Постоянная C_ψ определяется из условия разрушения при однократном приложении нагрузки. Численно она равна амплитуде деформаций статического нагружения, в связи с чем достаточно надежно коррелирует с пластичностью исследуемого материала:

$$C_\psi = \frac{1}{4} \ln \frac{1}{1-\psi}. \qquad (8.13)$$

Данная закономерность изменения постоянной C_ψ уравнения (8.12) является общей для металлов различных зон соединений сталей в широком диапазоне изменения их прочностных и пластических свойств (рис. 8.24).

Кривые сопротивления малоцикловому разрушению в более широком диапазоне долговечностей описываются степенными уравнениями, раздельно учитывающими упругую и пластическую компоненты полной деформации [19]:

$$\varepsilon_{ta} = \varepsilon_{ea} + \varepsilon_{pa} = C_e N^{-m_e} + C_p N^{-m_p}, \qquad (8.14)$$

где C_e, C_p — постоянные материала, зависящие от прочностных и пластических свойств материала соответственно; m_e,

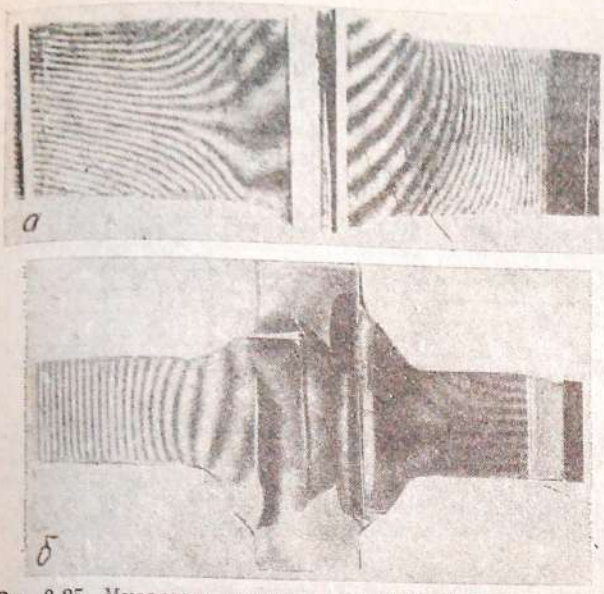


Рис. 8.25. Муаровые полосы при упруго-пластическом нагружении стыковых (*а*) и тавровых (*б*) соединений низкоуглеродистой стали Ст3Гпс.

m_p — показатели степени для упругой и пластической компонент деформации. Для многих сталей показатель степени m_p изменяется в пределах от 0,45 до 0,65, тогда как m_e колеблется в довольно узком диапазоне — от 0,09 до 0,12. Принимая в среднем $m_e = 0{,}1$, из условия (8.14) с учетом достижения напряжениями в шейке статически деформируемого образца в момент разрушения истинного сопротивления разрыву $\sigma_и$ получим

$$C_e = \sigma_и / 1{,}15E. \qquad (8.15)$$

Постоянная C_p, зависящая от пластичности стали, определяется по соотношению (8.13) при подстановке вместо относительного сужения ψ величины $\psi_в$, характеризующей сужение в точке максимальной нагрузки диаграммы деформирования, т. е. за вычетом упругой составляющей деформации однократного нагружения.

Характеристики сопротивления малоцикловому деформированию и разрушению, получаемые по результатам испытаний гладких образцов исследуемых зон сварных соединений, служат исходной информацией в расчетных методах оценки долговечности соединений, построенных на локальных характеристиках и критериях разрушения материалов в зоне дефектов, конструктивных, технологических и эксплуатационных концентраторов напряжений [19].

Закономерности упруго-пластического деформирования. Неоднородность свойств отдельных зон соединений при статическом и циклическом деформировании наряду с особенностями их конструктивного оформления и конфигурацией швов значительно усложняют теоретическое определение закономерностей развития полей упруго-пластических деформаций. При их экспериментальном изучении наиболее эффективно использование методов оптически чувствительных покрытий [60], муаровых полос [61, 62] и делительных сеток [62]. Картины муаровых полос в соединениях низкоуглеродистых сталей (рис. 8.25) свидетельствуют о сложном характере развития упруго-пластических деформаций вблизи сварных швов.

Измерения осевых деформаций ε_x в характерных зонах соединений низкоуглеродистых сталей М16С и Ст3Гпс, сваренных вручную, выявили ряд особенностей деформирования в упруго-пластической области нагружения (рис. 8.26). Если в упругой области $\sigma < (0{,}92...0{,}95)\,\sigma_{т_{0,м}}$ деформации в зоне концентрации больше деформаций в основном металле и ЗТВ, то с переходом в пластическую область на всей ее протяженности деформации у выпуклости стыкового шва меньше, чем для основного металла. Самые низкие уровни пластических деформаций развиваются в центре ЗТВ. Наблюдаемая особенность развития деформаций связана главным образом с различием прочностных свойств, которые для ЗТВ низкоуглеродистых сталей заметно выше, чем у основного металла (см. рис. 8.23). Рассеяние результатов измерений деформаций в зоне концентраторов напряжений несколько выше по сравнению с данными для основного металла и ЗТВ. Это вызвано нестабильностью размеров концентраторов напряжений и деформаций в местах сопряжения шва с основным металлом.

Данные особенности деформирования иллюстрируются полем деформаций в стыковом соединении стали Ст3Гпс (рис.8.27). Отчетливо виден более высокий уровень интенсивности деформаций в основном металле, чем у выпуклости шва и в зоне термического влияния.

Для тавровых и нахлесточных соединений характерны более высокие уровни концентрации упругих напряжений

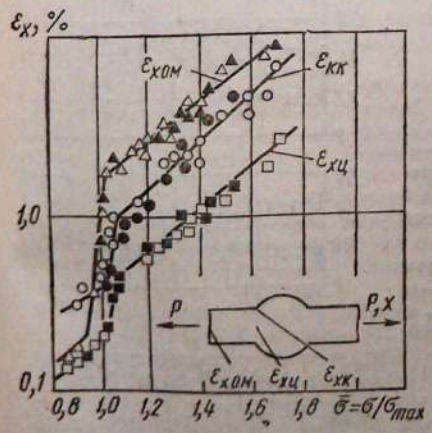


Рис. 8.26. Развитие деформаций в стыковых соединениях низкоуглеродистых сталей М16С (светлые значки) и Ст3Гпс (темные значки).

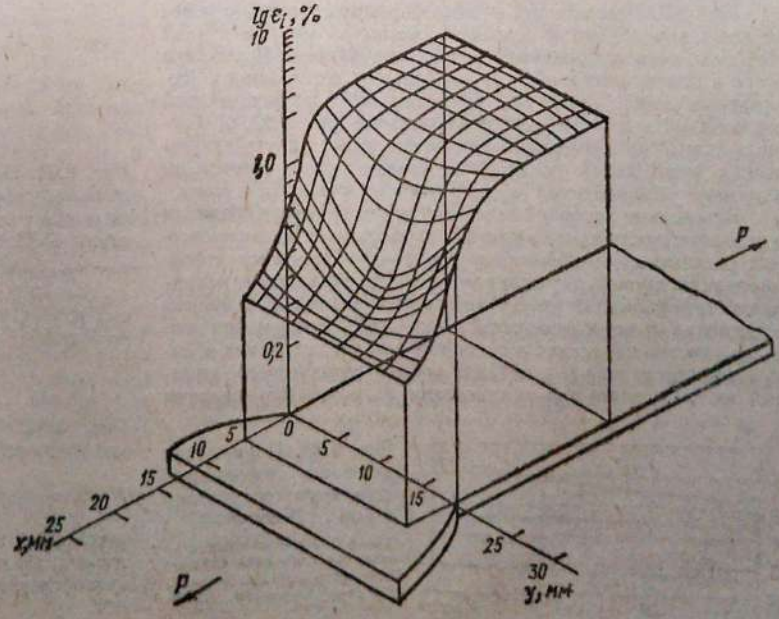


Рис. 8.27. Поле интенсивностей деформаций стыкового соединения стали Ст3Гпс, $\sigma = 284$ МПа.

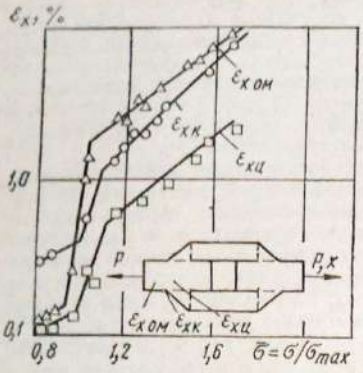


Рис. 8.28. Развитие деформаций в нахлесточных соединениях низкоуглеродистой стали Ст3Гпс.

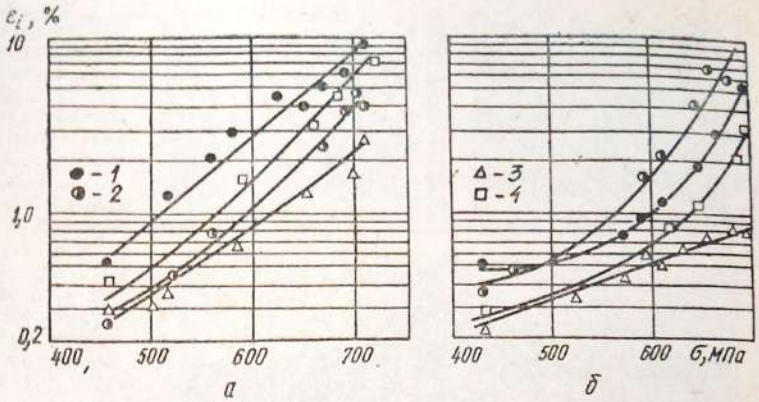


Рис. 8.29. Развитие деформаций в стыковом соединении стали 13ХГМФ, выполненном механизированной сваркой под флюсом (*а*) и электрошлаковой сваркой (*б*):

1 — основной металл; *2* — зона концентратора; *3* — металл шва; *4* — зона термического влияния.

В упруго-пластической области уровни деформаций вблизи угловых швов соединений низкоуглеродистых сталей также превышают соответствующие значения в зоне перехода выпуклости стыкового шва на основной металл. В то же время даже для двухстороннего нахлесточного соединения уровень пластических деформаций вблизи углового шва ниже, чем в основном металле (рис. 8.28).

В соединениях низколегированных сталей осредненные механические свойства ЗТВ примерно такие же, как у основного металла (см. рис. 8.23). В этой связи механическая неоднородность соединений низколегированных сталей оказывает менее заметное влияние на закономерности их упруго-пластического деформирования. Подтверждением этому служат результаты экспериментального изучения закономерностей деформирования соединений низколегированной стали 13ХГМФ. Деформации у выпуклости стыкового шва данной стали, выполненного механизированной сваркой под флюсом, в исследованном диапазоне упруго-пластических напряжений заметно превышают деформации в остальных зонах соединения, включая основной металл (рис. 8.29).

При ЭШС соединений обычно формируются швы с менее резкими переходами к основному металлу, чем при ручной сварке и механизированной сварке под флюсом. Вследствие этого в пластической области наибольшие деформации в соединении стали 13ХГМФ, выполненном электрошлаковой сваркой, развиваются в основном металле (рис. 8.29, *б*). Рассмотренные закономерности развития полей упруго-пластических деформаций соединений определяются совместным влиянием механической неоднородности и размеров швов.

Вследствие различий исходных уровней деформирования и неоднородности характеристик сопротивления металла сварных соединений циклическому упруго-пластическому деформированию происходит поцикловое перераспределение напряжений и деформаций между отдельными зонами. В стыковом соединении низкоуглеродистой стали Ст3Гпс деформации наиболее заметно нарастают в основном металле, тогда как вблизи выпуклости шва и в металле зоны термического влияния их изменения при циклическом нагружении невелики

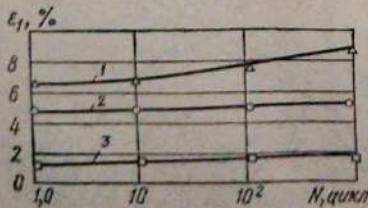


Рис. 8.30. Поцикловая кинетика деформаций стыкового соединения стали Ст3Гпс:

1 — основной металл; *2* — область перехода шва на основной металл; *3* — зона термического влияния.

(рис. 8.30). Поэтому отмеченная выше особенность преимущественного деформирования основного металла соединения сохраняется. В данном случае поцикловое перераспределение деформаций и напряжений между отдельными зонами соединений существенного влияния на их долговечность не оказывает.

Более интенсивно напряжения и деформации перераспределяются в гладких сварных образцах с контрастными свойствами отдельных зон [47]. Например, металл шва циклически разупрочняемой стали 15Х2МФА, сваренного высоконикелевой проволокой ЭП787, при циклическом деформировании интенсивно упрочняется. При циклическом нагружении данного соединения деформации в основном металле нарастают, а в металле шва уменьшаются (рис. 8.31).

Интенсивный характер процесса перераспределения деформаций приводит к тому, что после 100 полуциклов нагружения деформации основного металла оказываются более высокими, чем деформации мягкой прослойки металла шва. Вследствие этого разрушение соединений локализуется в циклически разупрочняемом основном металле. Вместе с тем в реальных соединениях эффекты перераспределения напряжений и деформаций в значительной мере затеняются наличием концентраторов напряжений, ответственных за усталост-

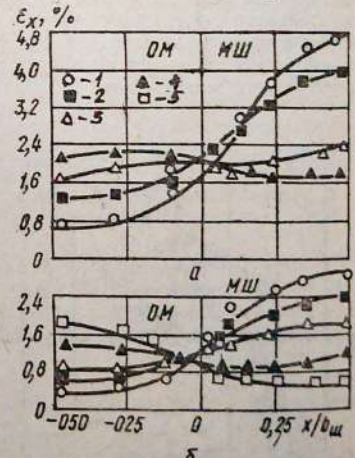


Рис. 8.31. Перераспределение деформаций в стыковом соединении стали 15Х2МФА:

а — $\varepsilon_{xcp} = 1$ %; *б* — $\varepsilon_{xcp} = 0{,}67$ %; *1* — $N = 0$; *2* — $N = 1$; *3* — $N = 5$; *4* — $N = 50$; *5* — $N = 500$.

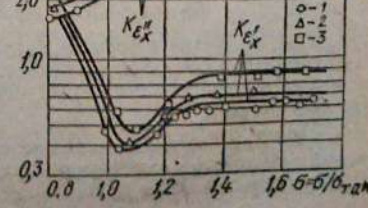


Рис. 8.32. Изменение коэффициентов K_{ε_x} и K_{ε_x} для стыковых (*1*), тавровых (*2*) и нахлесточных (*3*) соединений низкоуглеродистых сталей.

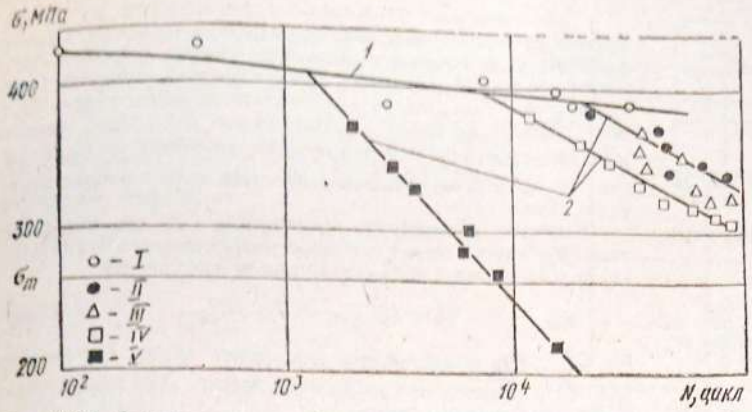


Рис. 8.33. Сопротивление соединений низкоуглеродистой стали М16С квазистатическим (*1*) и усталостным (2) разрушениям:

I — основной металл; *II* — стыковое соединение; *III* — тавровое соединение; *IV*, *V* — нахлесточное двух- и одностороннее соединение соответственно ($R_\sigma = 0$).

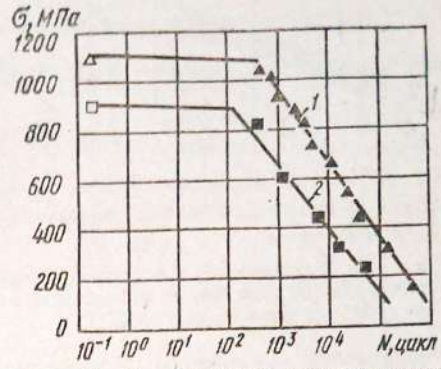


Рис. 8.34. Квазистатические и усталостные разрушения тавровых (*1*) и крестообразных (*2*) соединений высокопрочной стали 12ХГН2МФДРА ($R_\sigma = 0$).

ное разрушение всего соединения. Поэтому в большинстве случаев при расчетном определении долговечности пошикловое перераспределение напряжений и деформаций между отдельными зонами соединений не учитывают.

Отмеченные особенности упруго-пластического деформирования соединений приводят к изменению коэффициентов концентрации деформаций. С переходом в пластическую стадию нагружения данные коэффициенты, определяемые как отношение деформаций у выпуклости шва к деформациям в основном металле K_{ε_x}', для соединений низкоуглеродистых сталей уменьшаются до значений 0,35—0,45 (рис. 8.32). При дальнейшем нагружении вследствие появления развитых пластических деформаций у выпуклости шва и во всей зоне термического влияния коэффициент K_{ε_x}' несколько повышается с последующей стабилизацией на уровне, не достигающем единицы. Такое изменение коэффициента K_{ε_x}', по существу, означает, что область перехода шва на основной металл по отношению к последнему не является концентратором деформаций.

Применительно к усталостным процессам оценку коэффициентов концентрации деформаций соединений необходимо проводить путем сопоставления деформаций у выпуклости шва с деформациями в зоне термического влияния (K_{ε_x}''). При таком определении коэффициентов концентрации деформаций влияние на них неоднородности свойств различных участков соединений в значительной мере устраняется. Изменение коэффициентов K_{ε_x}'' с повышением уровня нагружения имеет обычный вид, характерный для механически однородных надрезанных образцов (см. рис. 8.32). С переходом в упруго-пластическую стадию нагружения значения данного коэффициента несколько повышаются с последующей стабилизацией в области развитых пластических деформаций. Экспериментально установленные значения коэффициентов K_{ε_x}' и K_{ε_x}'' для некоторых основных видов соединений низкоуглеродистых сталей М16С и Ст3Гпс приведены в табл. 8.5.

Для соединений низколегированных сталей коэффициент K_{ε_x}'' вследствие его слабой чувствительности к неоднородности механических свойств принимает значения, близкие к приведенным в табл. 8.5. Указанные значения коэффициента концентрации деформаций K_{ε_x}'' могут быть рекомендованы для использования в расчетах долговечности соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Сопротивление соединений квазистатическим и усталостным разрушениям. В отличие от гладких образцов и элементов конструкций в сварных соединениях переход от квазистатических разрушений к усталостным сопровождается сменой зоны их локализации (рис. 8.33). Квазистатические разрушения соединений низкоуглеродистой стали М16С происходят вдали от шва, на основном металле. Данная особенность разрушения характерна для соединений различных видов, включая стыковое, тавровое, нахлесточное двух- и одностороннее. Наблюдаемые в пределах зоны термического влияния низколегированных сталей средней и повышенной прочности небольшие по протяженности разупрочненные участки не снижают разрушающих напряжений соединений вследствие эффектов контактного упрочнения. Поэтому статические и квазистатические разрушения соединений сталей данных классов происходят также по основному металлу. Это справедливо при обеспечении статической равнопрочности соединений. В противном случае несущая способность соединений в квазистатической области определяется характеристиками наименее статически прочной зоны. Обычно это имеет место в соединениях с «мягкими» стыковыми швами, а также при заниженных размерах нагруженных угловых швов. В последнем случае разрушение происходит путем среза по телу углового шва или его подошве, как, например, в крестообразных соединениях высокопрочной стали 12ХГН2МФДРА, выполненных ручной сваркой. Недостаточные размеры швов приводят к соответствующему понижению разрушающих напряжений во всем диапазоне квазистатических разрушений (рис. 8.34).

По числу циклов область квазистатических разрушений может быть достаточно протяженной. В зависимости от вида соединения, уровня прочности стали, асимметрии нагружения она простирается до 10^2 — 10^5 перемен напряжений. Результаты испытаний, относящиеся к данной области, описываются степенным уравнением вида

$$\sigma_{max} N^{m_\sigma^к} = C_\sigma^к, \qquad (8.16)$$

где N — максимальн ое число циклов до разрушения; $m_\sigma^к$ — показатель степени; $C_\sigma^к$ — постоянная, численно равная

Таблица 8.5. Коэффициенты концентрации деформаций соединений низкоуглеродистых сталей

Соединение	K_{ε_x}'	K_{ε_x}''
Стыковое	0,60—0,65	2,5—2,8
Тавровое	0,65—0,70	2,8—3,2
Нахлесточное двухстороннее	0,85—0,90	3,5—3,9

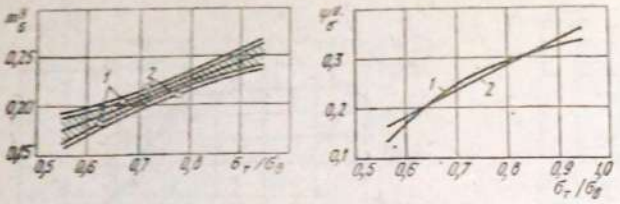


Рис. 8.35. Доверительные области уравнения регрессии $m_\sigma^y = f(\sigma_т/\sigma_в)$ для соединений различных видов:
1 — $P = 95$ %; 2 — $P = 99$ %.

Рис. 8.36. Зависимость коэффициента чувствительности к асимметрии нагружения от механических свойств стали (1) и ее линейная аппроксимация (2).

разрушающему напряжению при однократном приложении нагрузки, $C_\sigma^к = \sigma_в^c$ ($\sigma_в^c$ — временное сопротивление соединения). Тогда выражение (8.16) преобразуется к виду

$$\sigma_{max} N^{m_\sigma^к} = \sigma_в^c \qquad (8.17)$$

или

$$N = (\sigma_в^c/\sigma_{max})^{1/m_\sigma^к}. \qquad (8.18)$$

Чтобы определить значение параметра $m_\sigma^к$, была выполнена статистическая обработка результатов ряда испытаний, позволившая получить уравнение регрессии, устанавливающее зависимость данного параметра от отношения $\sigma_т/\sigma_в$. Для отнулевого цикла нагружения уравнение приобрело вид

$$m_\sigma^к = 0{,}042\,(1 - \sigma_т/\sigma_в). \qquad (8.19)$$

Коэффициент корреляции в данном случае составлял 0,925.

Из уравнения (8.19) следует, что с повышением механических свойств стали и при соответствующем увеличении отношения $\sigma_т/\sigma_в$ показатель степени $m_\sigma^к$ уменьшается, отражая тенденцию к сужению по напряжениям квазистатической области нагружения.

Усталостные разрушения сварных соединений неизменно локализуются в зоне повышенной концентрации напряжений и деформаций. Вследствие этого переход от квазистатических к усталостным разрушениям на кривой усталости выражается резким изменением угла наклона (см. рис. 8.34). Если квазистатический участок является пологим, то для усталостного характерно заметное увеличение крутизны.

Основным фактором, определяющим положение верхней точки перелома кривой усталости и всего ее крутопадающего участка, является уровень концентрации напряжений и деформаций. Высокая концентрация напряжений, характерная для нахлесточных и крестообразных соединений с неполным проплавлением, обусловливает более низкие их долговечности в диапазоне усталостных разрушений (см. рис. 8.33 и 8.34).

Результаты экспериментальных исследований, относящиеся к усталостному участку кривой ограниченной долговечности, достаточно надежно описываются степенным уравнением, аналогичным по структуре соотношению (8.17),

$$\sigma N^{m_\sigma^y} = C_\sigma^y, \qquad (8.20)$$

где σ — максимальные или амплитудные значения напряжений; m_σ^y, C_σ^y — константы.

Наиболее важное значение имеет показатель степени m_σ^y, определяющий темп снижения сопротивления усталостным разрушениям с ростом числа циклов нагружения. В ряде работ, посвященных расчету сварных соединений на усталость, принимается независимость угла наклона усталостного участка от прочности стали [63—65]. Известно и противоположное суждение, когда наклон кривой усталости для сталей различных классов прочности принимается неодинаковым [66].

Применительно к различным соединениям и классам прочности стали предложена обобщающая зависимость коэффициента угла наклона усталостного участка кривой $\sigma(N)$ от механических свойств стали для соединений рассмотренных видов (табл. 8.6). Доверительные области данного уравнения представлены на рис. 8.35. Повышение показателя степени m_σ^y свидетельствует об увеличении крутизны усталостного участка кривой ограниченной долговечности с ростом прочности стали.

Влияние асимметрии нагружения на сопротивление усталости учитывается с помощью коэффициента чувствительности соединения к асимметрии цикла нагружения:

$$\psi_\sigma^y = (2C_{\sigma-1}^y - C_{\sigma 0}^y)/C_{\sigma 0}^y, \qquad (8.21)$$

где $C_{\sigma-1}^y$, $C_{\sigma 0}^y$ — постоянные уравнения (8.20) для симметричного и отнулевого циклов нагружения. Для любой асимметрии нагружения имеем

$$C_{\sigma a,R}^y = C_{\sigma a,0}^y\,(1 + \psi_\sigma^y R_\sigma). \qquad (8.22)$$

В выражении (8.22) постоянная $C_{\sigma a,R}^y$ описывает результаты испытаний в амплитудах переменных напряжений. Наблюдаемый нелинейный характер зависимости коэффициента чувствительности к асимметрии нагружения ψ_σ^y от механических свойств стали (рис. 8.36) с достаточным для практических целей приближением описывается уравнением

$$\psi_\sigma^y = 0{,}44\sigma_т/\sigma_в - 0{,}08. \qquad (8.23)$$

На основе соотношений (8.22), (8.23) и приведенных в табл. 8.6 зависимостей $m_\sigma^y = f(\sigma_т/\sigma_в)$ осуществляется оценка параметров уравнения (8.20), описывающего долговечность соединений в усталостной области при различной асимметрии нагружения.

На практике сварные соединения выполняются по различным технологическим вариантам. Как известно, к наиболее употребительным, помимо ручной сварки, относятся механизированная сварка под флюсом, в среде защитных газов и порошковой проволокой, электрошлаковая и электронно-лучевая. В области квазистатических разрушений несущая способность соединения, выполненного тем или иным способом сварки, в общем случае определяется механическими

Таблица 8.6. Зависимость m_σ^y от механических свойств стали для различных соединений

Соединение	R_σ	m_σ^y	Коэффициент корреляции	Объем выборки серии опытов
Стыковое	0	$0{,}15\,\frac{\sigma_т}{\sigma_в} + 0{,}09$	0,64	58
	−1	$0{,}23\,\frac{\sigma_т}{\sigma_в} + 0{,}01$	0,57	23
Тавровое и крестообразное с полным проплавлением	0	$0{,}22\,\frac{\sigma_т}{\sigma_в} + 0{,}05$	0,70	52
	−1	$0{,}27\,\frac{\sigma_т}{\sigma_в} + 0{,}11$	0,74	14
Нахлесточное и крестообразное	0	$0{,}19\,\frac{\sigma_т}{\sigma_в} + 0{,}07$	0,64	37
	−1	$0{,}22\,\frac{\sigma_т}{\sigma_в} + 0{,}08$	0,12	18
Соединения всех видов	—	$0{,}18\,\frac{\sigma_т}{\sigma_в} + 0{,}07$	0,61	140

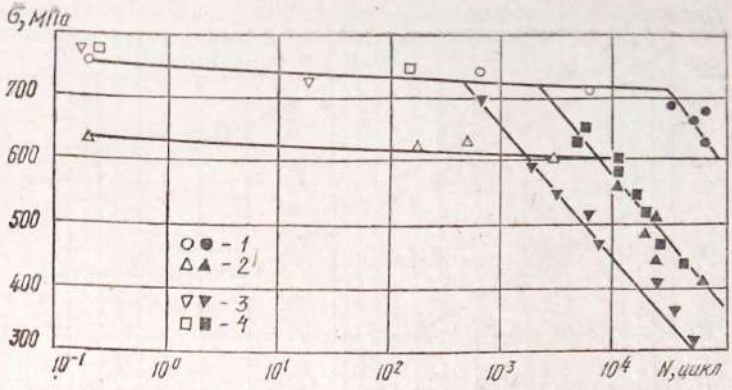


Рис. 8.37. Долговечность стыковых соединений стали 13ХГМФ, выполненных различными способами сварки:

1 — основной металл; *2* — сварка ручная (ρ = 1,9 мм); *3* — сварка под флюсом (ρ = 0,9 мм); *4* — сварка электрошлаковая (ρ = 2,0 мм); светлые значки — квазистатическое разрушение; темные значки — усталостное разрушение.

свойствами наиболее «слабой» из зон. Однако наблюдаемые в зоне термического влияния низколегированных сталей мягкие прослойки обычно не снижают несущей способности вследствие эффектов контактного упрочнения прилегающими участками с более высокими характеристиками статической прочности [67]. Когда обеспечивается статическая равнопрочность, долговечность соединения в данной области нагружения определяется свойствами основного металла (см. рис. 8.33, 8.34).

В малоцикловой области усталостных разрушений определяющую роль в снижении долговечности играет концентрация напряжений и деформаций, вызываемая конфигурацией швов. Наклонные участки кривых усталости располагаются в соответствии с уровнем концентрации напряжений и деформаций соединения (рис. 8.37). Исходя из общих представлений о релаксации остаточных напряжений с ростом внешней нагрузки, их роль в области малоциклового нагружения принято считать малозаметной. Снижение влияния остаточных растягивающих напряжений на долговечность сварных образцов с переходом в область малоциклового нагружения подтверждается экспериментально [68]. Тем более они не приводят к изменению несущей способности и долговечности на участке квазистатического разрушения, поскольку в этой области развиваются пластические деформации по всему поперечному сечению изделия или образца.

8.4. СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В МНОГОЦИКЛОВОЙ ОБЛАСТИ

Основными факторами, изменяющими сопротивление усталости сварных соединений в многоцикловой области, являются концентрация напряжений, обусловленная формой швов или технологическими дефектами, и сварочные остаточные напряжения. Однако при экспериментальном определении характеристик сопротивления усталости второму фактору зачастую уводится второстепенная роль. Испытываемые образцы, как правило, имеют небольшие размеры. Они вырезаются из предварительно сваренной общей заготовки и воспроизводят лишь форму соединения. Остаточные напряжения в них значительно ниже, чем в сварных узлах реальных конструкций. Поэтому в ряде случаев использование характеристик сопротивления усталости сварных соединений, установленных без учета влияния остаточных напряжений, может приводить к существенным погрешностям при расчетной оценке несущей способности сварных конструкций. В то же время в коротких стыковых и поперечных угловых швах, тонких сварных элементах, при сварке с подогревом, соединениях, выполненных контактной сваркой, и во всех других случаях, когда имеется уверенность, что начальные растягивающие остаточные напряжения сравнительно невелики, для оценки сопротивления усталости соединений можно использовать результаты испытаний небольших образцов, в которых воспроизводилась только форма соединений. Ниже приводятся результаты усталостных испытаний, полученных с учетом и без учета влияния сварочных остаточных напряжений.

Предел выносливости соединений с высокими остаточными напряжениями. Наиболее полные данные о сопротивлении усталости сварных соединений с учетом влияния растягивающих остаточных напряжений были получены в ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины [13, 23, 70, 72, 74]. Основная цель этих исследований состояла в получении значений пределов выносливости основных типов соединений низкоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей с учетом изменения сопротивления усталости сварных образцов под действием конструктивно-технологических факторов и остаточных напряжений, а также возможного влияния химического состава, способа раскисления стали, ее термообработки, формы разделки кромок под сварку, применяемых сварочных материалов и режимов сварки.

Образцы имели достаточное сечение (200×26, 300×26, 160×30 и 200×46 мм) для того, чтобы растягивающие оста-

Таблица 8.7. **Предел выносливости необработанных стыковых соединений низколегированных сталей с высокими остаточными напряжениями** [13, 70]*

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	Сечение образца, мм	R_σ	База испытаний, циклы	σ_R, МПа
14Г2	372	614	200×30	—1,0	$2\cdot10^6$	70
15ГС рафинированная	398	622	200×30	—1,0	$2\cdot10^6$	80
15Г2С	492	617	200×30	+0,75	$5\cdot10^6$	235
10ХСНД термообработанная	442	601	200×26	—1,0	$1\cdot10^7$	60
	442	601	200×26	0,0	$1\cdot10^7$	140
15ХСНД	439	584	200×30	—1,0	$2\cdot10^6$	70
09Г2С	339	518	200×26	—1,0	$1\cdot10^7$	80
	339	518	200×26	0,0	$1\cdot10^7$	160
10Г2СД	340	520	200×26	—1,0	$1\cdot10^7$	70
	340	520	200×26	0,0	$1\cdot10^7$	160
10Г2СД термоупрочненная	397	553	200×26	—1,0	$2\cdot10^7$	70
10Г2С1 термоупрочненная	378	532	200×26	—1,0	$1\cdot10^7$	70
18Г2АФпс **	512	645	200×30	—1,0	$5\cdot10^6$	70

* Здесь и в табл. 8.8 соединения выполнены автоматической сваркой, разделка кромок V-образная.

** По данным [72, 74].

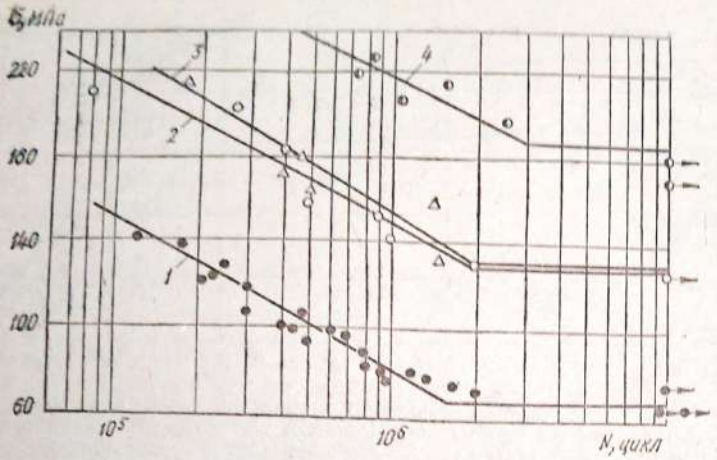


Рис. 8.38. Результаты усталостных испытаний стыковых соединений низкоуглеродистой стали М16С:
1 — симметричный цикл напряжений; *2* — отнулевой цикл напряжений, изгиб; *3* — то же, растяжение; *4* — асимметричный цикл напряжений ($R_\sigma = 0{,}3$).

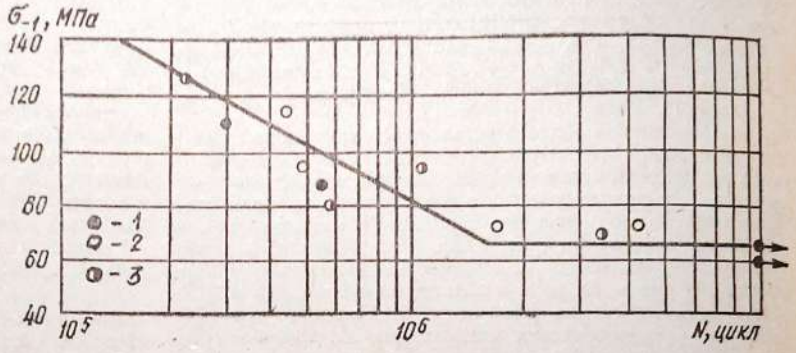


Рис. 8.39. Результаты усталостных испытаний стыковых соединений термически упрочненной стали 10Г2С1, выполненных на режимах с тепловложениями:
1 — 2095 кДж/м; *2* — 4609 кДж/м; *3* — 6704 кДж/м.

точные напряжения могли достигать своих предельных значений, а при испытаниях на изгиб не проявлялся эффект поддерживающих сил. В пластинах сохранялась черная поверхность. Каждый образец сваривался отдельно. Начало и конец стыкового шва располагались на выводных планках, предварительно приваренных к пластинам вручную. Сварка стыков выполнялась механизированным способом под флюсом. После сварки удалялись выводные планки и строгались кромки пластин. Образцы с поперечными и продольными угловыми швами сваривались вручную. При изготовлении образцов из низкоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей использовались сварочные материалы, рекомендуемые нормативными документами для сварки соответствующих сталей. По качеству соединения удовлетворяли требованиям, установленным для ответственных конструкций при обычном способе контроля.

Образцы испытывались при осевом нагружении и на плоский изгиб до образования в них усталостных трещин глубиной 2—3 мм. Каждый вид соединения испытывался при нескольких характеристиках цикла: симметричном, отнулевом и асимметричном.

Как правило, трещины усталости во всех образцах зарождались в зонах, где растягивающие остаточные напряжения достигали наибольших значений.

Большого рассеяния результатов усталостных испытаний не наблюдалось (рис. 8.38), особенно при $R_\sigma = -1$, несмотря на то что стыки выполнялись с различной формой разделки кромок и в пределах допуска швы имели разную выпуклость. Коэффициент корреляции совокупности результатов усталостных испытаний, относящихся к $R_\sigma = -1$, составлял 0,965. По-видимому, роль упомянутых факторов заметно уменьшается на фоне сильного влияния остаточных напряжений.

Пределы выносливости стыковых соединений низкоуглеродистой стали М16С при симметричном ($R_\sigma = -1$), отнулевом ($R_\sigma = 0$) и асимметричном ($R_\sigma = +0{,}3$) циклах равны соответственно 69, 130 и 186 МПа.

Не оказывает заметного влияния на сопротивление усталости и способ раскисления стали. Выполненные испытания стыковых соединений низкоуглеродистых сталей Ст3сп и стали Ст3Гпс [72, 74] показали такое же сопротивление усталости, как и соединения стали М16С. Пределы выносливости, установленные при $R_\sigma = -1$ на базе 10 млн циклов, оказались равными 70 МПа, т. е. практически не отличимы от предела выносливости стыкового соединения низкоуглеродистой стали М16С.

Стыковые соединения в металлоконструкциях часто пересекаются продольными швами (например, угловыми в сварных двутавровых балках). В ряде случаев наложение этих швов может изменить эпюру остаточных напряжений стыка и понизить его сопротивление усталости. Испытания образца из низкоуглеродистой стали М16С с пересекающимися швами показали, что их предел выносливости при симметричном цикле снижается до 52 МПа, а при отнулевом — до 106 МПа [13].

Пределы выносливости стыковых соединений низколегированных сталей при соответствующих характеристиках цикла практически не различаются между собой (табл. 8.7), несмотря на то что при их сварке применялись существенно отличные сварочные материалы (например, при сварке образцов из сталей 10Г2СД, 09Г2С, 10Г2С1). В исследованной области переменных напряжений термически упрочненные стали, так же, как полуспокойная и сталь, прошедшая рафинирование синтетическим шлаком, не показали заметного изменения сопротивления усталости. Варьирование режимов сварки также не приводит к заметному изменению сопротивления усталости. Например, для термически упрочненных сталей, у которых механические свойства упрочненного металла, прилегающего к шву, существенно изменяются и зависят от погонной энергии сварки, долговечности и пределы выносли-

Таблица 8.8. **Предел выносливости необработанных стыковых соединений высокопрочных сталей с высокими остаточными напряжениями** [13, 70]

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	Сечение образца, мм	R_σ	База испытаний, циклы	σ_R, МПа
14ХМНДФР	777	836	200×30	—1,0	$1\cdot10^7$	70
	777	836	160×30	+0,5	$5\cdot10^6$	262
	777	836	160×30	+0,75	$5\cdot10^6$	460
15ХГ2СМФР	738	872	200×30	—1,0	$1\cdot10^7$	70
14Х2ГМР	762	830	80×12*	—1	$3\cdot10^6$	70
Опытная	1000	—	100×20*	—1	$3\cdot10^6$	70
	1000	—	100×30*	—1	$3\cdot10^6$	70
	1000	—	100×20*	0,0	$2\cdot10^6$	110
	1000	—	100×30*	+0,6	$3\cdot10^6$	340

Примечания. 1. Звездочкой отмечены образцы с продольными наплавками. 2. Образец сечением 80 × 12 — без разделки кромок.

вости оказались одинаковыми. В частности, это подтверждается результатами испытаний стыковых соединений термоупрочненной стали 10Г2С1, сваренных на трех режимах механизированной сваркой под флюсом (рис. 8.39). Как видно из рисунка, изменение погонной энергии при сварке от 2095 до 6704 кДж/м практически не привело к изменению сопротивления усталости стыковых соединений термически упрочненной стали.

Расхождение пределов выносливости стыковых соединений из исследованных низколегированных сталей не превышает 10—20 МПа и может быть отнесено за счет рассеяния результатов усталостных испытаний. В ряде случаев оно соизмеримо с точностью определения напряжений в испытываемых образцах. Поэтому при высокой остаточной напряженности для стыковых сварных соединений низколегированных сталей различных марок более обоснованно принимать одинаковые пределы выносливости. Приведенные в табл. 8.7 данные позволяют рекомендовать следующие средние значения $\sigma_{-1} = 75$ МПа, $\sigma_0 = 155$ МПа, $\sigma_{+0,5} = 235$ МПа.

Значения пределов выносливости стыковых соединений высокопрочных сталей приведены в табл. 8.8. Из таблицы видно, что в диапазоне изменения коэффициента асимметрии цикла от —1,0 до 0,0 высокопрочные стали не обладают преимуществами перед низкоуглеродистыми и низколегированными. Наблюдаемое выравнивание пределов выносливости сварных соединений объясняется не только повышенной

Таблица 8.9. **Предел выносливости необработанных нахлесточных соединений низкоуглеродистых сталей с поперечными угловыми швами** [13, 72, 74]

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	Сечение образца, мм	R_σ	База испытаний, циклы	σ_R, МПа
М16С	268	448	200×30	—1,0	$1\cdot10^7$	40
	268	448	200×30	0,0	$1\cdot10^7$	90
	268	448	200×30	+0,3	$1\cdot10^7$	120
	252	432	160×30	0,0	$3\cdot10^6$	90
Ст3кп	305	470	200×30	—1,0	$1\cdot10^7$	40
Ст3пс	285	465	200×30	—1,0	$1\cdot10^7$	40
Ст3сп	330	485	200×30	—1,0	$1\cdot10^7$	40
Ст3кп	305	470	200×30	0,0	$1\cdot10^7$	100
Ст3пс	285	465	200×30	0,0	$1\cdot10^7$	100
Ст3сп	330	485	200×30	0,0	$1\cdot10^7$	100
	240	438	150×65	—1,0	$4\cdot10^6$	40
Ст3Гпс	230	443	150×65	—1,0	$4\cdot10^6$	40

Примечание. Соединения выполнены ручной сваркой.

Таблица 8.10. **Предел выносливости необработанных нахлесточных соединений низколегированных сталей с поперечными угловыми швами**

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	Сечение образца, мм	R_σ	σ_R, МПа	Литературный источник
14Г2	372	614	200×30	+0,3	130	[13, 70]
10Г2СД	340	520	200×26	—1,0	40	[13, 70]
09Г2С	339	518	200×26	—1,0	40	[13, 70]
	339	518	200×26	0,0	95	[13, 70]
10Г2СД термоупрочненная	397	532	200×26	—1,0	35	[13, 70]
	397	532	200×26	0,0	110	[13, 70]
10ХСНД термообработанная	442	601	200×26	—1,0	40	[13, 70]
	442	601	200×26	0,0	100	[13, 70]
18Г2АФпс	512	645	200×30	—1,0	40	[13, 70]
15Г2АФДпс	428	594	200×30	—1,0	40	[72, 74]
18Г2АФДпс	428	594	200×30	—1,0	40	[72, 74]
18Г2АФМпс	503	602	200×30	—1,0	45	[72, 74]

Примечание. Соединения выполнены ручной сваркой. База испытаний составляет $1\cdot10^2$ циклов.

чувствительностью к концентрации напряжений более прочных сталей, но и влиянием остаточных напряжений [13], которые возрастают пропорционально пределу текучести основного материала.

Средние значения пределов выносливости нахлесточных соединений низкоуглеродистых сталей с поперечными угловыми швами (табл. 8.9) составляют $\sigma_{-1} = 40$ МПа; $\sigma_0 = 90...100$ МПа; $\sigma_{+0,3} = 120$ МПа. При этом сварные соединения спокойных (М16С, Ст3сп), полуспокойных (Ст3пс, Ст3Гпс) и кипящей (Ст3кп) сталей при соответствующих значениях R_σ имеют практически одинаковые значения пределов выносливости.

Нахлесточные соединения с поперечными угловыми швами независимо от марки низколегированной стали и способа ее раскисления имеют практически одинаковое сопротивление усталости при соответствующих значениях R_σ (табл. 8.10). Расхождение пределов выносливости составляет 5—15 МПа. Приведенные в таблице данные позволяют рекомендовать следующие значения пределов выносливости соединений низколегированных сталей с поперечными угловыми швами: $\sigma_{-1} = 40$ МПа, $\sigma_0 = 100$ МПа и $\sigma_{+0,3} = 130$ МПа.

Нахлесточные соединения высокопрочных сталей с поперечными угловыми швами в диапазоне изменения R_σ от —1,0 до +0,6 не обладают преимуществами по сопротивлению

Таблица 8.11. **Предел выносливости необработанных нахлесточных соединений высокопрочных сталей с поперечными угловыми швами**

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	Сечение образца, мм	R_σ	База испытаний, циклы	σ_R, МПа	Литературный источник
14ХМНДФР	777	836	200×30	—1,0	$1\cdot10^7$	40	[13]
	777	836	200×30	+0,3	$1\cdot10^7$	120	[13]
Опытная	1000	—	100×30	—1,0	$2\cdot10^6$	40	Данные ИЭС АН Украины
	1000	—	100×30	+0,6	$3\cdot10^6$	220	То же

Примечания. 1. Соединения выполнены ручной сваркой. 2. Образец сечением 100 × 30 — с продольной наплавкой.

Таблица 8.12. Средние значения предела выносливости основных типов сварных соединений низкоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей, МПа, с учетом влияния остаточных напряжений

Соединение	Сталь	R_σ					
		−1,0	0	+0,3	+0,5	+0,6	+0,75
Стыковое	Низкоуглеродистая	69	130	186	—	—	—
	Низколегированная	75	155	—	235	—	—
	Высокопрочная	70	110	—	262	340	460
Стыковое с продольными швами	Низкоуглеродистая	52	106	—	—	—	—
Прикрепление фасонок встык	»	55	110	—	—	—	—
Нахлесточное:							
с поперечными угловыми швами (прикрепление планок и других вспомогательных элементов)	»	40	95	120	—	—	—
	Низколегированная	40	100	130	—	—	—
	Высокопрочная	40	—	120	—	220	—
с обваркой по контуру	Низкоуглеродистая	35	68	—	—	—	—
с фланговыми швами	»	23	58	78	—	120	—

усталости (табл. 8.11) перед однотипными соединениями низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Наиболее низким сопротивлением усталости отличаются нахлесточные соединения с фланговыми швами. Трещины усталости в таких соединениях, как правило, возникают в основном металле у концов фланговых швов и распространяются под прямым углом к поверхности пластин. При отнулевом цикле пределы выносливости нахлесточных соединений с фланговыми швами (низкоуглеродистые стали) составляют 55 и 60 МПа. При асимметричных циклах их значения достигают $\sigma_{+0,3} = 78$ МПа и $\sigma_{+0,6} = 120$ МПа. При симметричном цикле предел выносливости равен $\sigma_{-1} = 23$ МПа.

Обварка по контуру способствует более равномерному распределению силового потока в нахлесточных соединениях. Концентрация напряжений снижается примерно на 20—30 %. Вследствие этого возрастают пределы выносливости нахлесточного соединения с обваркой по контуру по сравнению с пределами выносливости соединения с фланговыми швами. При симметричном цикле напряжений предел выносливости соединения (сталь М16С) повышается до 35 МПа, при отнулевом — до 68 МПа [13].

Еще большее повышение сопротивления усталости наблюдается при переходе к соединениям, воспроизводящим прикрепления продольными швами к кромкам несущих элементов фасонок со скосами под углом 45°. Такие соединения низкоуглеродистой стали М16С (ручная сварка), имеющие по концам швов достаточно плавный переход на основной металл, дают следующие значения пределов выносливости [13]: $\sigma_{-1} = 55$ МПа и $\sigma_0 = 110$ МПа. Характерно, что усталостные трещины у данного вида соединения зарождаются в наплавленном металле вблизи концов швов. При дальнейшем развитии трещины переходят в основной металл.

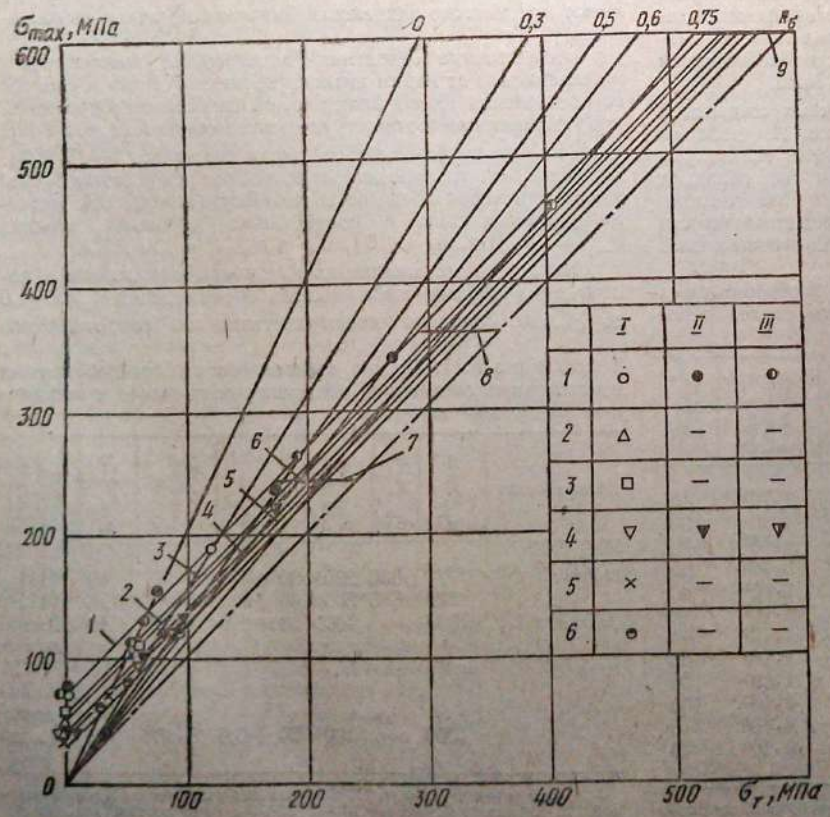


Рис. 8.40. Диаграммы предельных напряжений цикла основных типов сварных соединений низкоуглеродистых (*I*), низколегированных (*II*) и высокопрочных (*III*) сталей:

1 — стыковое; *2* — стыковое, пересекаемое продольными швами; *3* — прикрепление фасонок встык; *4* — нахлесточное с поперечными угловыми швами; *5* — нахлесточное с обваркой по контуру; *6* — нахлесточное с фланговыми швами; *7, 8, 9* — предельные статические напряжения соответственно низкоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей.

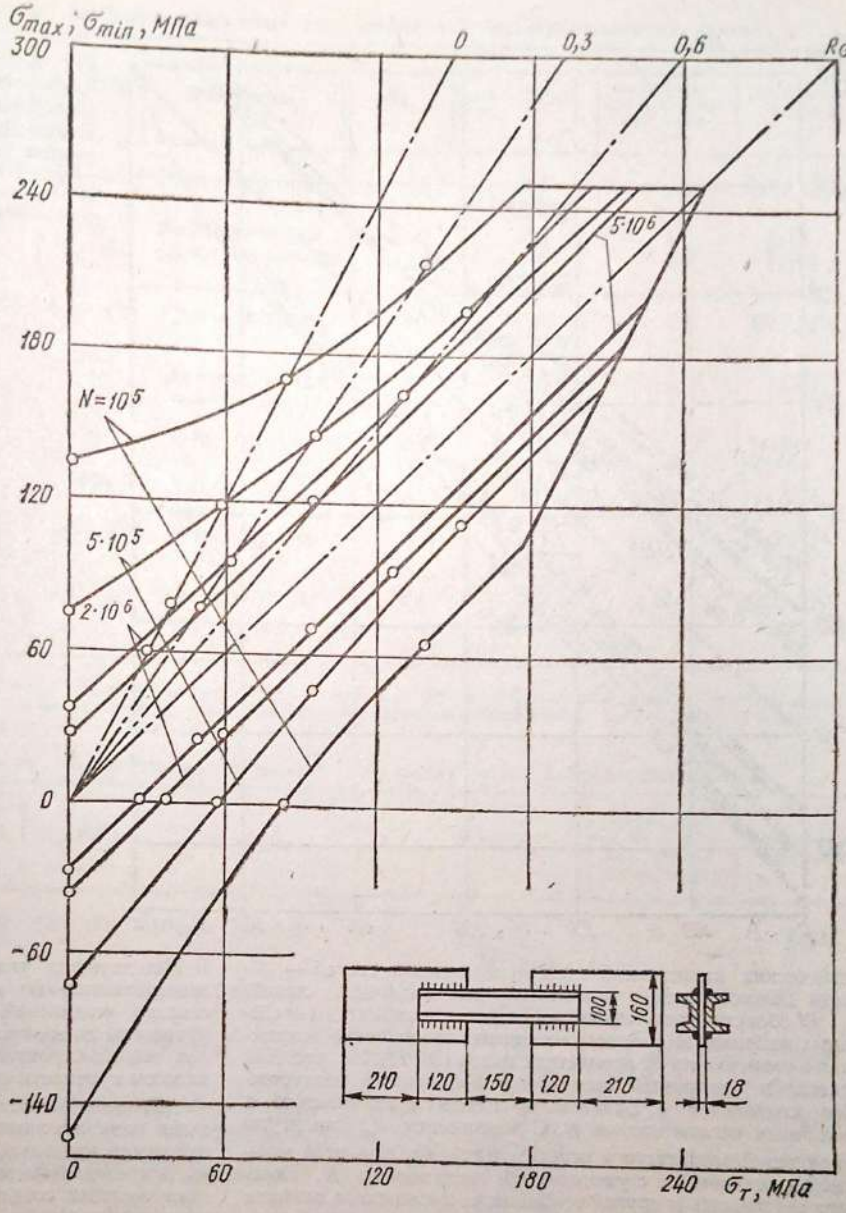


Рис. 8.41. Диаграммы предельных напряжений цикла нахлесточного соединения с фланговыми швами, соответствующие различным числам циклов.

Независимость сопротивления усталости необработанных соединений от прочности основного металла и полученные при различных характеристиках цикла средние значения пределов выносливости (табл. 8.12) позволяют представить диаграммы основных типов сварных соединений низкоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей в совмещенном виде.

На обобщенной диаграмме (рис. 8.40) линии предельных напряжений цикла, относящиеся к различным сталям, совпадают и каждая из них является продолжением предыдущей, отражающей сопротивление усталости соединения менее прочного материала. В исследованном диапазоне R_σ линии предельных напряжений цикла сварного соединения сталей различных классов прочности наклонены под углом 45° к оси абсцисс. Это указывает на то, что предельные амплитуды σ_a не зависят от среднего напряжения цикла σ_m. Для сварных соединений с высокими остаточными напряжениями амплитуды предельных напряжений цикла σ_a, установленные при испытании крупномасштабных образцов по критерию начальной стадии разрушения, остаются постоянными во всем диапазоне максимальных напряжений и не зависят от класса прочности стали.

Области рационального применения в сварных конструкциях сталей различных классов прочности могут быть определены из обобщенной диаграммы предельных напряжений (см. рис. 8.40). При отрицательных и небольших положительных значениях R_σ всем сталям отвечают одни и те же линии предельных напряжений цикла. Поэтому в области переменных напряжений, ограниченной горизонтальной прямой, соответствующей предельным статическим напряжениям низкоуглеродистых сталей, нецелесообразно использовать более прочные стали.

Области рационального применения низколегированных и высокопрочных сталей определяются на диаграмме точками пересечения линии предельных переменных напряжений с горизонтальными прямыми, соответствующими предельным напряжениям низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Выше уровня предельных статических напряжений низкоуглеродистых сталей лежит область рационального использования низколегированных сталей, а выше предельных

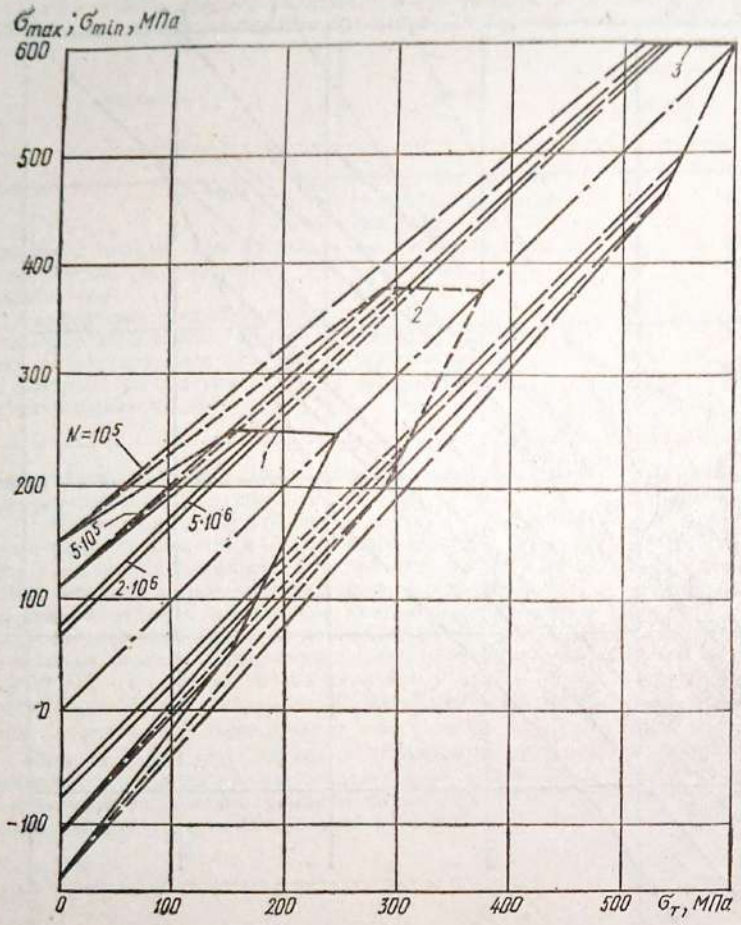


Рис. 8.42. Диаграммы предельных напряжений цикла стыкового соединения низкоуглеродистых (сплошные кривые), низколегированных (штриховые кривые) и высокопрочных (штрих-пунктирные кривые) сталей:

1, 2, 3 — предельные статические напряжения соответственно низкоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей.

статических напряжений низколегированных сталей — область целесообразного применения высокопрочных сталей.

В области ограниченной долговечности амплитуды предельных напряжений сварного соединения существенно изменяются в зависимости от асимметрии цикла [36, 73]. На рис. 8.41 приведены диаграммы предельных напряжений нахлесточного соединения с фланговыми швами применительно к различным числам циклов N. С понижением R_σ амплитуды напряжений возрастают и относительное влияние этой зависимости усиливается с уменьшением числа циклов N. Перестает действовать и другая особенность, касающаяся влияния прочности материала. В области ограниченной долговечности сопротивление усталости сварных соединений заметно увеличивается с повышением прочности основного металла. На рис. 8.42 совмещены диаграммы предельных напряжений цикла стыкового соединения сталей различной прочности, отвечающие значениям N $1 \cdot 10^5$, $5 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^6$ и $N \geqslant 5 \cdot 10^6$ циклов.

Если при симметричном цикле напряжений соединения низкоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей показывают одинаковые предельные напряжения при соответствующих значениях N, то по мере увеличения значения коэффициента асимметрии цикла линии предельных напряжений расходятся, указывая на преимущества сталей с более высокой прочностью. Диаграммы предельных напряжений позволяют определять области целесообразного применения в сварных конструкциях сталей повышенной и высокой прочности не только в зависимости от асимметрии цикла при $N \geqslant 2 \cdot 10^6 \ldots 5 \cdot 10^6$ циклов, но и в случае ограниченной долговечности ($N < 2 \cdot 10^6$). Результаты проведенных исследований позволили построить подобные диаграммы предельных напряжений и для других типов сварных соединений. В Методических указаниях Госстандарта СССР «Расчетно-экспериментальные методы оценки сопротивления усталости сварных соединений РД 50-551—85» указанные диаграммы приведены во взаимосвязи с видом сварных соединений и узлов машиностроительных и строительных конструкций, классом прочности стали и расчетным числом циклов [71].

Пределы выносливости соединений с низкими остаточными напряжениями. Рассмотренные выше закономерности изменения предельных напряжений цикла в зависимости от σ_m и приведенные значения пределов выносливости не отвечают сварным соединениям с низкими начальными остаточными напряжениями. При испытании образцов с низкими остаточными напряжениями возрастает влияние тех факторов, которые относительно мало изменяли сопротивление усталости соединений с высокими остаточными напряжениями. Здесь в полной мере начинает проявляться влияние изменчивости геометрических параметров швов. При этом полученные различными исследователями значения пределов выносливости однотипных соединений существенно расходятся. В табл. 8.13—8.15 приведены данные о материалах, видах сварки, характеристиках цикла и соответствующие им пределы выносливости стыковых соединений низкоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей. Значения пределов выносливости стыковых соединений низкоуглеродистых сталей изменяются от 70 до 140 МПа при симметричном цикле нагружения и от 135 до 200 МПа — при отнулевом цикле. Еще большее рассеяние наблюдается для низколегированных сталей: от 90 до 205 МПа — при симметричном цикле и от 110 до 235 МПа — при отнулевом. Диапазон изменения пределов выносливости стыковых соединений высокопрочных сталей составляет 80—120 МПа при симметричном цикле и 120—180 МПа — при отнулевом.

Таблица 8.13. Предел выносливости необработанных стыковых соединений низкоуглеродистых сталей

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	Вид сварки	R_σ	σ_{-1}, МПа	Число проанализированных кривых усталости	Литературный источник
Ст3, 22К, SIS-141312, St-37, SIS-141311	215—259	400—541	Ручная дуговая	—1,0	105 70—120	6	[171, 226]
М16С	260	440	Автоматическая	—1,0	120	1	[13]
22К	—	456—487	Электрошлаковая	—1,0	115 90—140	2	[199]
BS-15, St-37, SS-41	236—277	403—450	Ручная дуговая	0,0	170 135—190	6	[157, 227]
Низкоуглеродистая	—	—	Автоматическая	0,0	135 100 *—170	2	[157]
BS-15	—	—	Электрошлаковая	0,0	155 110 *—200	2	[170]
Низкоуглеродистая судостроительная	250	425	Порошковой проволокой	0,0	200	1	[227]
St-37	265	407—432	Ручная дуговая	0,1	185 155—215	2	[227]
М16С, St-37	265	430—432	Автоматическая	0,1	155 150—160	2	[69, 227]

Примечания. 1. Звездочкой отмечены сварные соединения с большой выпуклостью швов и резким переходом на основной металл. 2. Здесь и в табл. 8.14—8.21 над чертой — средние значения предела выносливости, под чертой — диапазон рассеяния.

Таблица 8.14. Предел выносливости необработанных стыковых соединений низколегированных сталей

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	Вид сварки	R_σ	σ_R, МПа	Число проанализированных кривых усталости	Литературный источник
St-52, FE-52, SIS-141411, SIS-142172, St-52-3	251—437	459—598	Ручная дуговая	—1,0	120 90—145	6	[227]
09Г2, А-36	320	490—565	Автоматическая	—1,0	105 90—205	3	[227, 228]
St-52-3, St-52	375—450	543—600	Дуговая в CO_2	—1,0	120 90—145	10	[227]
St-52-3	420	570	Дуговая в смеси Ar, CO_2 и O_2	—1,0	110 105—125	5	[227]
HTS-36, SM-50A, BS-968, HT-50, FEE-355	368—395	537—555	Ручная дуговая	0,0	170 140—200	8	[227]
15ХСНД, SM-41, HT-50, BS-968, FEE-355	295—395	460—564	Автоматическая	0,0	150 110—235	6	[163, 227]
St-52-3	375	543	Дуговая в CO_2	0,0	155	1	[227]
HTS-40, HT, SM-50A	368—400	545—560	Ручная дуговая	0,1	225 165—295	5	[227]
St-11483	390	565	» »	0,2	190	1	[227]
	390	565	Автоматическая	0,2	175	1	[227]

Затруднительно выявить все причины столь значительного рассеяния пределов выносливости в каждой группе прочности основного металла. Однако главная из них — это различие в концентрации напряжений образцов, подвергающихся испытанию. Как уже отмечалось в 8.2, концентрация напряжений стыковых соединений может изменяться в два и более раза. Изменение этого фактора в образцах различных серий, в основном, и приводит к наблюдаемому рассеянию.

Приведенные в табл. 8.13—8.15 данные не позволяют установить связь между изменениями пределов выносливости и способом сварки различных сталей. Например, средние значения пределов выносливости σ_{-1} стыковых соединений низкоуглеродистых сталей, выполненных ручной электродуговой и автоматической сваркой, равны соответственно 105 и 120 МПа. Для низколегированных сталей данные противоположные: ручной сварке соответствует среднее значение σ_{-1}, равное 120 МПа, а сварке автоматической — 105 МПа. Нельзя от-

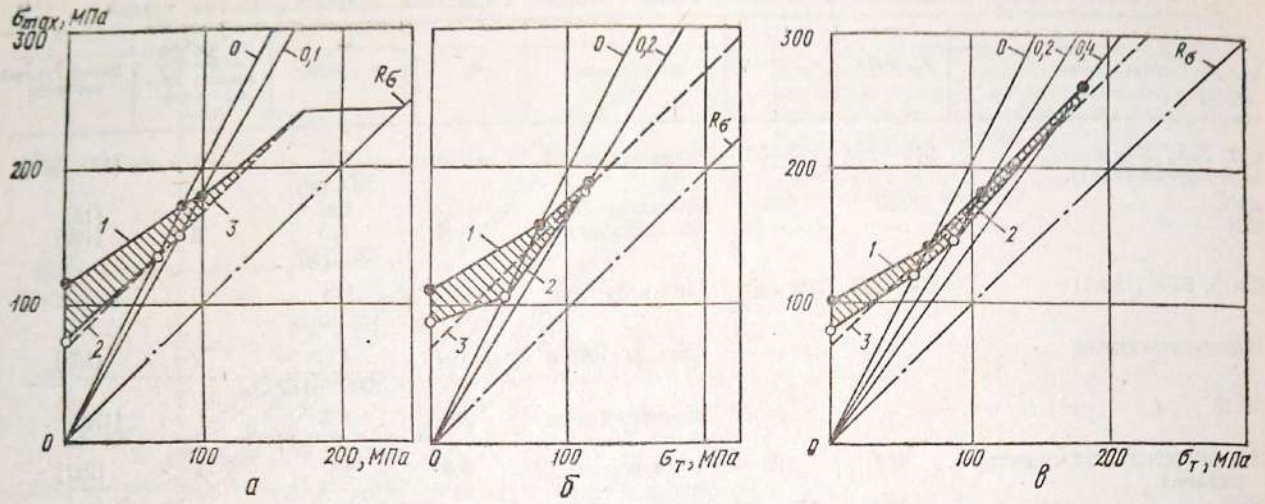


Рис. 8.43. Предельные напряжения цикла стыковых соединений низкоуглеродистых (*а*), низколегированных (*б*) и высокопрочных (*в*) сталей:

1 — средние значения для соединений с низкими остаточными напряжениями; *2* — минимальные значения для таких же соединений; *3* — средние значения для соединений с высокими остаточными напряжениями.

дать предпочтение ни одному из видов сварки — ручной, автоматической, дуговой в углекислом газе и смеси аргона, углекислого газа и кислорода — и по данным испытаний стыковых соединений высокопрочных сталей.

В то же время при одном и том же виде сварки можно получить стыковые соединения, существенно различающиеся по сопротивлению усталости. По данным исследований [157], предел выносливости стыкового соединения, выполненного автоматической сваркой под флюсом с плавным переходом шва к основному металлу, равнялся 170 МПа, а с большой выпуклостью шва и резким переходом на основной металл — только 100 МПа. При умеренной выпуклости шва, выполненного вручную рутиловыми электродами, предел выносливости составлял 154 МПа. Ухудшение формы шва из-за перехода к сварке без разделки кромок электродами, обеспечивающими глубокое проплавление, привело к снижению предела выносливости до 108 МПа.

Сопротивление усталости стыковых соединений, выполненных электрошлаковой сваркой, также меняется в зависи-

Таблица 8.15. **Предел выносливости необработанных стыковых соединений высокопрочных сталей**

Марка стали	σ_T, МПа	σ_B, МПа	Вид сварки	R_σ	σ_R, МПа	Число проанализированных кривых усталости	Литературный источник
N-A-XTRA65, FE52D, T1, T1B, T1A	417—850	618—900	Ручная дуговая	—1,0	100 80—120	6	[158, 227]
STE47, STE70	499—757	654—814	Дуговая в смеси Ar и CO_2	—1,0	105 100—110	2	[227]
N-A-XTRA65, HY80, T1, T1B, T1A, STE70, HT-80	600—850	725—950	Ручная дуговая	0,0	155 130—185	12	[158, 227]
STE70	700	800—950	Автоматическая	0,0	125 120—130	2	[227]
	753	814	Дуговая в смеси Ar и CO_2	0,0	170	1	[227]
St-45/60VN	435	620	Ручная дуговая	0,2	165 155—175	2	[227]
St-45/60VN, 14HNMBCu	435—870	620—947	Автоматическая	0,17—0,2	190 145—235	2	[227]
N-A-XTRA70	740	830	Ручная дуговая	0,4	255	1	[227]
STE47, STE70	499—753	654—814	Дуговая в смеси Ar и CO_2	0,4	260 250—270	2	[227]
Низколегированная высокопрочная	870	947	Автоматическая	0,5	200	1	[227]
STE47, STE70	499—753	654—814	Дуговая в смеси Ar и CO_2	0,7	460 450—475	2	[227]
STE70	753	814	То же	0,8	600	1	[227]

Таблица 8.16. Предел выносливости нахлесточных соединений низкоуглеродистых сталей с поперечными угловыми швами

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	Вид сварки	R_σ	σ_R, МПа	Число проанализированных кривых усталости	Литературный источник
Ст3, St-37	254—294	391—422	Ручная дуговая	—1,0	110 85—145	7	[229, 230]
Ст3, St-37, BS 4360, SM 41B	240—300	370—510	» »	0,0	150 95—190	9	[229, 230]
SM 41B	300	450	Дуговая в CO_2	0,0	120	1	[230]
FEE 24	280	400	Автоматическая	0,0	125	1	[230]
St-37	240	370	Ручная дуговая	0,1	220 120—255	7	[230]
Ст3	—	—	» »	0,14	135	1	[160]
	—	—	Полуавтоматическая	0,14	150	1	[160]
M16C	—	451	Автоматическая	0,2	175 150—205	3	[69]
St-37	—	451	» »	0,3	160	1	[69]
	294	422	Ручная дуговая	0,5	235	1	[230]

Таблица 8.17. Предел выносливости нахлесточных соединений низколегированных сталей с поперечными угловыми швами

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	Вид сварки	R_σ	σ_R, МПа	Число проанализированных кривых усталости	Литературный источник
St-52, FEE-355, низколегированная	360—419	520—573	Ручная дуговая	—1,0	105 70—130	7	[158, 230]
St-52, BS-968, FEE-355, HT-50	297—396	460—560	» »	0,0	125 100—200	15	[230, 231]
BS-968	390	560	Дуговая в CO_2	0,0	120	1	[230]
FEE-355	435	600	Автоматическая	0,0	140	1	[230]
FEE-355, HTS-36	298—419	476—573	Ручная дуговая	0,1	165 135—200	3	[230]
St-52	360	520	» »	0,2	290	1	[230]
	383	530	» »	0,33	220	1	[230]

мости от формы шва. При хорошем профиле шва предел выносливости σ_0 достигает 200 МПа, а при неблагоприятном формировании (например, в случае несовпадения медных ползунов) снижается до 110 МПа [170].

Как при автоматической, так и при ручной сварке вид разделки кромок (X-, V-, U-образная) может сказаться на сопротивлении усталости соединения лишь при изменении геометрических параметров стыкового шва. Если же постоянство формы шва обеспечивается подбором режимов сварки, влиянием этого фактора можно пренебречь [13, 157, 158]. То же самое относится и к выбору сварочных материалов, в частности электродов для ручной сварки. В общем случае тип электрода не оказывает существенного влияния на сопротивление усталости сварного соединения, если при этом исключаются подрезы и достигается плавный переход от шва к основному металлу [13, 157]. Отметим, что плавность перехода достигается легче при использовании электродов, обеспечивающих мелкокапельный перенос металла [157]. Электроды с низким содержанием водорода дают более грубую поверхность шва, чем электроды с рутиловым покрытием.

Не всегда явственно проявляется влияние на сопротивление усталости соединений с невысокими остаточными напряжениями прочности основного металла. Данные, приведенные в табл. 8.13—8.15, позволяют заключить, что при сопоставимых характеристиках цикла R_σ средние значения пределов выносливости стыковых соединений низкоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей практически одинаковы. Они составляют соответственно 113, 116 и 103 МПа при симметричном цикле напряжений и 170, 158 и 150 МПа — при отнулевом. Как и в случае соединений с высокими остаточными напряжениями, наблюдается инвариантность к прочности основного металла. Однако характер изменения средних значений предельных напряжений цикла в зависимости от σ_m иной по сравнению с ранее установленным на образцах с высокими остаточными напряжениями. Размахи предельных напряжений не остаются постоянными, а уменьшаются с возрастанием средних напряжений цикла (рис. 8.43).

Линии предельных напряжений цикла, отвечающие средним значениям пределов выносливости, располагаются выше линий пределов выносливости стыковых соединений с высокими остаточными напряжениями (на рис. 8.43 они обозначены соответственно цифрами *1* и *3*). Наибольшее расхождение этих линий наблюдается в области знакопеременных напряжений, поскольку здесь происходит наибольшее снижение пределов выносливости под влиянием растягивающих остаточных напряжений. В то же время линия предельных напряжений цикла, соответствующая минимальным значениям пределов выносливости стыковых соединений с невысокими остаточными напряжениями (линия *2* на рис. 8.43), располагается вблизи линии предельных напряжений цикла стыковых соединений с высокими остаточными напряжениями. Это следует

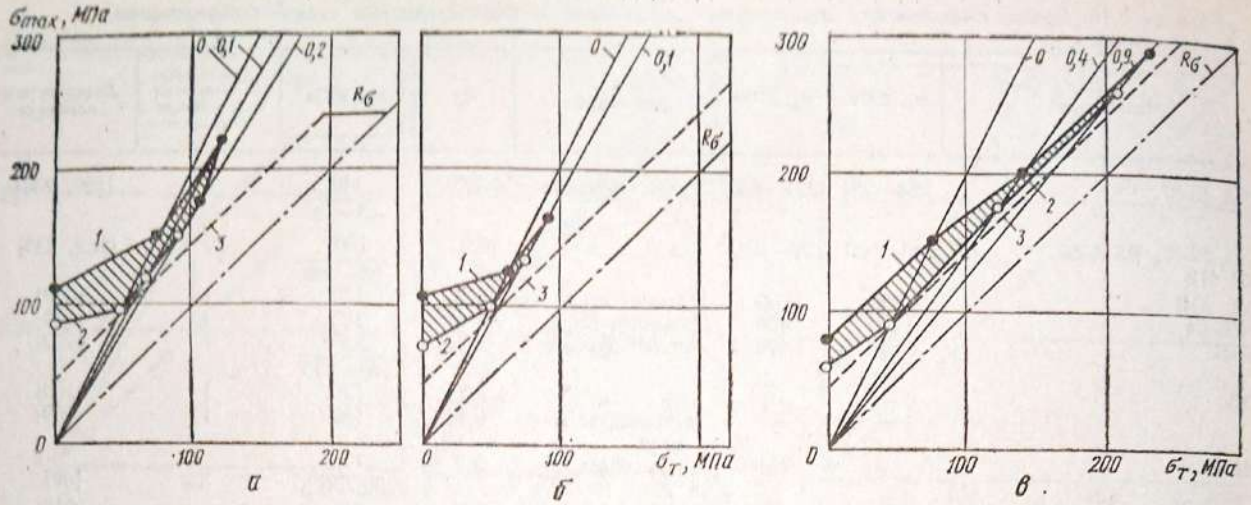


Рис. 8.44. Предельные напряжения цикла нахлесточных соединений с поперечными угловыми швами:

а — низкоуглеродистые стали; *б* — низколегированные стали; *в* — высокопрочные стали.

иметь в виду при установлении расчетных сопротивлений усталости сварных соединений.

Основные положения об изменении сопротивления усталости стыковых соединений с невысокими остаточными напряжениями остаются справедливыми и для соединений с поперечными угловыми швами. При качественном выполнении угловых швов способ сварки (ручная, автоматическая, полуавтоматическая) не оказывает существенного влияния на изменение сопротивления усталости соединения.

Угловые швы, не передающие силового воздействия (ребра жесткости, диафрагмы, крепления, проушины и т. п.), снижают сопротивление усталости несущих элементов до уровня пределов выносливости стыковых соединений. Для низкоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей средние значения пределов выносливости соединений с поперечными угловыми швами составляют соответственно 110, 105 и 78 МПа — при симметричном цикле напряжений; 165, 128 и 148 МПа — при отнулевом и примерно 230 МПа — при $R_\sigma = 0{,}5$. Здесь замечается некоторое снижение сопротивления усталости соединений более прочных сталей.

Приведенные величины существенно отличаются от значений пределов выносливости аналогичных соединений с высокими остаточными напряжениями. По результатам рассмотрения более 100 кривых усталости (табл. 8.16—8.18) на рис. 8.44 представлены диаграммы предельных напряжений цикла соединений с поперечными угловыми швами. Для сопоставления приведены линии предельных напряжений аналогичных соединений с высокими остаточными напряжениями. Наибольшее расхождение линий (обозначения соответствуют принятым на рис. 8.43) наблюдается, как и в случае стыковых соединений, в области знакопеременных напряжений. Пределы выносливости σ_{-1} соединений с высокими и низкими остаточными напряжениями различаются в 2—2,5 раза. По мере возрастания σ_m линии предельных напряжений сходятся. Наи-

Таблица 8.18. **Предел выносливости нахлесточных соединений высокопрочных сталей с поперечными угловыми швами**

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	Вид сварки	R_σ	σ_R, МПа	Число проанализированных кривых усталости	Литературный источник
N-A-XTRA70, FEE-460, HT-80	512—765	673—830	Ручная дуговая	—1,0	75 60—100	4	[230]
St-E70, St-E47	499—753	654—814	Автоматическая	—1,0	80 65—105	4	[230]
N-A-XTRA70, St-E70, HT-80	619—814	697—814	Ручная дуговая	0,0	150 90—240	19	[230, 231]
St-E70, St-E47	499—753	654—814	Автоматическая в смеси Ar и CO_2	0,0	145 140—150	3	[230]
FEE-460	512	673	Ручная дуговая	0,1	110	1	[230]
St-E47, St-E70	499—753	654—814	Автоматическая в смеси Ar и CO_2	0,4	200 175—220	4	[230]
N-A-XTRA70	740	830	Ручная дуговая	0,5	230	1	[230]
HT-80	765	804	» »	0,6	290 260—315	2	[230]
St-E70	753	814	Автоматическая в смеси Ar и CO_2	0,7	365	1	[230]
	753	814	То же	0,8	500	1	[230]

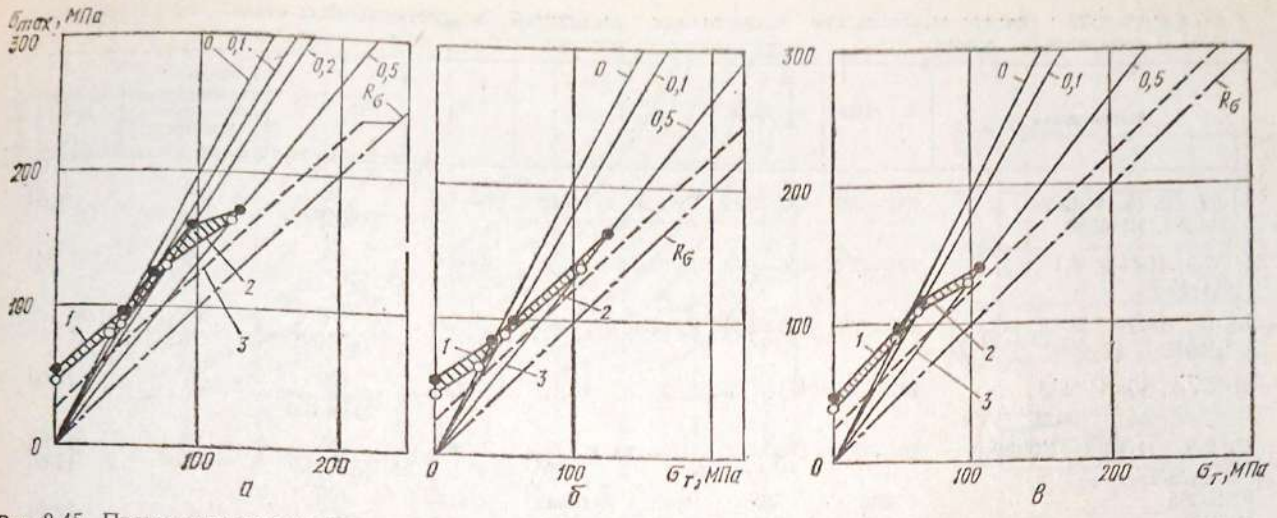


Рис. 8.45. Предельные напряжения цикла соединений встык и нахлесточных с фланговыми швами:

а — низкоуглеродистые стали; *б* — низколегированные стали; *в* — высокопрочные стали.

более наглядно это показано на рис. 8.44, *в*, относящемся к соединениям высокопрочных сталей. Сварные образцы этих сталей испытывались в наиболее широком диапазоне положительных значений R_σ.

Рассеяние пределов выносливости соединений с поперечными угловыми швами довольно велико, примерно такое же, как у стыковых швов (на рис. 8.43 и 8.44 области рассеяния заштрихованы). Одинаковы и причины, вызывающие это рассеяние.

Как уже отмечалось, в образцах различного размера остаточная напряженность по концам фланговых швов примерно одинакова. По сравнению с поперечными стыковыми и угловыми швами фланговые швы имеют в зонах окончания и более стабильную концентрацию напряжений. Вследствие этого большого рассеяния пределов выносливости различных образцов с фланговыми швами, включая и прикрепления встык, не наблюдается (рис. 8.45). Число рассмотренных кривых усталости (табл. 8.19—8.21) было таким же (равным 106), как и в случае соединений с поперечными стыковыми или угловыми швами. Однако разница между средними и минимальными значениями соответствующих пределов выносливости не превышает 10—15 МПа.

Средние значения пределов выносливости рассматриваемых соединений низкоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей составляют соответственно 60, 55 и 45 МПа при симметричном цикле; 95, 85 и 90 — при отнулевом и 170, 168 и 140 МПа при $R_\sigma = 0{,}5$. Здесь более заметно влияние прочности основного металла на сопротивление усталости, чем в соединениях с поперечными стыковыми и угловыми швами. С повышением прочности стали сопротивление усталости соединения снижается.

Нельзя не обратить внимание на то, что и для соединений фланговыми швами значения пределов выносливости образцов небольшого размера в 1,5—2 раза отличаются от значений пределов выносливости крупномасштабных образцов, хотя по абсолютным величинам разница не столь велика (примерно 30 МПа). Это связано с тем, что на сопротивление усталости образцов с фланговыми швами более, чем на сопротивление соединений других видов, оказывают влияние соотношения ширины и толщины свариваемых пластин. В крупномасштабных образцах эти соотношения зачастую оказывают большее влияние. В небольших образцах растягивающие остаточные напряжения могут и не достигать своих предельных значений. При сварке не обращалось внимание на остаточную напряженность образцов и не исключалась их правка после сварки.

Все это не могло не сказаться на конечных результатах. Вполне очевидно, что приведенное выше деление образцов на две группы (с высокими и низкими остаточными напряжения-

Таблица 8.19. **Предел выносливости нахлесточных соединений низкоуглеродистых сталей с фланговыми швами и прикреплений встык**

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	Вид сварки	R_σ	σ_R, МПа	Число проанализированных кривых усталости	Литературный источник
Ст3сп, МСт3, BS-15, St-37, St-38B-2	240—300	370—450	Ручная дуговая	—1,0	50 / 45—60	8	[162, 232]
St-38V-2	248	393	Дуговая в CO_2	—1,0	70	1	[232]
Ст3сп, BS-15, BS-2762, St-38B-2, St-37, SS-1312	240—300	380—450	Ручная дуговая	0,0	95 / 80—120	15	[170, 232]
St-37, St-38V-2	240—245	370—396	» »	0,1	125 / 85—200	5	[232]
St-37	240	370	» »	0,2	160 / 130—190	3	[232]
St-38B-2, St-34B-2, St-38V-2	267—284	393—433	Дуговая в CO_2	0,5	170 / 165—170	3	[232]

Таблица 8.20. Предел выносливости нахлесточных соединений низколегированных сталей с фланговыми швами и прикреплений встык

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	Вид сварки	R_σ	σ_R, МПа	Число проанализированных кривых усталости	Литературный источник
St-52, BS-15, St-38V-2, H-52-3, BS-4360	281—387	453—539	Ручная дуговая	—1,0	60 45—110	8	[232]
H-52-3, H-45-2, KT-52-3, KT-45-2	284—370	456—548	Дуговая в CO_2	—1,0	50 45—60	6	[232]
BS-15, BS-968, St-52, HT, SMA50-1, BS-4360, SS21-32	268—396	460—564	Ручная дуговая	0,0	85 75—105	23	[230, 232]
St-38V-2, V-2, H-52-3	282—360	453—520	» »	0,1	100 100—100	3	[232]
H-52-3, H-45-2, KT-52-3, KT-45-2	284—370	456—539	Дуговая в CO_2	0,1	95 90—100	4 1	[232] [232]
FEE-355	400	565	Ручная дуговая	0,15	105		
H-52-3	366	548	Дуговая в CO_2	0,2	105	1	[232]
St-52, St-38V-2, H-52-3	282—349	453—527	Ручная дуговая	0,5	185 160—240	4	[232]
H-52-3, H-45-2, KT-52-3, KT-45-2	284—370	456—548	Дуговая в CO_2	0,5	150 140—160	6	[232]

Таблица 8.21. Предел выносливости нахлесточных соединений высокопрочных сталей с фланговыми швами и прикреплений встык

Марка стали	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, МПа	Вид сварки	R_σ	σ_R, МПа	Число проанализированных кривых усталости	Литературный источник
H-60-3	450—456	617—630	Дуговая в CO_2	—1,0	45 40—45	2	[232]
HT, 0X812	332—755	632—805	Ручная дуговая	0,0	90 85—95	4	[231, 232]
St-E690, FEE-460	475—763	625—806	» »	0,1	115 110—125	2	[232]
H-60-3	450	630	Дуговая в CO_2	0,1	75	1	[232]
	456	617	» »	0,2	100	1	[232]
	450—456	617—630	» »	0,5	140 130—150	2	[232]

ми) так же, как и соответствующих им значений пределов выносливости, не является достаточно четким. Тем не менее такое деление начинает получать признание у специалистов в области прочности сварных конструкций. Объясняется это тем, что результаты подавляющего большинства усталостных испытаний, проведенных как в нашей стране, так и за рубежом, относятся к сварным образцам сравнительно небольшого размера, остаточная напряженность которых не принималась во внимание. Полученные на таких образцах пределы выносливости соединений послужили основой для принятых в большинстве норм проектирования сварных конструкций допускаемых напряжений и расчетных сопротивлений по условиям усталости. В ряде соединений реальных конструкций растягивающие остаточные напряжения не достигают предела текучести основного металла (или же снимаются тем или иным способом), поэтому полученные ранее исходные данные могут оказаться полезными для использования на практике.

Такой подход к нормированию значений пределов выносливости сварных соединений и узлов принят, в частности, Координационным центром стран — членов СЭВ по проблеме «Сварка». В документе 06.С-12- ВУЗ-2—85 Координационного центра наряду с рекомендуемыми значениями пределов выносливости соединений с высокими остаточными напряжениями указываются значения пределов выносливости соединений с небольшими остаточными напряжениями, не превышающими половины предела текучести основного материала. Все сварные соединения и узлы в зависимости от их вида, класса качества и крутизны выпуклости швов разбиты на 9 групп — от К0 до К8. Каждая из групп характеризуется следующими основными признаками: К0 — основной металл с фрезерованной или механически обработанной другим способом поверхностью; К1 — основной металл с прокатной поверхностью и сварные элементы, соответствующие классу качества 1, с поверхностью, шлифованной в направлении прилагаемой нагрузки; К2 — основной металл с прокатной поверхностью и сварные элементы, соответствующие классу качества 2; необработанные стыковые соединения с крутизной выпуклости шва $\leqslant 15°$; К3 — необработанные стыковые соединения с крутизной выпуклости шва $\leqslant 15°$, соответствующие классу качества 3; тавровые соединения с плоскими швами при К-образных разделках; К4 — необработанные стыковые соединения с крутизной выпуклости шва $\leqslant 25°$,

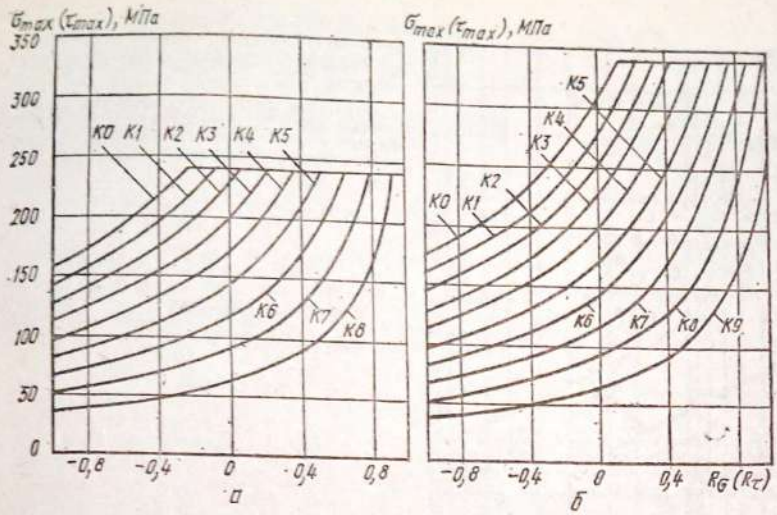


Рис. 8.46. Зависимость предельных напряжений от коэффициента асимметрии цикла для элементов сварных конструкций К0—К8 с невысокими остаточными напряжениями:
а — R_m = 380 МПа; *б* — R_m = 520 МПа.

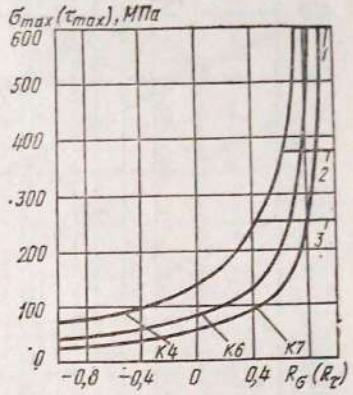


Рис. 8.47. Зависимость предельных напряжений от коэффициента асимметрии цикла для соединений с высокими растягивающими остаточными напряжениями:
1, 2, 3 — предел текучести соответственно высокопрочных, низколегированных и низкоуглеродистых сталей.

соответствующие классу качества 3; стыковые соединения двутавровых профилей с такой же крутизной шва; основной металл с планками, приваренными по периметру пологими угловыми швами; приварка фасонок встык с закругленными и зашлифованными переходами с радиусом, равным не менее чем трехкратной ширине полки; К5 — необработанные стыковые соединения с крутизной выпуклости шва $\leqslant 35°$, соответствующие классу качества 3; приварка фасонок встык с закругленными и зашлифованными переходами, имеющими радиус перехода, кратный ширине полки; К6 — необработанные стыковые соединения с крутизной выпуклости шва $\leqslant 35°$, соответствующие классу качества 4; тавровые соединения с пологими угловыми швами; приварка прямоугольных фасонок встык, крутизна выпуклости необработанного шва $\leqslant 25°$, корень шва с подваркой; приварка фасонок прямоугольной и трапециевидной формы к поясам балок внахлестку с обваркой по контуру; К7 — прерывистые швы, а также сварные элементы с концевыми кратерами; угловые швы, подвергаемые кручению; К8 — сварные элементы, подвергаемые воздействию сдвига.

На рис. 8.46 приводятся значения пределов выносливости сварных соединений с низкими остаточными напряжениями сталей классов прочности R_m= 380 МПа и R_m = 520 МПа, а на рис. 8.47 — некоторых соединений с высокими остаточными напряжениями. Приведенные значения соответствуют вероятности разрушения P = 50 %.

8.5. ВЛИЯНИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДЕФЕКТОВ СВАРКИ

Наиболее часто очагами преждевременных усталостных разрушений служат недопустимые дефекты сварки, количество которых даже в весьма ответственных конструкциях достаточно велико.

Снижение циклической долговечности соединений под влиянием дефектов раньше связывали только с уменьшением площади поперечного сечения шва. Такой подход реализован, в частности, применительно к пористым швам и соединениям с непроварами в работах [76, 77]. Последующие исследования по допустимости технологических дефектов связаны с определением создаваемой ими концентрации напряжений. В работе [75] предложено сопоставлять значения коэффициентов концентрации напряжений α_c и $\alpha_д$, отвечающих соответственно форме соединения и данному дефекту. Если $\alpha_д < \alpha_c$, то несущая способность определяется формой шва или соединения; в этом случае технологическое отклонение не следует относить к дефекту соединения. Если же $\alpha_c < \alpha_д$, то степень снижения долговечности соединения должна оцениваться по экспериментальным данным. На основе теоретических и экспериментальных исследований внутренних дефектов установлено, что концентрация напряжений, обусловленная формой шва, во многих случаях оказывается определяющей. Однако рассчитать ресурс дефектного соединения не представляется возможным.

Примером количественного определения допустимости дефектов может служить метод Харисона, предложенный Международному институту сварки [78]. Оценку долговечности соединений с дефектами округлой формы (порами, шлаковыми включениями) предлагается выполнять по так называемым уровням качества, а соединений с плоскими трещиноподобными дефектами (например, непроварами) — расчетным путем, используя подходы механики разрушения.

Обобщение данных МИС, относящихся к образцам с пористостью до 3 %, приведено на рис. 8.48. Предлагаемые уровни качества представлены пятью зонами: V, W, X, Y и Z, которые разделены прямыми линиями с углом наклона $\alpha = \pi - \operatorname{arctg}\frac{1}{2}$. Разбивка на зоны и выбор наклона линий сделаны произвольно. Предполагается, что принятый наклон линий находится в согласии с экспериментальными результатами, относящимися к соединениям со шлаковыми включениями и порами. Принимая нижние границы рассеяния за

Таблица 8.22. Максимальная длина допускаемых шлаковых включений

Уровень качества	Швы в исходном состоянии		Соединения без остаточных напряжений	Соединения с жестким контуром, пересекающиеся швы
	Электроды с рутиловым покрытием	Электроды низководородистые		
V	0	0	0	0
W	1,5 мм	5 мм	5 мм	3—4 мм
X	10,0 мм	25 мм	Не ограничивается	4 мм
Y	Не ограничивается	Не ограничивается	То же	25 мм
Z	То же	То же	»	Не ограничивается

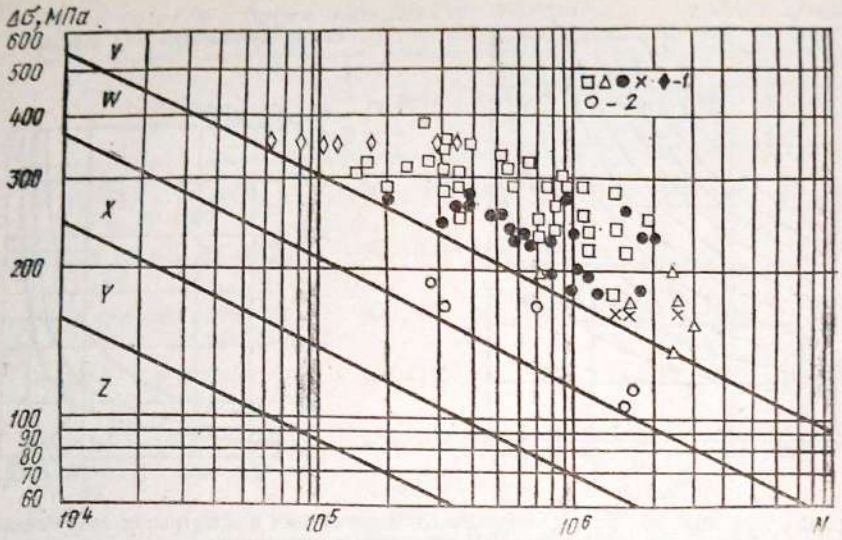


Рис. 8.48. Результаты испытаний швов с порами и предлагаемые уровни качества:

1 — данные МИС для образцов с пористостью до 3 %; *2* — данные ИЭС для образцов с высокими остаточными напряжениями и пористостью до 1 % ($R_\sigma = 0$).

допустимые уровни напряжений, для каждого класса качества устанавливают наибольшую длину шлакового включения (табл. 8.22) и максимальную пористость в процентах. Уровни качества, установленные для отнулевого цикла, принимаются неизменными и для других характеристик цикла напряжений,

Уровень качества	*V*	*W*	*X*	*Y*	*Z*
Максимальная пористость, %	0	3	8	20	20

а влияние асимметрии цикла на сопротивление усталости соединения предлагается определять по зависимости Гудмана. Однако это допущение осложняет определение допустимости дефектов при различной асимметрии переменных напряжений, поскольку противоречит действительному характеру изменения предельных напряжений цикла для соединений с высокими остаточными напряжениями.

Один и тот же дефект может по-разному изменять сопротивление усталости соединения в зависимости от того, в каком поле сварочных остаточных напряжений он располагается. В этой связи циклическая долговечность дефектного соединения должна оцениваться с учетом возможного влияния остаточных напряжений. Такой подход к определению предельных напряжений соединений с порами, подрезами и непроварами принят в работах [13, 79—81].

Поры. Известно, что поры создают наименьшую концентрацию напряжений по сравнению с другими дефектами. При этом форма соединения, выпуклость сварного шва и т. п. создают большую концентрацию напряжений. Поэтому швы с порами чаще всего оказываются более долговечными, чем доброкачественные соединения с необработанной поверхностью. Особенно это относится к сравнительно коротким поперечным швам. В качестве доказательства приведем результаты опытов, описанные в работе [81]. Испытывались образцы шириной 70 мм с поперечным стыковым швом, которые вырезались из предварительно сваренных пластин 420×600×12 мм (сталь М16С). Выпуклость стыкового шва не снималась, и это для большинства образцов компенсировало ослабление, вызываемое порами. В некоторых образцах ослабленное порами сечение было меньше, чем сечение образца вдали от шва. Часть образцов пор не имела. Все образцы, разделенные на четыре партии соответственно четырем уровням напряжений (190, 150, 130 и 110 МПа), испытывались при симметричном цикле напряжений. В каждую партию вошли по 5—13 образцов с малым числом пор в шве, цепочкой пор, группой пор, сплошной пористостью и без видимых дефектов в швах.

В большинстве образцов усталостные разрушения начинались вдали от пор, по линии сплавления шва с основным металлом. Не являлись очагами разрушения и поры, расположенные по линии сплавления. Только в тех случаях, когда поры ослабляли шов настолько, что его сечение становилось значительно меньше сечения образца вдали от шва, разрушение происходило по ослабленному шву. На каждом уровне напряжений разброс результатов получился значительным, но обнаружить зависимость между циклической долговечностью соединения и степенью его пористости не удалось.

Иное положение наблюдается в соединениях с протяженными швами, в том числе и соединительными. В длинных продольных швах, например, растягивающие остаточные напряжения достигают наибольших значений, а поры в таком поле напряжений является единственным концентратором напряжений. Такие сочетания могут вызвать непредвиденные разрушения, которые наблюдались как на практике, так и при испытаниях сварных балок. Вместо ожидаемого разрушения в зонах различного рода приварок усталостное разрушение начиналось от поры в продольном шве, расположенной вдали от напряженного сечения [82]. В стыках большой протяженности поперечные остаточные напряжения на отдельных участках шва достигают значений предела текучести металла. При этом выносливость соединений с поперечными пористыми швами может существенно снижаться.

Сопротивление усталости соединений с пористыми швами и высокими остаточными напряжениями не зависит от количества пор, их размеров и взаимного расположения. В частности, это подтверждается результатами испытания образцов с высокими остаточными напряжениями растяжения, в которых имелись единичные поры и их различные сочетания (рис. 8.49). Результаты этих опытов лежат в одной зоне рассеяния и определяют значение предела выносливости при симметричном цикле напряжений, равное 50 МПа [13].

Как показывают исследования [13], различные виды соединений с пористыми протяженными стыковыми и угловыми швами обладают практически одинаковым сопротивлением усталости (рис. 8.50). Испытанию подвергались крупномасштабные образцы стали 09Г2С толщиной 12, 20 и 30 мм ($\sigma_т$ = = 320...390 МПа, $\sigma_в$ = 520...560 МПа). Сварка выполнялась проволокой Св-08ГА под флюсом АН-348. Количество пор и их взаимное расположение варьировались. Все образцы разрушались по внутренним порам, причем усталостные трещины зарождались в тех продольных угловых швах, которые сваривались в последнюю очередь, т. е. с наиболее высокими остаточными напряжениями. В стыковых поперечных швах трещины развивались от пор, которые находились на участке высоких растягивающих остаточных напряжений. Около пор, расположенных на участке сжимающих остаточных напряжений, усталостных трещин, как правило, не было. Результаты испытаний образцов с различными типами сварных соединений попадают в одну область рассеяния; пределы выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов равны 108 МПа. Это указывает на то,

Рис. 8.49. Результаты испытаний образцов с продольными швами:

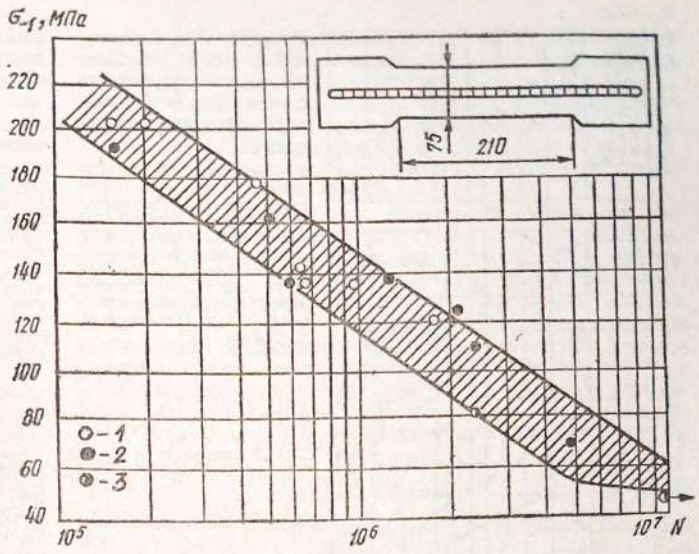
1 — образцы с единичными порами; *2* — образцы с группами пор; *3* — образцы с цепочкой пор.

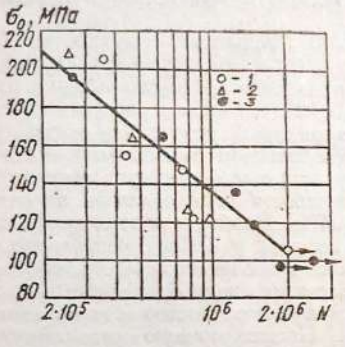
Рис. 8.50. Результаты испытаний сварных соединений с пористыми швами:

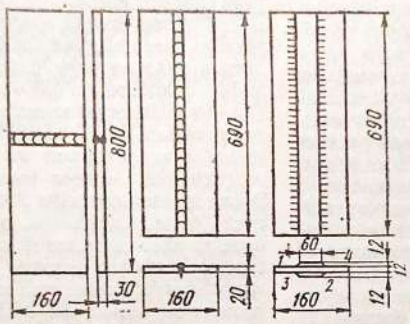
1 — поперечные стыковые швы; *2* — продольные стыковые швы; *3* — продольные угловые швы.

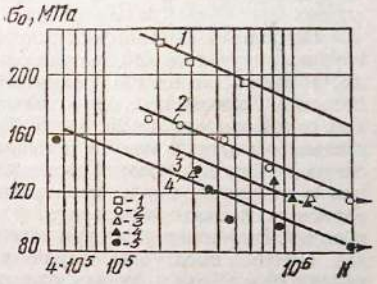
Рис. 8.51. Результаты усталостных испытаний образцов с подрезами:

1 — образцы без дефектов; *2* — подрезы глубиной 1—1,5 мм, остаточные напряжения до 100 МПа; *3*, *4* — подрезы глубиной 2—3,5 мм, остаточные напряжения до 100 МПа; *5* — подрезы глубиной 2—3,5 мм, остаточные напряжения до 200 МПа; *1*, *2*, *4* — толщина образцов 20 мм; *3*, *5* — толщина образцов 30 мм.









что независимо от вида соединения поры, расположенные в поле высоких растягивающих напряжений, снижают пределы выносливости соединений до одного уровня. Их влияние определяется, в основном, концентрацией напряжений, характером и величиной остаточных напряжений. При высоких растягивающих остаточных напряжениях заметного влияния диаметра пор не обнаружено. Незначительное рассеяние результатов испытаний свидетельствует о том, что швы с внутренними порами диаметром 0,5—3,5 мм имеют одинаковую долговечность. Поэтому вряд ли целесообразно проводить дифференциацию пор при оценке сопротивления усталости соединений с высокими растягивающими остаточными напряжениями.

Подрезы. Подрезы являются более резкими концентраторами напряжений, чем поры. С возрастанием глубины подреза выносливость соединения падает. По данным работы [83] пределы выносливости шлифованных образцов со снятой выпуклостью стыковых швов, имеющих подрезы (сечение образцов 13×35 мм), и таких же образцов с доброкачественными швами, не подвергающихся механической обработке, отличаются на 10—15 МПа при подрезе глубиной 0,5 мм и на 40 МПа при подрезе глубиной 1 мм на базе $2 \cdot 10^6$ циклов перемен напряжений.

На снижение циклической долговечности оказывают влияние также длина подреза и его острота. Значительное влияние на выносливость соединений с протяженными швами могут оказывать и высокие растягивающие остаточные напряжения. На рис. 8.51 приведены результаты экспериментальных испытаний стыковых соединений с подрезами. Образцы сечениями 160×30 и 160×20 мм из стали 09Г2С с поперечным стыковым швом испытывались при отнулевом осевом растяжении. Подрезы создавались путем предварительного оплавления участков кромок разделки. Глубина подрезов изменялась от 1,0 до 3,5 мм, и располагались они в различных зонах остаточной напряженности шва.

Сопоставление кривых, относящихся к образцам с подрезами одинаковой глубины, показывает, что меньшей выносливостью обладают образцы с более высокими растягивающими остаточными напряжениями. Увеличение глубины подреза в два раза снижает предел выносливости на 15 %, а увеличение уровня остаточных растягивающих напряжений с 50—100 МПа до 200 МПа — на 18 %. Суммарный эффект обоих факторов (подрез глубиной 2—3,5 мм и остаточные напряжения до 200 МПа) изменяет предел выносливости бездефектного стыкового соединения со 165 МПа до 82 МПа, т. е. на 50 %.

Непровары. По сравнению с другими технологическими дефектами непровар создает наибольшую концентрацию напряжений. Вершина непровара часто имеет весьма острый надрыв, который не выявляется неразрушающими методами контроля. Поэтому даже небольшие непровары могут вызывать резкое снижение сопротивления усталости стыковых соединений. Однако, в отличие от соединений с порами и подрезами, образцы с непроварами показывают значительное рассеяние результатов испытаний. Так, обобщение данных о циклической долговечности этих соединений, сделанное Харисоном [78], позволило установить, что рассеяние может достигать двух порядков. Обработке подвергались результаты испытаний 350 образцов, толщина которых изменялась от 1 до 26 мм, а глубина непровара — от 0,7 до 14 мм. Основное предположение о причине столь значительного рассеяния состояло в том, что наблюдаемая нестабильность, вероятнее всего, связана с различной остротой непроваров. Однако надо полагать, что наблюдаемое рассеяние связано не только с геометрическими факторами, но и с остаточной напряженностью в зоне дефекта.

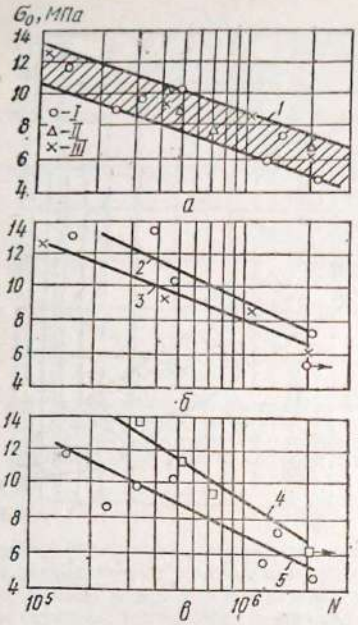


Рис. 8.52. Влияние длины (*а*) и глубины (*б*, *в*) непроваров на сопротивление усталости стыкового соединения:

I — зона рассеяния результатов испытания образцов с непроварами 8 × 160 (*I*); 8 × 80 (*II*) и 8 × 25 мм (*III*); *2*, *3* — стыки с непроварами соответственно 4 × 25 и 8 × × 25 мм; *4*, *5* — стыки с непроварами соответственно 2 × 160 и 8 × × 160 мм.

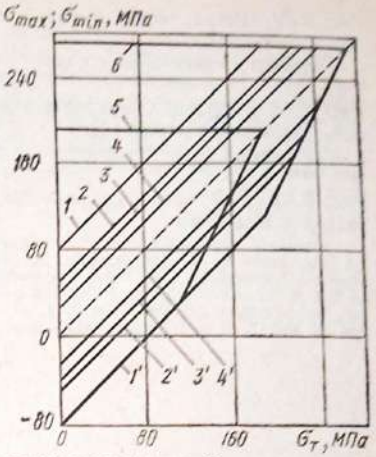


Рис. 8.54. Диаграммы предельных напряжений сварных соединений в зонах высоких растягивающих остаточных напряжений:

1, *1'* — дефектов нет (стыковой шов стали 09Г2С); *2*, *2'* — поры в стыковых или угловых швах; *3*, *3'* — подрезы стыковых швов глубиной 2—3,5 мм; *4*, *4'* — непровары; *5*, *6* — расчетные сопротивления соответственно низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Влияние геометрических размеров непроваров (длины и глубины) изучалось на образцах сечением 26×160 мм из стали 09Г2С со стыковыми швами. Непровары располагались посередине высоты стыкового шва и имели в образцах различных серий размеры 4×25, 8×25, 8×80, 8×160 и 2×160 мм. Непровары длиной меньше ширины образца размещались в средней части шва. Опыты проводились при осевом нагружении и отнулевом цикле напряжений. Испытания заканчивались после выхода усталостной трещины на поверхность образца. При таком критерии завершения испытаний в стыках, имевших высоту непровара 8 мм и протяженность дефекта 160, 80 и 25 мм, площади, занятые трещиной, составляли соответственно 2000, 1000 и 300 мм² с некоторыми отклонениями в отдельных образцах. Тем не менее результаты испытаний образцов этих серий были примерно одинаковыми и размещались в одной и той же области рассеяния (рис. 8.52, *а*). Отсюда можно сделать вывод, что длина дефекта не оказывает существенного влияния на долговечность стыкового соединения. Согласно положениям линейной механики разрушения, изменение глубины непровара должно сказываться в большей степени, чем изменение его длины [78, 84]. Сопоставление результатов образцов с дефектами 4×25 мм (рис. 8.52, *в*), а также 2×160 и 8×160 мм (рис. 8.52, *б*) подтверждает это положение. В то же время с понижением рабочих напряжений влияние глубины непровара заметно уменьшается, и в области больших значений числа циклов перемен напряжений этим влиянием также можно пренебречь.

Причину выравнивания пределов выносливости следует искать в проявлении действия остаточных напряжений. При отсутствии остаточных напряжений в образцах кривые усталости *2* и *4* (см. рис. 8.52) располагались бы параллельно кривым *3* и *5*, но, поскольку образцы в месте дефекта имели высокие остаточные напряжения (примерно одинаковой величины), их влияние при низких рабочих напряжениях становилось доминирующим, что и определило сходимость соответствующих кривых усталости в области больших значений

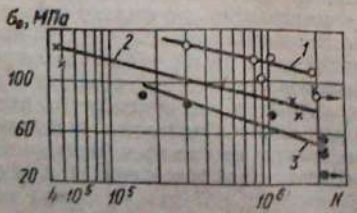


Рис. 8.53. Кривые усталости образцов с непроварами, расположенными в поле:

1 — сжимающих остаточных напряжений; *2*, *3* — растягивающих остаточных напряжений, равных соответственно 80 и 200 МПа.

долговечности. В то же время аналогичные образцы с различной остаточной напряженностью в месте дефекта могли бы показать и другие соотношения долговечностей и пределов выносливости. Именно в этом надо искать основную причину чрезмерного рассеяния результатов испытаний, о котором упоминалось выше.

В последующих опытах [13] испытывались такие же образцы с непроварами 5×40 и 6×60 мм, которые располагались в зоне высоких растягивающих (равных примерно 160 МПа), сжимающих (80—110 МПа) и низких растягивающих (10—50 МПа) остаточных напряжений. Результаты оказались различными (рис. 8.53). Наибольшую выносливость имели стыки с непроварами на участках сжимающих остаточных напряжений. Предел выносливости этих образцов на базе 2 млн циклов составил 108 МПа. Наиболее низкая долговечность была у образцов, в которых участок с непроваром в средней части шва заваривался в последнюю очередь, что вызывало наиболее высокие растягивающие остаточные напряжения в месте дефекта. Предел выносливости таких образцов составлял только 52 МПа. Промежуточную выносливость имели образцы с меньшими растягивающими остаточными напряжениями.

Рассматривая непровар как трещиноподобный дефект, в ряде исследований к оценке его опасности привлекают подходы и критерии механики разрушения. При этом исходят из того, что долговечность соединения может быть определена расчетным путем, если известен размер дефекта, толщина материала, величина рабочих напряжений [78], а также величина и характер распределения остаточных напряжений [85, 86].

Оценка допустимости дефектов. Приведенные выше значения пределов выносливости рекомендуются в качестве исходных для определения предельно допустимых напряжений. Применительно к пористым соединениям на рис. 8.48 сопоставлены данные МИС с результатами, полученными в ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины. Несмотря на то что данные МИС относятся к образцам с пористостью до 3 %, а полученные в ИЭС — к образцам с пористостью до 1 %, наблюдается заметное различие в их взаимном расположении. Результаты испытаний образцов без остаточных напряжений расположены в зоне *V*, а образцов с высокими остаточными растягивающими напряжениями — в зоне *W*, которая соответствует более низкому классу качества изготовления конструкции. Это дает основание полагать, что при равной пористости для соединений с высокими растягивающими остаточными напряжениями должны приниматься зоны качества на один уровень ниже тех, которые рекомендует МИС. Аналогично обстоит дело со сварными соединениями, имеющими непровары или подрезы.

По-видимому, более обоснованно допустимость дефектов в сварных соединениях оценивать по диаграммам предельных напряжений. Для их построения вполне достаточно приведенных выше данных, если принять во внимание, что для сварных соединений с высокими остаточными напряжениями

линии предельных напряжений параллельны и наклонены под углом 45° к оси абсцисс [13]. Такие диаграммы приведены на рис. 8.54. Для сопоставления там же нанесена диаграмма предельных напряжений бездефектного стыкового соединения.

Как и следовало ожидать, наиболее низкой выносливостью обладают стыки с непроварами. По сравнению с пределами выносливости стыков без дефектов пределы выносливости стыков с непроварами понижаются в три раза. При симметричном цикле напряжений предел выносливости равен только 25 МПа. Вполне очевидно, что непровары не должны допускаться в элементах и соединениях, испытывающих переменные напряжения. Диаграмма предельных напряжений стыковых соединений с подрезами глубиной 2—3,5 мм в зонах высоких растягивающих остаточных напряжений показывает, что предел выносливости таких соединений при $R_\sigma = -1$ равен 41 МПа. Аналогично могут быть построены диаграммы предельных напряжений для других типов сварных соединений, швы которых содержат подрезы иной глубины. Сопоставляя диаграмму предельных напряжений пористого шва с диаграммой предельных напряжений бездефектных соединений, можно заключить, что для тех соединений, диаграммы которых располагаются выше линии выносливости пористого шва, поры опасны (на участках высоких растягивающих остаточных напряжений), а для соединений, диаграммы которых находятся ниже этой линии, поры не опасны, они не снижают долговечности соединения. Представляется, что такой подход к оценке выносливости пористых соединений и их допустимости в сварных конструкциях наиболее обоснован.

8.6. ЦИКЛИЧЕСКАЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В конструкциях, работающих при нормальных климатических температурах и не испытывающих воздействие дополнительных ударных нагрузок, стадия развития усталостной трещины может составлять от 10 до 90 % общей долговечности сварного элемента. В таких случаях расчетное определение живучести конструкции — обоснование периода развития трещины от ее начальных размеров до критической длины — приобретает важное значение и является основным резервом увеличения нормированного срока службы изделия или сооружения. Закономерности развития усталостных трещин в конструкционных материалах изучены достаточно полно, разработаны эффективные расчетно-экспериментальные методы определения циклической трещиностойкости тел, содержащих усталостные трещины. Закономерности развития усталостных трещин в сварных элементах изучены в гораздо меньшей степени. Особенно это касается влияния сварочных остаточных напряжений на циклическую трещиностойкость соединений и их учета в расчетной оценке живучести сварных конструкций.

Методы оценки трещиностойкости. К настоящему времени накоплен значительный объем экспериментальных и теоретических исследований закономерностей роста трещин под действием циклически изменяющихся напряжений. Следует отметить, прежде всего, обзорные работы [87—89] и монографии, в которых этот вопрос рассматривается детально [2—4, 7, 19, 59, 84, 90]. Как уже упоминалось в 8.1, в рамках линейной механики разрушения основной характеристикой циклической трещиностойкости материала является диаграмма усталостного разрушения (см. рис. 8.5). На основании этой диаграммы: 1) устанавливают характеристики циклической трещиностойкости материала, определяющие его сопротивление развитию усталостной трещины; 2) сопоставляют материалы при обосновании их выбора для машин и конструкций при заданных нагрузках, температуре, среде и т. п.; 3) сравнивают различные варианты химического состава, технологии изготовления и упрочнения при создании новых материалов и изделий; 4) рассчитывают долговечность и длительность межинспекционных периодов элементов конструкций с учетом их дефектоскопии и условий эксплуатации.

Обобщив большой экспериментальный материал для широкого диапазона экспериментальных данных (в пределах нескольких порядков значений скоростей распространения трещины), Пэрис [16] применительно к линейному участку *II* ДУР предложил эмпирическую зависимость (8.5). Она использовалась многими исследователями для представления экспериментальных результатов. Величины C и m широко используются в инженерной практике, а их значения для различных материалов и условий испытания приводятся в работах и справочниках [59, 91, 92 и др.].

Наряду с формулой (8.5), получившей наибольшее распространение, предложены и другие соотношения, связывающие скорость развития усталостных трещин с силовыми или деформационными факторами, длиной трещины и механическими свойствами материалов. В настоящее время известно свыше 80 таких зависимостей, различающихся количеством используемых независимых параметров и констант, а также формой их представления.

В многообразии предложений можно выделить три основных подхода к определению скорости развития трещины на линейном участке. Первый основан на различных представлениях функции $f(\Delta K)$ зависимости

$$dl/dN = f(\Delta K). \qquad (8.24)$$

Наиболее развит такой подход в работах [2, 16, 84, 87, 93—95].

Второй подход относится к описанию скорости роста усталостных трещин при высоких номинальных напряжениях. Если эти напряжения близки к пределу текучести материала, то размеры пластической зоны в вершине усталостной трещины становятся соизмеримыми с размерами самой трещины. В этом случае ΔK и соотношения, полученные на основе модели упругого деформирования материала, перестают отражать напряженно-деформированное состояние в вершине трещины. Возникает необходимость связывать скорость роста трещины с деформационными и энергетическими параметрами. В качестве таких параметров выступают: размах коэффициента интенсивности деформаций или местная деформация [19], размах номинальных упруго-пластических деформаций [96], размер пластической зоны [97], величина раскрытия вершины трещины [98, 100], размерах J-интеграла [99].

Третий подход базируется на предположении, что при отсутствии коррозионной среды на участке, соответствующем линейной части ДУР, в вершине трещины действует малоцикловый механизм разрушения. Реализация такого подхода основана на использовании закона Коффина — Мэнсона и правила линейного суммирования относительных долговечностей при нестационарном нагружении. Если размер зоны циклических пластических деформаций существенно меньше длины трещины и внешнее нагружение стационарно, то при продвижении трещины на расстояние, равное размеру пластической зоны, распределение деформаций вблизи вершины трещины сохраняется почти неизменным и продвижение трещины за цикл нагружения можно считать величиной приблизительно постоянной. В этом случае совместное применение закона Коффина—Мэнсона и правила линейного суммирования относительных долговечностей дает возможность получить выражение для скорости роста усталостной трещины в виде некоторого определенного интеграла, нижний предел интегрирования которого равен нулю, а верхний — размеру зоны пластических деформаций. Вычисления скорости на каждом шаге выполняются ЭВМ. Изложенный подход в различных вариантах был реализован в работах [101—103].

Данные подходы не исчерпывают всего многообразия имеющихся предложений. Однако они достаточно представительно демонстрируют возможности линейной и нелинейной механики разрушения в области циклической трещиностойкости. Следует отметить, что для практики первостепенную важность имеют простейшие эмпирические уравнения, описывающие распространение трещины при циклическом нагружении. Использование таких соотношений значительно упрощает расчет при сохранении приемлемой точности для оценки процесса усталостного разрушения. Значительно большая погрешность в расчетах может быть связана с недостаточным учетом влияния технологических и эксплуатационных факторов на изменение характеристик сопротивления материала развитию трещины.

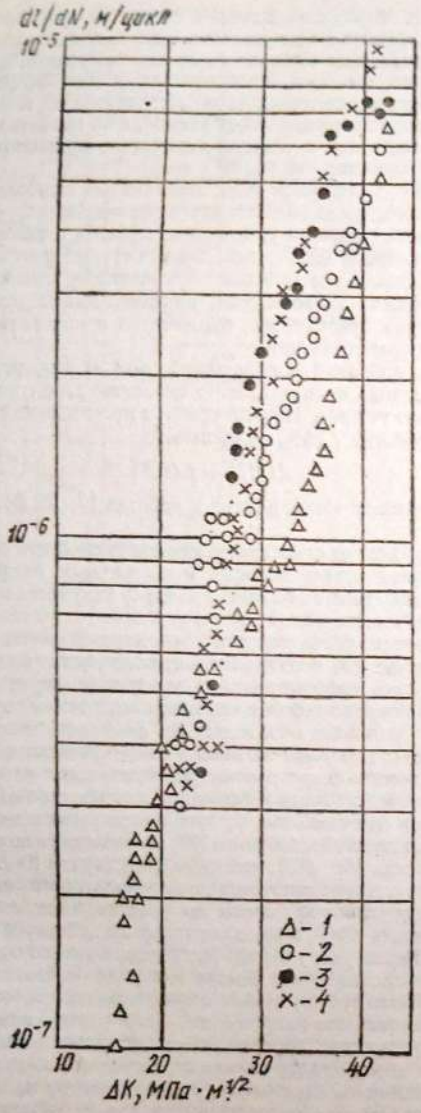


Рис. 8.55. Диаграммы усталостного разрушения стали 15ХСНД, отвечающие различным образцам шириной 160 мм и толщиной:

1 — 5 мм; *2* — 10 мм; *3* — 20 мм; *4* — 30 мм.

Применительно к сварным конструкциям необходимо учитывать особенности, привносимые сваркой. Это наличие зон с различными физико-механическими свойствами и особенно влияние сварочных остаточных напряжений.

Свойства материала. В линейной механике разрушения большое практическое значение имеет размах порогового коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{th}, так как он определяет безопасную границу уровня переменных напряжений $\Delta\sigma_{th}$ для тел с дефектами типа трещин. Значения порогов ΔK_{th} зависят от механических свойств металла (в первую очередь, от предела текучести $\sigma_т$), а также от коэффициента асимметрии цикла, толщины образца, окружающей среды, формы цикла, частоты нагружения, характера изменения нагрузки и длины трещины (при малых их длинах). В работе [104] приведено выражение для зависимости ΔK_{th} (МПа × × м$^{1/2}$) от предела текучести материала $\sigma_т$ (МПа) и асимметрии внешнего нагружения R_σ:

$$\Delta K_{th} = 12{,}7 - 0{,}006\sigma_т - (11{,}37 - 0{,}0065\sigma_т)\, R_\sigma. \quad (8.25)$$

Характер влияния других факторов, упомянутых выше, на величину ΔK_{th} неодинаков и требует специальных исследований в каждом конкретном случае.

На линейном участке ДУР взаимосвязь скорости роста усталостной трещины с характеристиками материала неоднозначна. Исключение составляет модуль упругости, который оказывается важнейшим параметром материала, влияющим на его циклическую трещиностойкость. Для многих металлических материалов с различными значениями модуля упругости нормирование скорости роста усталостных трещин по отношению $\Delta K/E$ дает узкую полосу рассеяния экспериментальных данных. Корреляционная зависимость между скоростью роста усталостной трещины и вязкостью разрушения K_{Ic} (или пределом текучести $\sigma_т$) в пределах полосы рассеяния на линейном участке ДУР не установлена. Известные экспериментальные результаты противоречивы или свидетельствуют об отсутствии систематической взаимосвязи между исследуемыми величинами. На третьем, высокоамплитудном, участке ДУР основными характеристиками циклической трещиностойкости материала являются размах критического коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{fc} (циклическая вязкость разрушения) и критическая скорость роста трещины.

Масштабный фактор. Влияние масштабного фактора на закономерности роста усталостной трещины может проявляться для всех трех участков ДУР и носить при этом сложный характер, объяснить который в рамках двухмерной модели коэффициента интенсивности напряжений не представляется возможным. Во многих работах эффект масштаба связывают с переходом от плоского напряженного состояния в вершине трещины к плоской деформации. При этом одни исследователи отмечают повышение скорости роста усталостной трещины с увеличением толщины образца [105, 106], другие — уменьшение [107, 108], третьи считают скорость роста трещины не зависящей от толщины образца [109, 112]. Если рост усталостной трещины сопровождается развитием значительных пластических деформаций в вершине трещины, то влияние размеров образцов неоднозначно. В работах [110, 111] в качестве параметра нелинейной механики разрушения, определяющего скорость роста усталостной трещины, предлагается использовать величину раскрытия вершины трещины. Показано, что для образцов различной толщины максимальное раскрытие вершины трещины (или размах раскрытия) однозначно определяет скорость роста усталостной трещины как на Пэрисовском участке ДУР, так и в высокоамплитудной области.

В исследованиях ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины влияние масштабного фактора на скорость роста усталостных трещин изучалось на плоских образцах стали 15ХСНД с центрально расположенной трещиной при отнулевом циклическом растяжении [113]. При этом варьировались как толщина образцов, так и их ширина. Исследования проводились для линейного участка ДУР. Полученные результаты исследований (рис. 8.55) подтверждают, что увеличение толщины металла от 5 до 20 мм, сопровождающееся переходом от плоского напряженного состояния к условиям плоской деформации в вершине трещины, приводит к существенному возрастанию скорости роста усталостной трещины в довольно широком диапазоне значений размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK. Дальнейшее увеличение толщины металла, при прочих равных условиях, практически не изменяет скорость роста усталостной трещины. Помимо влияния толщины пластин исследовано влияние на скорость роста усталостной трещины и их ширины. Увеличение ширины пластин от 160 мм до 300 мм при толщине 20 мм практически не влияет на скорость роста усталостной трещины. По-видимому, это связано с тем, что увеличение ширины пластины не вызывает изменения условий плоской деформации в вершине трещины.

Асимметрия цикла. Характеристики циклической трещиностойкости C и m уравнения (8.5) обычно принимаются в качестве констант материала, инвариантных к асимметрии цикла переменного нагружения. Между тем рядом исследователей [93, 95, 114—116] установлено, что асимметрия цикла $R_\sigma = K_{min}/K_{max}$ может оказывать заметное влияние на из-

менение скорости развития трещины. Различные материалы по-разному чувствительны к этому фактору. Но в целом наблюдается увеличение скорости роста трещины с возрастанием коэффициента асимметрии цикла R_σ. Повышение R_σ вызывает не только увеличение скорости роста трещины, но и сдвиг границ ее роста ΔK_{th} и ΔK_{fc} влево. Смещение ΔK_{th} следует из соотношения (8.25), а ΔK_{fc} — из зависимости $\Delta K_{fc} = (1 - R_\sigma)\, K_{fc}$. Для линейного участка ДУР имеется ряд соотношений, учитывающих в явном виде влияние R_σ на скорость роста усталостной трещины. Наибольшую известность получили подходы, предложенные в работах [93, 95, 114, 115]. Анализ этих подходов, а также результаты экспериментального исследования влияния коэффициента R_σ на закономерности циклической трещиностойкости приведены в работе [117]. Соответствующие кинетические ДУР были получены для трех марок сталей различных классов прочности: низкоуглеродистой стали Ст3, низколегированной 15ХСНД, высокопрочной стали 14Х2ГМР. В качестве примера на рис. 8.56 представлены ДУР стали 15ХСНД, соответствующие четырем значениям коэффициента R_σ. Эти данные, относящиеся к асимметриям цикла $0 \leqslant R_\sigma \leqslant 0{,}52$ и $R_\sigma = -1$, позволили установить функциональную зависимость

$$\frac{dl}{dN} = C_{-1} e^{\lambda(R_\sigma + 1)} (\Delta K)^{m-1}, \qquad (8.26)$$

где C_{-1} и m_{-1} — характеристики трещиностойкости материала зависимости (8.5) при $R_\sigma = -1$, λ — постоянная, характеризующая чувствительность материала к асимметрии цикла на стадии развития усталостной трещины. Величина λ в указанном интервале изменения R_σ для данного материала может приниматься постоянной в широком диапазоне значений ΔK [117]. Для исследованных марок сталей установлены следующие значения этого параметра: $\lambda = 1{,}12$ для Ст3; $\lambda = 2{,}14$ — для 15ХСНД; $\lambda = 1{,}05$ — для 14Х2ГМР.

Остаточные напряжения. Влияние сварочных остаточных напряжений на скорость роста усталостных трещин изучено недостаточно полно. В работах [113, 118—120] приводятся результаты экспериментальных исследований развития усталостных трещин в полях остаточных напряжений растяжения и сжатия, а в работах [85, 121—126] рассмотрены подходы к учету влияния этих напряжений аналитическим способом.

Экспериментально установлено, что растягивающие остаточные напряжения интенсифицируют развитие усталостных трещин, а сжимающие — замедляют. В работах [122, 124] рассмотрена модель распространения усталостной трещины, основанная на решении циклической упруго-пластической задачи о напряженно-деформированном состоянии металла у вершины трещины, деформационном критерии малоциклового разрушения и гипотезе суммирования повреждений. В качестве инженерного метода такой подход является достаточно сложным; он требует проведения значительных вычислительных работ на ЭВМ, обладающей большой памятью. Подходы, предложенные в работах [125, 126], основанные на использовании в расчетах значений эффективных размахов КИН, требуют проведения трудоемких измерений размаха раскрытия вершины трещины в процессе приложения внешнего циклического нагружения. Выполнение таких измерений значительно усложняется, а порой становится и невозможным, например при усталостных испытаниях образцов, имитирующих элементы металлоконструкций.

В работах [85, 123] на основе подходов линейной механики разрушения установлена зависимость для количественного описания влияния остаточных напряжений на скорость роста усталостной трещины

$$\frac{dl}{dN} = C (\Delta K)^m \left(1 + \frac{K_r}{\Delta K}\right)^S, \qquad (8.27)$$

где K_r — коэффициент интенсивности остаточных напряжений; S — постоянный коэффициент, по данным работы [120] для стали 15ХСНД $S = 0{,}38$.

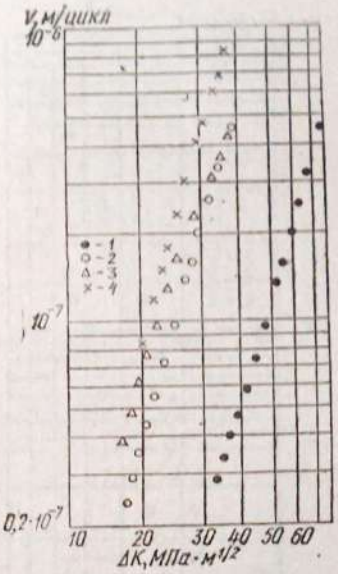


Рис. 8.56. Диаграммы усталостного разрушения стали 15ХСНД, относящиеся к различным значениям коэффициента асимметрии цикла:
1 — $R_\sigma = -1$; *2* — $R_\sigma = 0$; *3* — $R_\sigma = 0{,}2$; *4* — $R_\sigma = 0{,}51$.

Значение K_r для пластины конечной ширины с центрально расположенной трещиной длиной $2l$ и симметрично распределенными относительно оси Oy остаточными напряжениями $\sigma_{ry}(x)$ определяется по формуле [130]

$$K_r = 2\sqrt{l/\pi} \int_0^l \frac{\sigma_{ry}(x)\, dx}{\sqrt{l^2 - x^2}}. \qquad (8.28)$$

Здесь $\sigma_{ry}(x)$ — установившиеся (после частичной релаксации, после первых циклов нагружения) нормальные остаточные напряжения растяжения или сжатия в сечении, где расположена трещина, в предположении ее отсутствия.

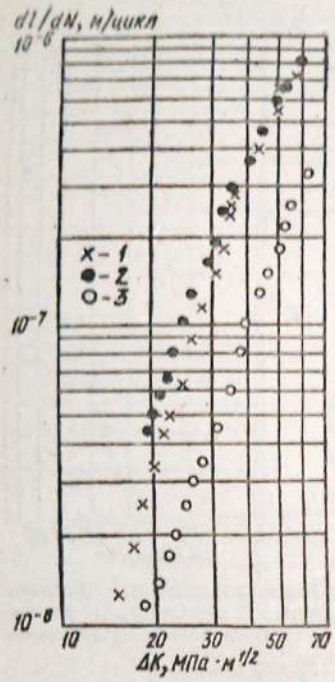
В работе [121] приведены ограничения, которые должны учитываться при использовании зависимостей, полученных в работах [85, 123], и предложена инженерная расчетно-экспериментальная методика учета влияния остаточных сварочных напряжений на циклическую трещиностойкость сварных соединений, справедливая в широком диапазоне изменения значений ΔK. Эта методика получила дальнейшее развитие в работах [127—129]. Исходным положением, на котором основана данная методика, служит уравнение (8.26), которое модифицировано с целью учета остаточных напряжений.

Обозначим через v_1 и v_2 скорость распространения усталостной трещины в поле растягивающих и сжимающих остаточных напряжений соответственно, а через v_0 — скорость трещины в основном металле. В работах [113, 118, 120, 131] экспериментально показано, что $v_0 < v_1$, а $v_2 < v_0$ при одинаковых длинах трещины. Учитывая это и сохраняя основную структуру уравнения (8.26), в котором C_{-1}, m_{-1} и λ являются постоянными материала, применительно к линейному участку ДУР можно записать

$$v_j = \begin{cases} C_{-1} e^{\lambda(R_\sigma + 1)} [\Delta K + f(K_{rj}, R_\sigma)]^{m-1}, & \Delta K \gg \Delta K_{th}; \\ 0, & \Delta K < \Delta K_{th} \quad (j = 0, 1, 2), \end{cases} \qquad (8.29)$$

где $f(K_{rj}, R_\sigma)$ — функция коэффициента интенсивности остаточных напряжений K_{rj} и коэффициента асимметрии цикла напряжений R_σ. Коэффициент $K_{rj}(l)$ вычисляется по формуле (8.28) для остаточных напряжений $\sigma^l_{ry}(x)$ соответствующего знака.

В работе [121] изложенный подход реализуется на базе экспериментальных данных о кинетике развития усталостных трещин в образцах из стали 15ХСНД при значении $R_\sigma = 0$ для трех различных вариантов остаточных напряжений в зоне трещины: нулевых, растягивающих и сжимающих (рис. 8.57). При этом явный вид функции $f(K_{rj}, 0)$ был установлен в



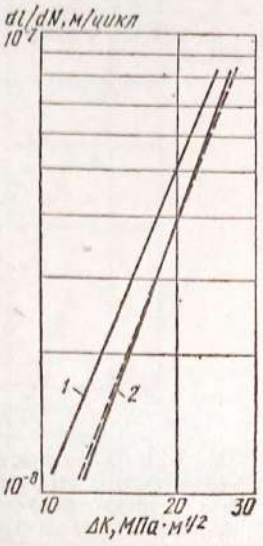


Рис. 8.57. Диаграммы усталостного разрушения образцов с различными начальными остаточными напряжениями в зоне трещиноподобного дефекта (сталь 15ХСНД):

1 — остаточные напряжения отсутствуют; *2* — остаточные напряжения растяжения; *3* — то же, сжатия.

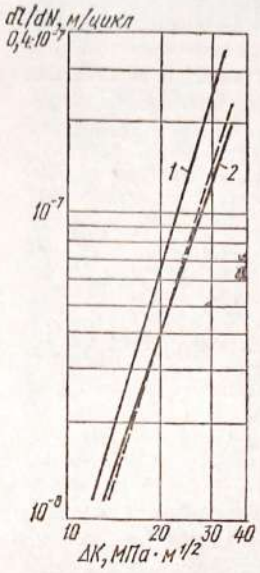


Рис. 8.58. Диаграммы усталостного разрушения металла шва стыкового соединения стали 07Х3ГНМЮА:

1 — остаточные напряжения отсутствуют; *2* — остаточные напряжения сжатия; штриховая линия — расчетные данные.

Рис. 8.59. Диаграммы усталостного разрушения металла ЗТВ стыкового соединения стали 07Х3ГНМЮА:

1 — остаточные напряжения отсутствуют; *2* — остаточные напряжения сжатия; штриховая линия — расчетные данные.

предположении, что $C_{-1}{}^{\lambda} = C_0$, а $m_{-1} = m_0$. Здесь C_0 и m_0 — характеристики циклической трещиностойкости материала, полученные при нулевых остаточных напряжениях (т. е. когда в уравнении (8.29) $f(K_{rj}, R_\sigma) \equiv 0$) и при значении коэффициента $R_\sigma = 0$. Для значений $C_0 = 6{,}17 \cdot 10^{-11}$ и $m_0 = 3{,}17$ в случае остаточных напряжений растяжения в зоне трещины $f(K_{r1}, 0) = 0{,}1K_{r1}$, а при напряжениях сжатия $f(K_{r2}, 0) = 0{,}05\,(l/l_*)^{0{,}65}K_{r2}$ (l_* — единица длины).

Установленный вид функций $f(K_{r1}, 0)$ и $f(K_{r2}, 0)$ имел место для значений длины усталостной трещины $2l$, при которых усталостное разрушение происходило по механизму нормального отрыва. В испытанных образцах шириной $2B = 160$ мм такой механизм разрушения реализовался до длины трещины $2l = 70$ мм. На базе экспериментальных данных о циклической трещиностойкости металла шва и металла зоны термического влияния сварных стыковых соединений высокопрочной стали 07Х3ГНМЮА также установлены выражения функции $f(K_{r2}, 0)$. Плоские модельные образцы стыковых соединений с центрально расположенной трещиной испытывались при отнулевом растяжении ($R_\sigma = 0$) в поле остаточных напряжений сжатия. Соответствующие кинетические ДУР представлены на рис. 8.58, 8.59 (линии *2*), здесь же приведены ДУР для модельных образцов стыковых соединений без остаточных напряжений (линии *1*). Для всех значений длины усталостной трещины до максимального ее значения $2l = 70$ мм искомые функции имеют вид: для металла шва $f(K_{r2}, 0) = 0{,}15K_{r2}$ и для ЗТВ $f(K_{r2}, 0) = 0{,}5K_{r2}$.

Полученные выражения функций $f(K_{r2}, 0)$ использованы при расчете кинетических ДУР по соотношению (8.29), которые приведены на рис. 8.58, 8.59 (штриховые линии). При этом характеристики циклической трещиностойкости были следующими: $C_{-1} = 0{,}33 \cdot 10^{-11}$, $m_{-1} = 2{,}43$, $\lambda = 2{,}4$ — для металла шва; $C_{-1} = 0{,}13 \cdot 10^{-11}$, $m_{-1} = 2{,}96$, $\lambda = 2{,}1$ — для ЗТВ.

В широком диапазоне изменения ΔK расчетные и экспериментальные ДУР практически совпадают.

Долговечность сварных элементов. Аналитические зависимости, отражающие экспериментально установленные закономерности распространения усталостных трещин в конструкционных материалах, служат основой расчетных методов прогнозирования долговечности (живучести) несущих элементов конструкций, в которых имеется трещина или трещиноподобный дефект. Долговечность данного элемента конструкции определяет число циклов, соответствующее росту усталостной трещины от начальной длины l_0 до критической l_c. Для обеспечения прочности конструкции долговечность должна быть больше числа перемен заданной нагрузки. Поскольку скорость роста усталостной трещины определяется формулой Пэриса (8.5) и размахом коэффициента интенсивности напряжений в виде обобщенного соотношения $\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi l}$, нетрудно получить следующие выражения для циклической долговечности: для $m \neq 2$

$$N = \frac{2}{(2-m)\,cM^{m/2}\,(\Delta\sigma)^m}\left[l_0^{\frac{2-m}{2}} - l_0^{\frac{2-m}{2}}\right]; \quad (8.30а)$$

для $m = 2$

$$N = \frac{1}{cM\,(\Delta\sigma)^2}\ln\frac{l_c}{l_0}. \quad (8.30б)$$

Здесь M — параметр, характеризующий геометрию элемента конструкции и форму трещины; $\Delta\sigma$ — размах приложенного напряжения.

Расчет ресурса соединения при развитии трещины в поле остаточных напряжений может быть выполнен интегрированием уравнения (8.29)

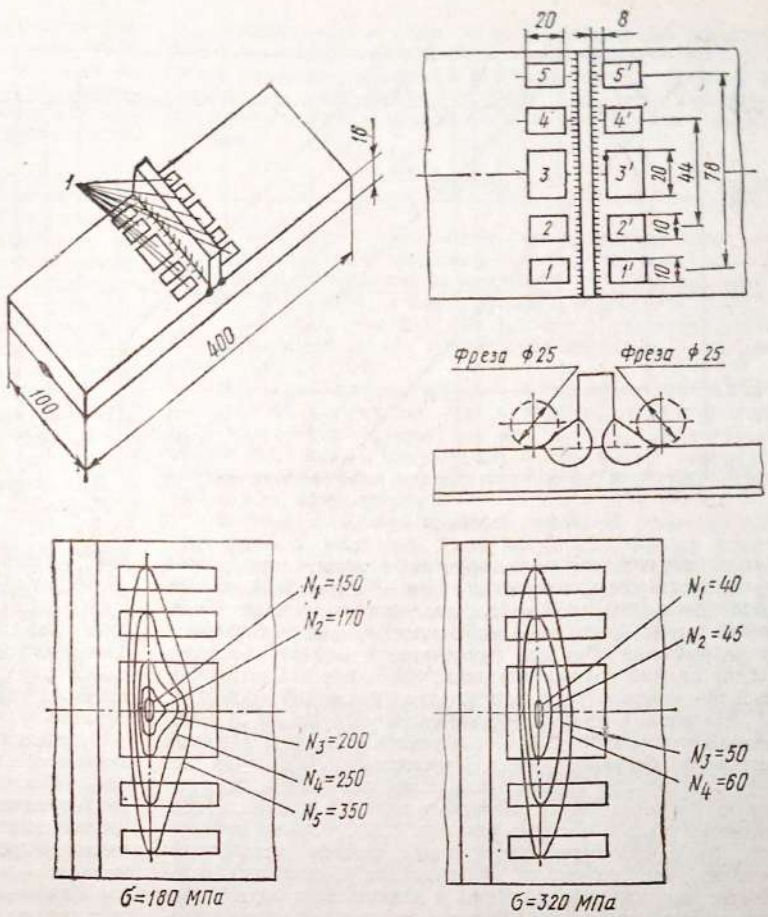
$$N = \frac{e^{-\lambda(R_\sigma+1)}}{C_{-1}}\int_{l_0}^{l_c}\frac{dl}{\{\Delta K\,(l) + f\,[K_{rj}\,(l),\ R_\sigma]\}^{m_{-1}}}. \quad (8.31)$$

Интегрирование необходимо выполнять численными методами с использованием ЭВМ.

Из выражений (8.30) и (8.31) следует, что для расчета ресурса необходимо знать критическую длину усталостной трещины для данного материала. Ее значение может быть найдено на основе критерия Ирвина по вязкости разрушения K_c или K_{1c} (в зависимости от предполагаемой степени стеснения деформации вдоль фронта трещины) и номинального эксплуатационного (расчетного) напряжения σ_{max} в сечении трещины [132]:

(8.32)

Рис. 8.60. Накопление повреждений в тавровых соединениях стали 17ГС.



Для этой же цели могут быть использованы и другие критерии разрушения, имеющие более сложную форму записи. Так, для квазихрупкого материала критическую длину трещины можно определить из двухпараметрического критерия разрушения [133]

$$(\sigma_{нт}^{max}/\sigma_в)^{q+1} + (K_1/K_c)^2 \leqslant 1 \quad (q \geqslant 1), \qquad (8.33)$$

где $\sigma_{нт}^{max}$ — максимальные нетто-напряжения в ослабленном сечении; K_c — вязкость разрушения материала.

При расчете ресурса сварного соединения элемента конструкции с высокими сварочными остаточными напряжениями в критериях разрушения (8.32) и (8.33) необходимо учесть значение и характер неравномерного распределения остаточных напряжений. Если усталостная трещина развивается в поле остаточных напряжений, то критерии (8.32) и (8.33) записываются в виде

$$K + K_{rj} = K_c, \qquad (8.34)$$

$$\left(\frac{\sigma_{нт}^{max} + \sigma_{rj}}{\sigma_в}\right)^{q+1} + \left(\frac{K_1 + K_{rj}}{K_c}\right)^2 \leqslant 1. \qquad (8.35)$$

Таким образом, уже в настоящее время представляется возможным выполнять оценку живучести элементов сварных конструкций при наличии в них усталостных трещин.

8.7. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СЛУЧАЙНОМ НАГРУЖЕНИИ

Особенностью случайного нагружения является изменение во времени параметров переменных цикла напряжений. При таком характере нагружения долговечность сварных соединений определяется накоплением усталостных повреждений, интенсивность которых зависит от величины и повторяемости различающихся между собой переменных напряжений.

Использование при расчетах сварных конструкций известных предложений по определению повреждающего воздействия случайных режимов нагружения [9, 15, 134 и др.] требует рассмотрения основных закономерностей накопления усталостных повреждений, имеющихся гипотез, описывающих этот процесс, и экспериментальной проверки наиболее приемлемых из них для сварных соединений.

Накопление усталостных повреждений. При экспериментальных исследованиях накопление усталостных повреждений определяется методами построения кривых повреждаемости [9, 90], путем анализа структурной повреждаемости [3, 90], контроля за изменением механических и физических свойств металла [3, 4].

Процесс повреждения металла под действием переменных напряжений может исследоваться путем изучения изменения интенсивности отраженного светового потока от поверхности образца [90], изменения свойств тонкой металлической фольги, плотно контактирующей с исследуемой поверхностью [136], и другими способами. Для количественной оценки повреждаемости сварных соединений рекомендуется способ медных гальванических пленок [137, 138]. Количественной мерой накопления усталостных повреждений в данном способе служит степень потемнения поверхности медной пленки. Необратимые сдвиговые деформации поверхности образца, сопровождающие процесс накопления усталостных повреждений, передаются на медные гальванические пленки. Постепенное накопление этих деформаций вызывает появление и дальнейшее развитие темных пятен на поверхности пленок. Эволюция этих пятен отображает процесс накопления повреждений. С помощью медных гальванических пленок исследовалось

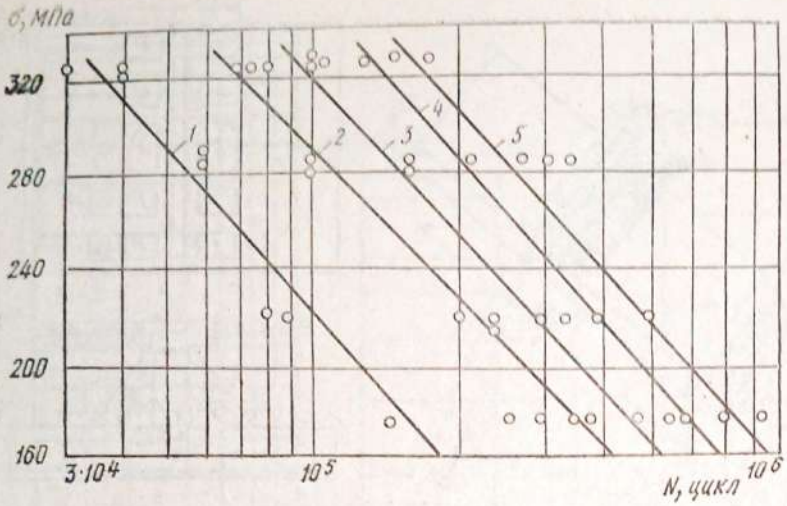


Рис. 8.61. Кривые усталости тавровых соединений стали 17ГС, отвечающие различным стадиям накопления усталостных повреждений:

1 — образование на поверхности гальванодатчиков отдельных темных пятен; *2* — появление устойчивых линий скольжения; *3* — возникновение микротрещин длиной 0,2—0,3 мм; *4* — достижение макротрещиной глубины 2—3 мм; *5* — полное разрушение образца.

накопление усталостных повреждений и зарождение трещин в образцах тавровых соединений стали 17ГС (рис. 8.60). Вдоль поперечных швов с учетом распределения остаточных напряжений и связанных с ним особенностей развития усталостного разрушения образцов наклеивалась медная гальваническая пленка толщиной 10 мкм. Затем образцы испытывались при максимальных напряжениях цикла 180 и 325 МПа.

На ранних стадиях циклического нагружения одновременно возникает большое число равномерно расположенных зародышей будущих трещин. Усталостные повреждения распространяются не только вдоль линии сплавления, но и поперек шва через зону термического влияния, охватывая достаточно большую площадь (см. рис. 8.60). Форма и размеры зон, соответствующих характерным стадиям усталостных повреждений, зависят от концентрации напряжений, остаточных напряжений, величины и длительности воздействия переменных напряжений. При дальнейшем нагружении проявляется преимущественное влияние концентрации напряжений вдоль линии сплавления шва с основным металлом и зона накопления повреждений становится более узкой и вытянутой. Влияние остаточных напряжений значительно сильнее проявляется при низких уровнях переменных напряжений. Наиболее интенсивное накопление усталостных повреждений происходит в области действия растягивающих остаточных напряжений (см. рис. 8.60).

Накопление усталостных повреждений в сварных соединениях при низких уровнях переменного нагружения происходит в основном за счет увеличения линейных размеров образовавшихся рассредоточенных зародышей. Высокие переменные напряжения приводят к одновременному образованию, последующему росту и объединению большого числа малых зародышей. С увеличением числа циклов нагружения происходит развитие и объединение очагов накопления сдвиговых деформаций с последующим образованием микротрещин длиной около 0,3 мм. На поверхности медных гальванопленок макротрещины проявляются в виде отдельных линий таких же размеров. Они локализованы у концентратора напряжений и развиваются преимущественно вдоль него.

Не все микротрещины в дальнейшем развиваются и объединяются в макротрещины. При низких уровнях нагружения наблюдалось преимущественное развитие одной-двух микротрещин до макроскопических размеров. При высоких напряжениях (325 МПа) одновременно развивалось большое число микротрещин, сливающихся затем в одну протяженную.

Кривые усталости тавровых соединений стали 17ГС, построенные для пяти различных стадий накопления усталостного повреждения, включая полное разрушение образцов, практически параллельны между собой (рис. 8.61). Разность логарифмов или отношение самих долговечностей слабо зависят от уровня нагружения. Это указывает на эквидистантность кривых усталости, построенных для различных стадий накопленного усталостного повреждения. Единой асимптотой для различных стадий является среднее значение предела выносливости соединения.

Аналогичные результаты были получены при испытании плоских образцов с отверстием. Образцы изготовлялись из листового проката стали Ст3. Дополнительными наплавками в зоне отверстия создавались остаточные напряжения разного знака. Средние значения пределов выносливости по раз-

Таблица 8.23. Сопротивление усталости образцов по разным критериям завершения испытаний

Серия образцов	Критерий	σ_R, МПа	σ_i, МПа	$\frac{\bar{N}}{\bar{N}\ (\text{ПРО})}$	Δ, %
В исходном состоянии	МОТ	134	170—240	0,1628—0,1854	±6,1
	КРТ	135	170—240	0,3945—0,4494	±6,1
	ПРО	135	170—240	1	0
Центральная наплавка	МОТ	101	140—220	0,1880—0,1969	±2,3
	КРТ	100	140—220	0,4425—0,4774	±3,7
	ПРО	101	140—220	1	0
Наплавка на кромку	МОТ	155	180—250	0,1353—0,1594	±7,5
	КРТ	154	180—250	0,3906—0,4454	±6,2
	ПРО	155	180—250	1	0

Примечание. МОТ — момент обнаружения трещины; КРТ — критический размер трещины; ПРО — полное разрушение образца.

ным критериям усталостного разрушения практически одинаковы при доверительной вероятности не ниже 95 % (табл. 8.23), разброс отношений средних долговечностей во всем диапазоне нагружения не превышает 5 %. Это указывает на практическую параллельность наклонных ветвей кривых усталости, соответствующих различным стадиям усталостного разрушения.

При блочном нагружении сварных соединений накопление усталостных повреждений носит преимущественно линейный характер [139]. Однако по мере приближения усталостного повреждения к предельной величине наблюдается отклонение от линейности в сторону увеличения долговечности, что связано с развитием повреждаемой зоны. Наиболее существенные отклонения от линейного накопления усталостных повреждений наблюдаются на стадии окончательного разрушения и происходят в основном в безопасную сторону. В этой связи усталостную долговечность сварных соединений при случайном нагружении вполне допустимо определять по принципу линейного суммирования из условия равенства накопленного повреждения единице. В случае оценки долговечности индивидуального соединения разброс предельной величины повреждения не превышает 10 % и слабо зависит от режима переменного нагружения.

Суммирование усталостных повреждений. Случайный характер нагружения, обусловливающий вариацию максимальных и минимальных значений цикла переменных напряжений, при расчетной оценке долговечности элементов конструкций учитывают на основе гипотез накопления усталостных повреждений. Наиболее часто используют гипотезу линейного суммирования усталостных повреждений, или правило Майнера [139]. В общем случае условие достижения предельного состояния при непрерывном изменении амплитуд напряжения имеет вид

$$\int_0^{N_p} dn/N(\sigma) = 1, \qquad (8.36)$$

где n — число циклов данного уровня нагружения; $N(\sigma)$ — предельное число циклов нагружения того же уровня.

При ступенчатом изменении нагрузки условие (8.36) принимает вид

$$\sum_{i=1}^{k} n_i/N_i = 1, \qquad (8.37)$$

где n_i, N_i — накопленное и предельное число циклов при напряжениях σ_i.

Суть линейной гипотезы состоит в предположении, что повреждение, вызываемое данным циклом напряжений, не зависит от предыстории нагружения и текущего состояния материала, суммируясь с повреждениями, привнесенными предыдущими циклами. Известны различные модификации правила линейного суммирования усталостных повреждений, использующие деформационные и энергетические представления, описание кривой усталости уравнениями различного вида [9, 134, 135]. В частности, учет непропорционального вклада циклов повышенной и пониженной амплитуд напряжений осуществляется на основе гипотезы Серенсена — Когаева [140]:

$$\sum_{i=1}^{k} n_i/N_i = a. \qquad (8.38)$$

Величина a определяется в зависимости от наличия в спектре нагружения перегрузочных циклов, их количества и амплитуды.

Для высокопрочных материалов предельное усталостное повреждение уменьшают на величину, пропорциональную максимальным напряжениям спектра нагрузок [135]:

$$\sum_{i=1}^{k} n_i/N_i = 1 - \max \sigma_i/\sigma_в, \qquad (8.39)$$

где $\sigma_в$ — временное сопротивление материала.

Дополнительный запас по долговечности при использовании соотношений типа (8.37) обеспечивают, принимая в расчетах параметры уравнений кривой усталости, отвечающие вероятности разрушения $P < 50$ %. При этом предельное по сопротивлению усталости состояние определяется соотношением

$$\sum_{i=1}^{k} n_i/(N_i)_p = 1. \qquad (8.40)$$

В отличие от рассмотренных нелинейные модели строятся в предположении монотонного изменения интенсивности накопления усталостных повреждений с увеличением числа циклов нагружения, а также уровней напряжений [23, 134, 140]. Для учета стадий инициирования и развития трещин усталости определяются соответствующие им меры повреждения D_1 и D_2 [134].

В практических расчетах нелинейные модели накопления усталостных повреждений используются редко. В этой связи важно установить условия, при которых справедливость линейной гипотезы не нарушается, и дать оценку возможной погрешности расчетов в зависимости от принимаемого критерия предельного состояния.

Экспериментальная проверка линейной гипотезы суммирования повреждений. Условие (8.37) наиболее просто проверяется по результатам усталостных испытаний при нагружении образцов с двухступенчатой однократной сменой напряжений. Для такого нагружения соотношение (8.37) запишется в виде равенства

$$n_1/N_1 + n_2/N_2 = 1, \qquad (8.41)$$

где n_1, N_1 — соответственно наработанное и предельное число циклов нагружения при напряжении σ_1; n_2, N_2 — то же, при напряжениях σ_2.

Ряд экспериментальных исследований, выполненных при двухступенчатом нагружении, обнаруживают отклонение от линейной гипотезы накопления усталостных повреждений (рис. 8.62). В зависимости от очередности приложения высоких и низких напряжений накопление усталостных повреждений по сравнению с регулярным нагружением ускоряется или замедляется. При двухступенчатом нагружении сталей переход от низких напряжений к более высоким способствует увеличению относительной долговечности ($a > 1$). Если же испытания начинаются с более высоких напряжений, а заканчиваются при меньших, то суммарная относительная долговечность снижается ($a < 1$) [15, 90]. Особенно сильное снижение относительной долговечности вызывают сравнительно высокие кратковременные перегрузки. Наибольшее отклонение от линейности при этом наблюдается в области малых значений отношения n_1/N_1: $0{,}05 < n_1/N_1 < 0{,}25$.

Экспериментальные исследования [12] подтверждают, что и для сварных соединений накопление усталостных повреждений может существенным образом зависеть от истории нагружения (см. рис. 8.62). При однократной смене напряжений переход от больших нагрузок к меньшим в диапазоне отношения n_1/N_1 от 0,05 до 0,2 вызывает резкое отклонение от линейного закона в сторону увеличения значений a. При смене меньших нагрузок на большие наблюдается обратное явление, т. е. относительная долговечность сварных соединений снижается. Таким образом, для сварных соединений характерна противоположная зависимость изменения относительной долговечности от последовательности двухступенчатого нагружения, чем для основного металла. Это вызвано влиянием остаточных растягивающих напряжений, в наибольшей степени снижающих сопротивление усталости соединений при низких уровнях нагружения. Первоначальное приложение более высоких нагрузок приводит к релаксации остаточных напряжений, уменьшающей их отрицательное влияние при последующем нагружении с низкими уровнями напряжений.

Справедливость гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений подтверждается при многократной смене уровней ступенчатого нагружения. В таких случаях явления упрочнения и разупрочнения металла чередуются и наибольшее влияние на конечные выводы оказывает в основном

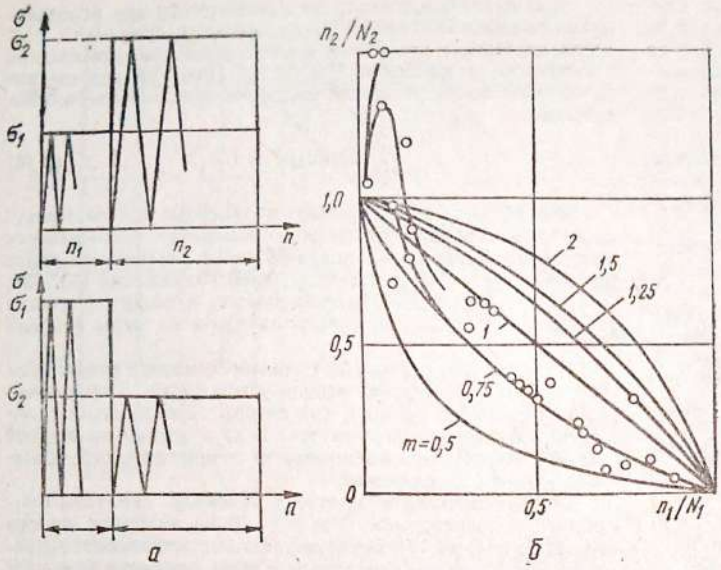


Рис. 8.62. Результаты испытания образцов с однократной сменой напряжений:

а — схемы нагружения; *б* — результаты усталостных испытаний сварочных соединений.

естественный разброс долговечности образцов. Предельное значение относительного повреждения при этом практически не зависит от порядка начального перехода с высшей ступени на низшую или, наоборот, с низшей ступени на высшую. В том и другом случаях процесс накопления усталостных повреждений можно считать линейным.

Предельная относительная долговечность a_c при двухступенчатом блочном нагружении с их многократным чередованием вычисляется по формуле

$$\sum_{i=1}^{k} (n_1)_i/\bar{N}_1 + \sum_{i=1}^{k} (n_2)_i/\bar{N}_2 = a_c, \qquad (8.42)$$

где $(n_1)_i$ и $(n_2)_i$ — число циклов нагружения на уровнях σ_1 и σ_2 соответственно, наработанное в i-м блоке нагружения; $\bar{N}_1$, $\bar{N}_2$ — средние значения долговечности на тех же уровнях нагружения. Представленные в табл. 8.24 результаты программных испытаний образцов тавровых соединений с поперечными угловыми швами свидетельствуют, что пределы изменения значений a_c, соответствующие различным критериям завершения усталостных испытаний, больше, чем при регулярном нагружении (a_p).

Наличие в спектре нагружения переменных напряжений ниже предела выносливости с учетом его рассеяния не оказывает заметного влияния на долговечность соединений до образования трещин усталости. Однако напряжения такого уровня могут сказываться на стадии развития усталостного разрушения.

Таблица 8.24. **Результаты программных испытаний тавровых соединений**

Критерий	КРТ			ПРО		
$\frac{n_1}{N_1}$	0,10	0,25	0,75	0,10	0,25	0,75
a_c	1,30	0,75	0,50	1,30	0,75	0,42
	1,10	0,66	0,24	0,96	0,60	0,22
	0,80	0,58	0,11	0,74	0,52	0,05
$\bar{a}_c$	1,07	0,66	0,28	1,00	0,62	0,23
a_p	0,90	0,75	0,25	0,90	0,75	0,25
$\frac{\bar{a}_c - a_p}{a_p}$, %	+19	−12	+12	+11	−17	−8

Для описания распределения относительной долговечности сварных соединений при двухступенчатом блочном нагружении, как и при регулярном, можно использовать логарифмически нормальный закон. Систематического смещения средних значений предельных относительных долговечностей образцов от теоретических значений в сторону превышения или снижения не наблюдается. Следовательно, в качестве критерия предельного по сопротивлению усталости состояния можно принять условие $\bar{a}_c = 1$.

Накопление усталостных повреждений материалов исследовалось также при многоступенчатых программных испытаниях и при случайном характере чередования нагрузок. Полученные при этом результаты подтверждают возможность использования в практических расчетах гипотезы линейного суммирования повреждений и в этих случаях [15, 90, 135, 140]. Исключение, как правило, составляют спектры напряжений с большими пиковыми перегрузками.

Приведенные данные позволяют заключить, что гипотеза линейного суммирования усталостных повреждений вполне приемлема для инженерных расчетов сварных конструкций, испытывающих случайное нагружение. При этом средняя относительная долговечность может приниматься равной единице независимо от принятой в расчете стадии усталостного разрушения. Вместе с тем в расчетах по начальной стадии накопления усталостных повреждений и по развитию трещины следует по-разному учитывать уровни действующих напряжений. В первом случае напряжения, не превышающие значений нижней границы рассеяния пределов выносливости, установленной для вероятности 0,95, в расчет можно не принимать. В то же время напряжения такого уровня должны учитываться при расчетах сварных соединений на усталость по критерию полного разрушения.

8.8. СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Двухчастотное нагружение является специфическим, но довольно распространенным видом регулярных процессов переменной нагруженности. Оно связано с одновременным действием двух периодических нагрузок с различными амплитудами, частотами и формами циклов (рис. 8.63). Наиболее широко распространено двухчастотное нагружение с наложением низкоамплитудной высокочастотной составляющей на основной низкочастотный спектр нагрузок. Это относится, напри

мер, к элементам конструкций, испытывающих одновременно переменные напряжения и вибрации.

При определении циклической долговечности большинства изделий и конструкций отрицательное воздействие вибрации обычно не учитывается либо его учет сводится к увеличению амплитуды основного переменного нагружения на величину, соответствующую высокочастотной составляющей цикла напряжений. Однако, как показали исследования [144—147, 149, 150], сопротивление усталости зависит не только от величины амплитуд напряжений и их отношений, но также от номинальных значений частот, их отношений, сдвига фаз, свойств материала и других факторов. Все это необходимо учитывать при оценке долговечности материалов и сварных соединений в условиях двухчастотного нагружения.

Основные положения и результаты экспериментальных исследований. При двухчастотном нагружении основная, обычно низкочастотная, нагрузка может иметь синусоидальную, треугольную, трапецеидальную и другие формы цикла, а дополнительная высокочастотная составляющая, как правило, изменяется по гармоническому закону. Если обе составляющие имеют синусоидальную или близкую к ней форму цикла, то характер изменения во времени суммарных напряжений двухчастотного режима, называемого иногда бигармоническим, может быть описан выражением

$$\sigma_a = \sigma_{a1} \sin(2\pi f_1 \tau) + \sigma_{a2} \sin(2\pi f_2 \tau + \varphi), \qquad (8.43)$$

где σ_{a1} и σ_{a2} — амплитуды; f_1 и f_2 — частоты переменных напряжений низкочастотной и высокочастотной составляющих соответственно; τ — время нагружения; φ — сдвиг фаз между составляющими.

При аддитивном двухчастотном нагружении изменяется не только амплитуда суммарных циклических напряжений, но также и средние напряжения высокочастотной составляющей. Такое двухчастотное нагружение характерно для растяжения — сжатия, изгиба, кручения и их комбинаций. Иногда к двухчастотному относят мультипликативное нагружение при изгибе с вращением, для которого закон изменения напряжений определяется перемножением составляющих:

$$\sigma_a = [\sigma_{a1} + \sigma_{a2} \sin(2\pi f_2 \tau)] \sin(2\pi f_1 \tau + \varphi). \qquad (8.44)$$

При таком нагружении закон изменения напряжений во времени, а также степень и характер влияния дополнительных высокочастотных напряжений иные, чем при аддитивном двухчастотном нагружении. Это не может не сказаться на сопротивлении усталости материалов и сварных соединений. В зависимости от параметров мультипликативного нагружения его роль может сводиться к повышению или к понижению долговечности материалов по сравнению с наблюдаемой в условиях одночастотного нагружения [147]. Для подавляющего большинства сварных металлоконструкций и сооружений характерно рассматриваемое в дальнейшем аддитивное двухчастотное нагружение.

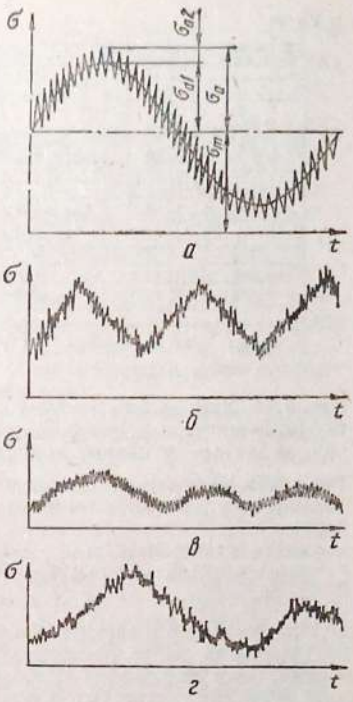
Силовые и частотные параметры эксплуатационных нагрузок изделий и сооружений, воспринимающих двухчастотное нагружение, могут изменяться в широких пределах (табл. 8.25). При этом отношение амплитуд напряжений σ_{a2}/σ_a варьирует от 3 до 50 %, а отношение частот f_2/f_1, как правило, превышает десятикратное, хотя в общем случае оно может изменяться от единицы до нескольких тысяч.

Таблица 8.25. Амплитудные и частотные отношения составляющих нагрузок

Элементы конструкций, изделия	Изменение	
	амплитуд σ_{a2}/σ_a	частот f_2/f_1
Главные балки и раскосы ферм железнодорожных мостов	0,05—0,25	30—100
Металлические конструкции радио- и телевизионных мачт	0,1—0,5	1,5—150
Подкрановые балки	0,01—0,25	10—1000
Элементы энергетических установок	0,03—0,5	100—1000
Гидротурбины	0,1—0,5	2,5—150

Рис. 8.63. Примеры двухчастотного нагружения:

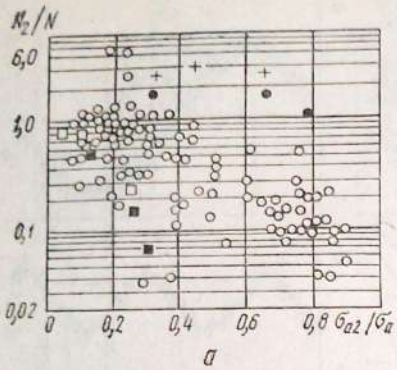
а — схематическое представление; *б* — лопасть колеса гидротурбины [145]; *в, г* — главные балки и раскосы железнодорожного моста соответственно [148].



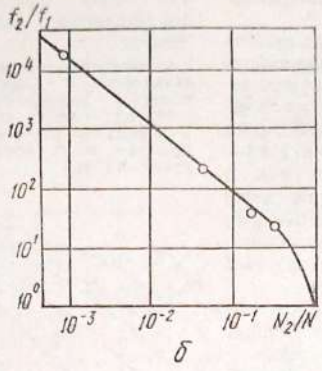
При малых отношениях частот, в зависимости от соотношения напряжений и сдвига фаз между составляющими, долговечность материалов в условиях аддитивного двухчастотного нагружения может снижаться, оставаться неизменной или повышаться по сравнению с долговечностью при одночастотном нагружении N, соответствующей суммарной амплитуде напряжения σ_a (рис. 8.64). В то же время при больших отношениях частот, когда максимальное значение суммарного цикла напряжений мало зависит от сдвига фаз между составляющими и равно сумме их амплитуд, долговечность снижается. В этом случае существенное влияние на изменение долговечности оказывают отношения амплитуд σ_{a2}/σ_a и частот f_2/f_1. С возрастанием последнего отношения долговечность монотонно снижается.

К настоящему времени накоплен значительный объем экспериментальных данных по сопротивлению усталости материалов и элементов конструкций при двухчастотном нагружении. Полученные различными авторами результаты анализируются с позиций линейного суммирования повреждений [144, 146], энергетических представлений [145] на основе ряда эмпирических зависимостей [144, 147, 149]. В большинстве исследований для оценки долговечности при двухчастотном нагружении используется суммарное напряжение $\sigma_a = \sigma_{a1} + \sigma_{a2}$ и устанавливается связь между отношениями σ_{a2}/σ_a и N_2/N. Необходимо отметить, что при линейном изменении амплитуд напряжений σ_{a1} и σ_{a2} отношение σ_{a2}/σ_a меняется нелинейно, что усложняет получаемые расчетные зависимости. Изменение долговечности целесообразнее оценивать отношением N_1/N_2, а не N_2/N, т. е. устанавливать влияние высокочастотной составляющей на снижение исходной долговечности N_1, соответствующей нагружению с амплитудой σ_{a1}, а не условной долговечности N при суммарной амплитуде σ_a. Преимущества использования таких отношений показаны в работах [149, 150].

На рис. 8.65 в координатах $\sigma_{a2}/\sigma_{a1} - \lg N_1/N_2$ представлены результаты испытаний, проведенных при аддитив-



а



б

Рис. 8.64. Зависимость долговечности от отношения амплитуд (*а*) и отношения частот (*б*) при двухчастотном нагружении по данным различных авторов [23].

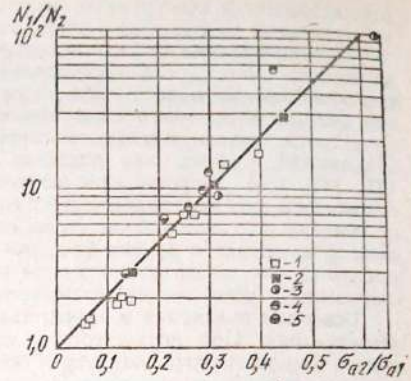


Рис. 8.65. Результаты испытаний сталей и алюминиевых сплавов при двухчастотном нагружении по данным ряда авторов [149]:

1 — сплав Д16АТ, растяжение; *2* — сплав Д16Т, растяжение; *3* — сталь с 0,23 % С, изгиб; *4* — сталь 0Х12НДЛ, изгиб; *5* — сталь 45, изгиб.

ном нагружении в диапазоне отношений частот $f_2/f_1 = 100...600$. Несмотря на то что образцы отличались формой, размерами, были изготовлены из различных материалов, результаты испытаний согласуются между собой. В этой системе координат между отношениями σ_{a2}/σ_{a1} и N_1/N_2 в довольно широком диапазоне изменения параметров наблюдается линейная связь.

Определение долговечности по исходным кривым усталости. Наличие линейной связи между отношениями амплитуд напряжений σ_{a2}/σ_{a1} и долговечностей N_1/N_2 позволяет оценивать влияние наложения высокочастотной составляющей σ_{a2} по изменению исходного значения долговечности N_1, соответствующей одночастотному нагружению σ_{a1}:

$$N_2 = N_1/\varkappa, \qquad (8.45)$$

где $\varkappa$ — коэффициент, зависящий от отношения амплитуд σ_{a2}/σ_{a1} и частот f_2/f_1.

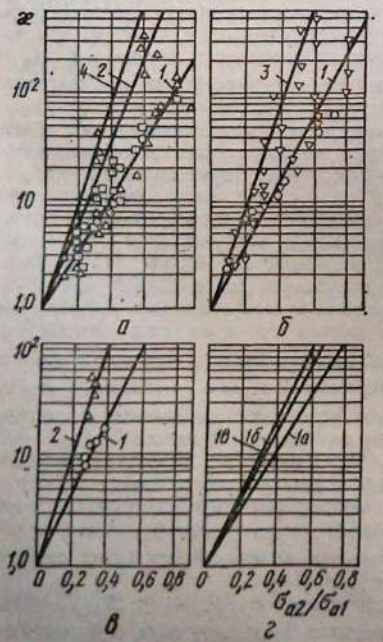


Рис. 8.66. Изменение коэффициента $\varkappa$ низкоуглеродистой 22 К (*а*), хромоникелевой 12Х18Н10Т (*б*), высокопрочной (*в*) сталей и тех же сталей (*г*) под влиянием отношения частот:

1, *1а*, *1б*, *1в* — $f_2/f_1 = 10^2$; *2* — $f_2/f_1 = 10^3$; *3* — $f_2/f_1 = 3 \cdot 10^3$; *4* — $f_2/f_1 = 5 \cdot 10^3$.

Поскольку линейная зависимость $\sigma_{a2}/\sigma_{a1} - \lg \varkappa$ наблюдается при анализе экспериментальных данных, полученных на разнообразных по форме, размерам и материалу образцах, при различных, хотя и близких по значению, коэффициентах асимметрии цикла напряжений, можно предположить, что коэффициент $\varkappa$ инвариантен к этим параметрам. Однако маловероятно, что коэффициент $\varkappa$ не зависит от отношения частот нагружения f_2/f_1. Результаты проверки этих положений и установление аналитической зависимости коэффициента $\varkappa$ от параметров двухчастотного нагружения рассмотрены в работе [150].

Изменчивость коэффициента $\varkappa$ под влиянием концентрации напряжений, остаточной напряженности, асимметрии цикла, вида и частоты нагружения, температуры, механических свойств материала и критерия завершения испытаний устанавливали по результатам сравнительных испытаний крупномасштабных образцов в условиях одно- и двухчастотного нагружений при различных напряжениях от уровня, несколько превышающего предел выносливости образцов, до предела текучести материала. При этом отношение σ_{a2}/σ_{a1} изменялось от 0,05—0,1 до 0,6—0,9. Плоские образцы сечением 20×155 мм изготовляли из низкоуглеродистой стали 22К ($\sigma_т = 300$ МПа, $\sigma_в = 510$ МПа) и хромоникелевой стали 12Х18Н10Т ($\sigma_т = 350$ МПа, $\sigma_в = 650$ МПа). Боковые выкружки создавали в различных образцах концентрацию напряжений α_σ, равную 1,5; 2,5 и 3,5. Образцы из высокопрочной стали ($\sigma_т = 1070$ МПа, $\sigma_в = 1120$ МПа) имели сечение 18×80 мм и концентратор в виде отверстия в утоненной части пластины. Учитывая существенное влияние на сопротивление усталости сварных изделий остаточных напряжений, действие этого фактора на изменение коэффициента $\varkappa$ оценивали на образцах с наплавками на кромку и на реальном соединении с продольными ребрами жесткости. В зонах концентраторов наплавки создавали исходные сварочные остаточные напряжения, близкие к пределу текучести основного материала. Влияние температуры изучали на стали 12Х18Н10Т.

Испытания осуществляли как при осевом нагружении, так и в условиях изгиба. В случае низкочастотного нагружения испытания проводили при симметричном, отнулевом и асимметричном ($R_\sigma = 0,5$) циклах напряжений, имеющих треугольную форму. Для исключения погрешностей, связанных с возможным влиянием частот при одно- и двухчастотном нагружениях, частота испытаний f_1 в многоцикловой области не превышала 20 мин$^{-1}$. Частота f_2 составляла 300 мин$^{-1}$ при осевом нагружении и 1800 мин$^{-1}$ при изгибе. Требуемое отношение f_2/f_1 в диапазоне $10^2 - 5 \cdot 10^3$ достигалось варьированием частоты f_1. Критерием завершения усталостных испытаний служила начальная стадия развития трещины. Испытания прекращали после того, как глубина трещины достигала 2—3 мм. Часть образцов испытывали до полного излома.

Каждый из исследуемых факторов существенно изменял сопротивление усталости образцов при одно- и двухчастотном нагружениях. Однако проведенные испытания подтвердили, что коэффициент $\varkappa$ остается инвариантным к изменениям, связанным со степенью концентрации напряжений, остаточ-

ной напряженностью, характеристикой цикла, видом и уровнем нагружения, температурой и критерием завершения усталостных испытаний. При этом все зависимости $\lg \varkappa$ от σ_{a2}/σ_{a1} носят устойчивый линейный характер, аналогичный представленному на рис. 8.65. В то же время на изменение коэффициента $\varkappa$ значительное влияние оказывают амплитудные (см. рис. 8.60) и частотные (рис. 8.66) отношения. С возрастанием этих отношений значение $\varkappa$ существенно повышается. Эти два фактора в основном и определяют значение коэффициента $\varkappa$. В меньшей степени он чувствителен к свойствам материала: с ростом прочностных характеристик стали долговечность при двухчастотном нагружении несколько снижается, а коэффициент $\varkappa$ увеличивается. Об этом можно судить по совмещению зависимостей, относящихся к одним и тем же значениям f_2/f_1 для различных сталей. Важно отметить, что при изменении частотных отношений и прочностных свойств материала между величинами $\lg \varkappa$ и σ_{a2}/σ_{a1} сохраняется линейная связь.

Установленные зависимости приводят к следующему выражению для определения коэффициента снижения долговечности при двухчастотном нагружении:

$$\varkappa = (f_2/f_1)^{\vartheta \frac{\sigma_{a2}}{\sigma_{a1}}}, \qquad (8.46)$$

где ϑ — коэффициент, отражающий влияние свойств материала:

Низкоуглеродистые стали	1,3
Хромоникелевые аустенитные стали (типа 12Х18Н10Т)	1,5
Высокопрочные стали	1,7
Алюминиевые сплавы (Д16Т, Д16АТ)	1,3

Величину $\varkappa$ можно определить и по номограмме, представленной на рис 8.67.

Заменяя в исходном уравнении (8.45) коэффициент $\varkappa$ его значением (8.46), получаем окончательную формулу для определения долговечности при двухчастотном нагружении в виде

$$N_2 = \frac{N_1}{\varkappa} = \frac{N_1}{(f_2/f_1)^{\vartheta \frac{\sigma_{a2}}{\sigma_{a1}}}} = N_1 \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^{\vartheta \frac{\sigma_{a2}}{\sigma_{a1}}}, \qquad (8.47)$$

где N_1 — долговечность материала, соединения, детали и т. д., соответствующая в заданных условиях низкочастотному нагружению с амплитудой σ_{a1}.

Согласно выражению (8.47), долговечность при двухчастотном нагружении N_2 всегда меньше N_1. Вместе с тем выше отмечалось, что при небольших отношениях частот в отдельных исследованиях наблюдалось не снижение, а повышение долговечности при двухчастотном нагружении. В этой связи возникает необходимость определения границ применимости соотношения (8.47).

В случае небольших значений отношения f_2/f_1 изменение суммарной амплитуды напряжений зависит не только от величины σ_{a2}/σ_{a1}, но и от сдвига фаз между составляющими. В некотором диапазоне сдвига фаз φ суммарная амплитуда σ_a может уменьшаться до значений ниже, чем σ_{a1}. Если учесть, что при отношении $\sigma_{a2}/\sigma_{a1} < 0{,}3$ искажается и форма цикла результирующей нагрузки σ_a без появления дополнительных экстремумов, то повышение предела выносливости в данных условиях под влиянием двухчастотного нагружения вполне объяснимо. При $\sigma_{a2}/\sigma_{a1} < 0{,}5$ суммарная амплитуда напряжений в зависимости от угла φ может быть как меньше, так и больше амплитуды напряжений низкочастотной составляющей. В соответствии с этим величина N_2 может повышаться или понижаться по сравнению с N_1. При этом главная роль в изменении долговечности остается за предельной амплитудой и асимметрией цикла напряжений. Хотя в интервале значений $0{,}3 < \sigma_{a2}/\sigma_{a1} < 0{,}5$ на осциллограмме изменения напряжений σ_a появляются дополнительные экстремумы, они

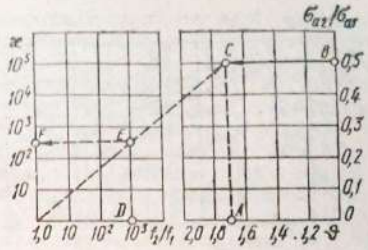


Рис. 8.67. Номограмма для определения коэффициента $\varkappa$.

еще незначительны и, по-видимому, не влияют на процесс накопления повреждений. При отношении $\sigma_{a2}/\sigma_{a1} > 0{,}5$ суммарная амплитуда напряжений превышает амплитуду низкочастотной составляющей. Долговечность N_2 снижается под влиянием этого фактора и, возможно, вследствие возникновения дополнительных экстремумов.

Иная картина наблюдается при отношении частот $f_2/f_1 \geqslant 10$. Независимо от амплитуд и начальных фаз составляющих нагрузок в таком случае имеем $\sigma_a > \sigma_{a1}$. Как показал анализ [150], отклонение напряжений σ_a от максимально возможного значения при синфазном сложении гармонических нагрузок не превышает 5 % во всем диапазоне изменения отношения σ_{a2}/σ_{a1}. Накоплению повреждаемости способствуют также отдельные циклы напряжений, изменяющиеся с частотой f_2. При таких условиях N_2 всегда значительно меньше N_1. Следовательно, при $f_2/f_1 \geqslant 10$ формула (8.47) может применяться без ограничений. В случае $f_2/f_1 < 10$ она справедлива при фиксированном значении сдвига фаз, соответствующем максимальному значению результирующей амплитуды напряжений σ_a. Для других значений сдвига фаз формула (8.47) может показывать заниженные значения N_2.

Справедливость формулы (8.47) при $f_2/f_1 > 10$ следует не только из результатов проведенного анализа. Она подтверждается также сопоставлением расчетных значений с результатами экспериментальных работ, выполненных другими авторами. Как следует из табл. 8.26, отношения расчетных значений к экспериментально установленным в большинстве случаев близки к единице, а отдельные отклонения находятся в интервале рассеяния $N_{2р}/N_{2э} = 0{,}75...1{,}5$.

Таким образом, метод оценки долговечности при двухчастотном нагружении по исходным кривым усталости одно-

Таблица 8.26. **Сопоставление расчетных значений долговечности (8.47) с экспериментальными**

Материал	Условия испытания		Отношение $N_{2р}/N_{2э}$	Литературный источник
	f_2/f_1	σ_{a2}/σ_{a1}		
Сталь, 0,23 % С	40	0,33	1,01	[153]
Сталь 45	100	0,143	0,83	[145]
	100	0,214	1,07	
	100	0,296	1,02	
Сталь 0Х12НДЛ	100	0,26	0,89	[145]
	100	0,435	1,50	
Сплав Д16АТ	200	0,134	0,81	[151]
	200	0,266	1,10	
	200	0,4	0,96	
	200	0,062	0,87	
	200	0,125	0,81	
	200	0,25	1,19	
	200	0,31	1,21	
	200	0,06	0,90	
	200	0,12	0,77	
	200	0,23	1,03	
	200	0,33	1,38	
Сплав Д16Т	600	0,15	1,11	[152]
	600	0,30	0,90	
	600	0,45	0,81	

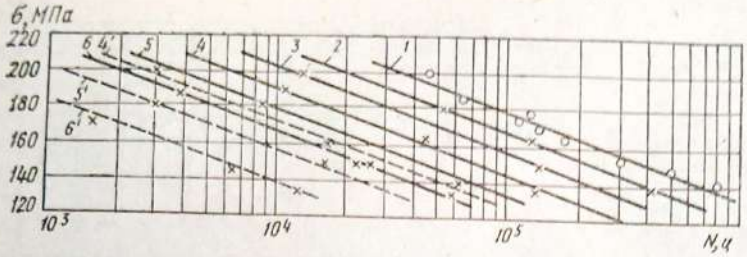


Рис. 8.68. Изменение долговечности при одночастотном и двухчастотном нагружении стали 22К:

1 — одночастотное отнулевое нагружение; *2* — двухчастотное нагружение, $\sigma_{a2}/\sigma_{a1} = 0{,}1$; $f_2/f_1 = 100$; *3* — то же, $\sigma_{a2}/\sigma_{a1} = 0{,}2$; *4, 5, 6* — то же, $\sigma_{a2}/\sigma_{a1} = 0{,}3$; 0,4 и 0,5 соответственно; *4′, 5′, 6′* — то же, $f_2/f_1 = 1000$.

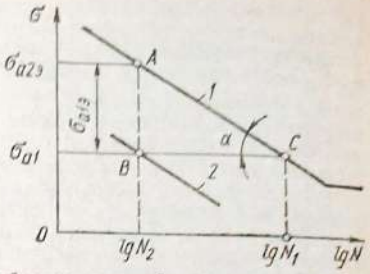


Рис. 8.69. Схема для определения эквивалентного напряжения, соответствующего по повреждающему действию двухчастотному нагружению:

1 — исходная кривая усталости; *2* — изменение долговечности при двухчастотном нагружении.

частотного нагружения вполне пригоден для инженерных расчетов и может использоваться в широком диапазоне изменения амплитудных и частотных отношений напряжений.

Циклическая трещиностойкость. Скорость развития усталостных трещин при переменном нагружении зависит от размаха коэффициента интенсивности напряжений. Определение этого коэффициента в условиях двухчастотного нагружения связано с определенными трудностями. Это вызвано тем, что в данном случае размах напряжений не может быть представлен разностью суммарных максимального и минимального напряжений цикла, поскольку долговечность N_{Σ}, полученная на уровне напряжений, равном сумме амплитуд составляющих двухчастотного нагружения, может существенно отличаться от долговечности N_2. В связи с этим для определения коэффициента интенсивности напряжений при двухчастотном нагружении ΔK_2 необходимо найти такое одночастотное нагружение, которое по своему повреждающему действию было бы эквивалентно двухчастотному нагружению.

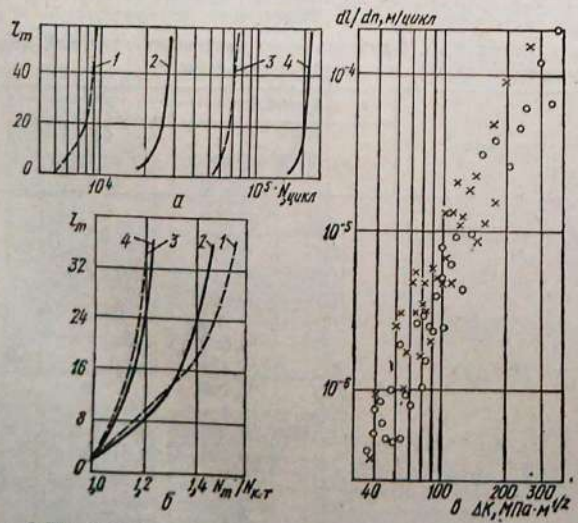


Рис. 8.70. Результаты испытаний образцов стали 12Х18Н10Т при одночастотном (*1*, *3*) и двухчастотном (*2*, *4*) нагружениях в различных координатах:

а — зависимость длины усталостной трещины $l_т$ от числа циклов N; *б* — зависимость длины усталостной трещины от отношения долговечности до образования усталостной трещины $N_{к.т}$ к текущему значению $N_т$; *в* — зависимость скорости развития трещин от коэффициента напряжений.

Роль высокочастотной составляющей в изменении скорости развития трещин при двухчастотном нагружении изучена недостаточно полно. Тем не менее имеющиеся опытные данные [154—156] показывают, что такое нагружение снижает сопротивление материала развитию усталостной трещины примерно так же, как и на стадии ее образования, т. е. в $\varkappa = N_1/N_2$ раз.

Отмеченная ранее инвариантность коэффициента $\varkappa$ к концентрации напряжений, остаточной напряженности, температуре испытаний, характеристике цикла напряжений и виду нагружения приводит к тому, что кривые усталости, характеризующие сопротивление двухчастотному нагружению при различных фиксированных значениях амплитудных и частотных отношений, параллельны кривой усталости, соответствующей одночастотному нагружению. Повышение отношений амплитуд и частот приводит лишь к увеличению параллельного смещения этих кривых в область меньшей долговечности (рис. 8.68). Аналогичного снижения долговечности можно достигнуть соответствующим увеличением амплитуды низкочастотного нагружения.

Установленные закономерности позволяют определить приращение амплитуды низкочастотного напряжения, вызывающее действие, эквивалентное по повреждению от высокочастотной составляющей двухчастотного нагружения (рис. 8.69). Точка C на исходной кривой усталости соответствует низкочастотному напряжению σ_{a1}. При переходе к двухчастотному нагружению, в котором на основную низкочастотную составляющую σ_{a1} накладывается высокочастотная составляющая σ_{a2}, долговечность N_1 снижается до значения N_2 (точка B). По напряжениям это эквивалентно повышению низкочастотного напряжения σ_{a1} на величину $\sigma_{a1э}$ (точка A). Отсюда следует:

$$\sigma_{a1э} = (\lg N_1 - \lg N_2)\,\mathrm{tg}\,\alpha = \lg \varkappa\,\mathrm{tg}\,\alpha, \qquad (8.48)$$

где α — угол наклона исходной кривой усталости.

Переходя к размаху напряжения $2\sigma_{a2э} = 2(\sigma_{a1} + \sigma_{a1э})$ и заменяя $\varkappa$ соответствующим выражением из уравнения (8.47), искомое значение размаха коэффициента интенсивности напряжений при двухчастотном нагружении можно представить в виде

$$\Delta K_2 = 2\left[\sigma_{a1} + \vartheta\,\frac{\sigma_{a2}}{\sigma_{a1}}\,\lg\frac{f_2}{f_1}\,\mathrm{tg}\,\alpha\right]\sqrt{\pi l}\,f_к. \qquad (8.49)$$

Полученное выражение используется при расчетном определении скорости развития усталостной трещины в условиях двухчастотного нагружения по известному степенному уравнению вида

$$dl/dN_2 = C\,(\Delta K_2)^n, \qquad (8.50)$$

где C и n — константы, зависящие от свойств материала.

С целью экспериментальной проверки правомерности определения по изложенной схеме размаха эффективного коэффициента интенсивности напряжений были проведены усталостные испытания до полного разрушения крупномасштабных образцов стали 12Х18Н10Т с фиксацией кинетики роста усталостных трещин [23].

Плоские образцы имели на боковых гранях выкружки, которые создавали концентрацию напряжений $\alpha_\sigma = 2{,}5$. Испытания осевой нагрузкой при отнулевом цикле осуществлялись в условиях одно- и двухчастотного мягкого растяжения.

Одночастотная нагрузка и низкочастотная составляющая двухчастотной нагрузки имели треугольную форму цикла и частоту изменения соответственно 20 и 0,3 мин$^{-1}$. Отношение частоты гармонической высокочастотной составляющей f_2 к частоте низкочастотной составляющей f_1 равнялось 100. Отношение амплитуд напряжений σ_{a2}/σ_{a1} составляло 0,25 и 0,35. Размеры усталостных трещин при испытаниях измеряли оптическими микроскопами типа МБС-9 с разрешающей способностью 0,014 мм. Результаты испытаний образцов в различных координатах представлены на рис. 8.70.

При использовании координат $N - l_т$ (см. рис. 8.70, *а*) оценить влияние на скорость роста усталостных трещин высокочастотной составляющей, уровня нагружения и других факторов не представляется возможным. Более наглядное представление об интенсивности усталостного разрушения при одно- и двухчастотном нагружениях можно получить в координатах $N_т/N_{к.т} - l_т$ (см. рис. 8.70, *б*), сопоставляя периоды относительной живучести образцов от начальной стадии развития трещины $N_{к.т}$ до полного излома. В данном случае как при одночастотном, так и при двухчастотном нагружениях число циклов до полного разрушения образцов в 1,2—1,6 раза превышает значение $N_{к.т}$, соответствующее начальной стадии развития трещины ($l = 1{,}5...2$ мм). Повышение уровня одночастотной нагрузки сопровождается заметным снижением относительной интенсивности усталостного разрушения. Эти данные свидетельствуют также о том, что значение $N_{к.т}$ практически не зависит от размера трещины, принимаемого в качестве критерия усталостного разрушения. При этом абсолютное значение скорости развития усталостных трещин в условиях двухчастотного нагружения в $\varkappa$ раз больше, чем при одночастотном нагружении. Однако и в этом случае, не зная уровня эффективных напряжений, невозможно представить полученные данные в обобщенном виде через коэффициент интенсивности напряжений.

Наиболее корректное сопоставление результатов испытаний можно выполнить, определяя коэффициенты интенсивности напряжений по выражению (8.49) соответственно для одно- и двухчастотного нагружений с использованием логарифмических координат $\Delta K - dl/dN$. Из рис. 8.70, *в* следует, что в этом случае результаты испытаний образцов при одно- и двухчастотном нагружениях располагаются в единой полосе разброса. Тем самым подтверждена справедливость основных положений, принятых при выводе формулы (8.49).

Проведенные исследования позволяют заключить, что оценку скорости развития усталостной трещины при двухчастотном нагружении можно проводить с использованием соответствующих зависимостей, полученных при одночастотном нагружении через размахи эффективных по повреждающему действию переменных напряжений.

8.9. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ

В исходном состоянии сварные соединения обладают значительно меньшим сопротивлением усталости, чем основной металл. Поэтому нередко возникает необходимость в проведении дополнительных обработок.

Все способы повышения сопротивления усталости соединений можно разделить на две группы: 1) основанные на уменьшении концентрации напряжений механический, аргонодуговой и воздушно-плазменный виды обработки швов; 2) основанные на снятии растягивающих либо создании в зонах концентраторов благоприятных сжимающих остаточных напряжений общая термическая обработка изделия, предварительная статическая перегрузка, поверхностный наклеп, точечный и местный нагрев, пластическое обжатие, взрывная и ультразвуковая ударная обработки.

Механическая обработка. Этот вид обработки нашел наиболее широкое распространение на практике, поскольку другие способы повышения сопротивления усталости нормами проектирования и изготовления строительных конструкций не регламентированы [169, 177, 222].

Чаще всего механическая обработка выполняется ручным абразивным инструментом или специальными фрезами. При этом следы от механической обработки должны располагаться вдоль действующих усилий. Выпуклость стыкового шва снимается полностью либо тщательно обрабатывается только переходная зона. В том и другом случаях концентрация напряжений практически отсутствует. При этом улучшается также качество поверхности металла в зонах обработки. Пределы выносливости стыковых соединений после механической обработки резко возрастают и практически достигают уровня пределов выносливости основного металла (табл. 8.27). После обработки не наблюдается снижение сопротивления усталости и у стыковых соединений термически упрочненных сталей, несмотря на то что они могут иметь участки с ухудшенными механическими свойствами в ЗТВ (см. табл. 8.27, соединение термически упрочненной стали 10Г2С1). Необходимо отметить, что при наличии внутренних дефектов (непроваров, шлаковых включений, пор) в стыковых швах механическая обработка не обеспечивает равнопрочность соединения основному металлу при циклическом нагружении.

Значительно меньший эффект от механической обработки достигается у других видов сварных соединений и различного рода прикреплений второстепенных деталей к основным несущим элементам конструкций. Пределы выносливости тавровых соединений существенно повышаются (табл. 8.28) вследствие механической обработки только в тех случаях, когда соединения выполнены с полным проваром и имеют плавные переходы к основному металлу [158, 174, 175]. Без дополнительных конструктивно-технологических мер не удается достичь существенного повышения сопротивления усталости и нахлесточных соединений с лобовыми швами. Механическая обработка таких соединений повышает пределы выносливости на 5—25 % (табл. 8.29). Только значительное увеличение толщины накладок и сечений лобовых швов нахлесточных соединений в сочетании с тщательной механической обработкой позволяет достичь наибольшего повышения сопротивления усталости (см. табл. 8.29, [173]).

Механическая обработка прикреплений вспомогательных элементов поперечными и продольными угловыми швами, прикреплений фасонок встык и соединений с фланговыми швами, передающими нагрузку, является наименее эффективной мерой (табл. 8.30). Пределы выносливости прикреплений и соединений такого типа повышаются не более чем на 30 %.

Требуемая циклическая долговечность нахлесточных соединений и прикреплений может быть достигнута [178—183] одновременным применением мер, включающих устройство компенсаторов и деконцентраторов напряжений, скосов, обеспечение полного провара и механической обработки зон изменения сечений несущих элементов. Однако такие меры очень трудоемки [13, 169].

Аргонодуговая и воздушно-плазменная обработки. Одним из эффективных технологических способов повышения сопротивления усталости сварных соединений, основанных на уменьшении концентрации напряжений без применения механической обработки, является аргонодуговая обработка швов [165, 185—187 и др.]. Способ состоит в создании плавного перехода от шва к основному металлу путем оплавления границ шва неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона без присадочной проволоки. В ряде случаев аргонодуговую обработку выполняют с присадочной проволокой [188]. С целью повышения производительности и процесса аргонодуговой обработки швов разработаны [189] устройства, позволяющие оплавлять швы одновременно с выполнением сварки механизированным способом.

Уменьшение концентрации напряжений аргонодуговой обработкой в стыковых соединениях углеродистых низколегированных сталей способствует повышению их пределов выносливости практически до уровня основного металла (табл. 8.31). В нахлесточных соединениях с обваркой по контуру аргонодуговая обработка, так же как и механическая зачистка швов, приводит к изменению места расположения очагов инициирования усталостных трещин. Таким местом становится корень углового шва. Вследствие этого предел выносливости соединения с накладками, обваренными по контуру, повышается всего на 11—20 % [193].

Таблица 8.27. Эффективность механической обработки стыковых соединений

Марка стали	R_σ	Повышение предела выносливости соединения после обработки, %	Отношение предела выносливости обработанного соединения и основного металла	Примечание	Литературный источник
М16С	0,14	20	0,84—0,94	Основной металл с прокатной поверхностью	[160]
	0,14	57	1,0	Шов с высотой валика 5 мм и резкими переходами	[69]
22К	—1,0	65	0,87	Электрошлаковая сварка	[161, 170]
	—1,0	40	0,57	Ручная сварка, усиление снято резцом	[170]
Ст3	—1,0	60	1,0	Соединение и основной металл обрабатывались шлифованием	[162]
	—1,0	69	0,88	Ручная сварка	[171]
BS15	0,0	40	0,86	Усиление снято механической обработкой с последующей шлифовкой	[172]
15ХСНД(НЛ-2)	0,06	102	1,0	Швы с резким переходом	[163]
	0,2	42	0,96	—	[164]
14ХМНДФР	—1,0	87	—	—	[165]
А7 и др.	0,0	22	0,90	Средние значения ряда испытаний	[158]
10Г2С1, термически упрочненная	0,0	100	1,0	—	[13, 184]

Таблица 8.28. Эффективность механической обработки тавровых соединений

Марка стали	R_σ	Повышение предела выносливости соединения после обработки, %	Примечание	Литературный источник
Углеродистая	Асимметричный цикл	93	Автоматическая сварка под флюсом со сквозным проваром	[174]
М16С	0,0	58—68	С разделкой кромок	[175]
UH	—1,0	62	—	[158] (данные Н. В. Фергуссона)
Ст3	—1,0	10	Ручная дуговая сварка впритык с К-образной разделкой	[176]

Таблица 8.29. Эффективность механической обработки нахлесточных соединений с поперечными угловыми швами

Марка стали	R_σ	Повышение предела выносливости соединения после обработки, %	Отношение пределов выносливости обработанного соединения и основного металла	Примечание	Литературный источник
Ст3	—1,0	22	—	Испытывались пересечения сварных балок	[166]
М16С	0,14	4	0,50	Отношение катетов лобового шва 1 : 2, обработка дисковой фрезой и наждачным кругом	[160]
	0,14	24	0,6	Отношение катетов лобового шва 1 : 2, обработка наждачным кругом	[167]
	0,14	28	0,62	Отношение катетов лобового шва 1 : 2, обработка фрезой	[173]
	0,14	65	0,80	Усиленные накладки с отношением катетов лобового шва 1 : 3, обработка фрезой, автоматическая сварка	[173]
	0,14	83	0,88	То же, ручная сварка	[173]
	0,14	102	1,0	Усиленные накладки с отношением катетов 1 : 3,8, тщательная обработка фрезой и наждачным кругом	[173]
10ХСНД	0,0	20—25	45	—	[162]

Таблица 8.30. Эффективность механической обработки нахлесточных соединений с фланговыми швами и различного рода прикреплений к несущим элементам конструкций

Марка стали	R_σ	Повышение предела выносливости соединения после обработки, %	Отношение пределов выносливости обработанного соединения и основного металла	Примечание	Литературный источник
St-52	4,9 МПа — σ_{max}	15	—	Прикрепление накладок продольными угловыми швами	[158]
Углеродистая	0,0	11	—	Прикрепление продольных ребер угловыми швами	[158]
St-37	0,0	5—11	—	С поперечным ребром, приваренным с одной стороны пластины	[170]
	0,0	16—19	—	С поперечными ребрами, приваренными с двух сторон пластины	[170]
	0,0	14	—	С продольными ребрами, приваренными с двух сторон пластины	[170]
	0,2	0—30	До 0,55	Прикрепление фасонок встык	[168]
M16C	0,14	8	0,38—0,42	Соединение с фланговыми швами, передающими нагрузку	[167]
Ст3	0,0	0	—	То же	[13, 159]

Таблица 8.31. Эффективность аргонодуговой обработки швов

Соединение	Марка стали	Сечение образцов, мм	R_σ	Предел выносливости при $N = 2 \cdot 10^6$, МПа		Повышение предела выносливости, %	Отношение пределов выносливости обработанного соединения и основного металла	Литературный источник
				в исходном состоянии	после обработки			
Стыковое	Ст3 ($\sigma_т$ = 340 МПа)	70×12	—1,0	80	120	50	—	[165]
	18Г2АФпс ($\sigma_т$ = 450	70×12	—1,0	115	158	35	—	[191]
	МПа) 14ХМНДФР ($\sigma_т$ = 674 МПа, $\sigma_в$ = 695 МПа)	70×12	—1,0	80	150	90	—	[165]
	Британская низкоуглеродистая	70×12,7	0,0	52	116	120	0,96	[188]
		70×12,7	0,0	64	181	280	0,86	[188]
	Японская повышенной прочности ($\sigma_т$ = = 534 МПа, $\sigma_в$ = = 618 МПа)	25×25	—	185	250	30	0,67	[192]
	StE 460 ($\sigma_т$ = 499	40×12	—1,0	107	178	66	0,83	[195]
	МПа, $\sigma_в$ = 654 МПа) (Германия)	4×12	0,0	178	268	51	0,79	[195]
	14Х2ГМР ($\sigma_т$ = = 746 МПа, $\sigma_в$ = = 913 МПа)	50×12	0,3	219	277	265	0,61	[195, 196]
	StE 690 ($\sigma_т$ = 766	40×12	—1,0	117	190	63	0,76	[195]
	МПа, $\sigma_в$ = 838 МПа)	40×12	0,0	172	302	77	0,76	[195]
Нахлесточное с удлиненными лобовыми швами	Британская низколегированная	—	0,0	86	101	30	—	[188]
Обварка накладки по контуру	10Г2Б ($\sigma_т$ = 312 МПа, $\sigma_в$ = 479 МПа)	70×12	—1,0	95	150	60	—	[165]
Прикрепление поперечных ребер	Ст3 ($\sigma_т$ = 341 МПа, $\sigma_в$ = 501 МПа)	70×12	—1,0	50	90	80	—	[165]
	StE 460 ($\sigma_т$ = 499	40×12	—1,0	78	183	135	0,76	[195]
	МПа, $\sigma_в$ = 654 МПа)	40×12	0,0	137	290	110	0,85	[195]
	STE 690 ($\sigma_т$ = 766	40×12	—1,0	80	172	115	0,69	[195]
	МПа, $\sigma_в$ = 838 МПа)	40×12	0,0	144	294	104	0,73	[195]
	МСт3	80×12	0,3	188	219	16	—	[194]
	14Х2ГМР ($\sigma_т$ = 588 МПа, $\sigma_в$ = 687 МПа)	80×20	0,3	114	249	118	0,55	[196, 197]
Прикрепление продольного ребра	МСт3	80×12	0,3	137	158	15	—	[194]

Продолжение табл. 8.31

Соединение	Марка стали	Сечение образцов, мм	R_σ	Предел выносливости при $N=2\cdot10^6$ МПа		Повышение предела выносливости, %	Отношение пределов выносливости обработанного соединения и основного металла	Литературный источник
				в исходном состоянии	после обработки			
Стыковое	StE 460 ($\sigma_т$ = 499 МПа, $\sigma_в$ = 654 МПа)	Балки двутаврового сечения высотой 160 мм	0,1	164	286	74	0,84	[195]
	StE 690 ($\sigma_т$ = 766 МПа, $\sigma_в$ = 838 МПа)	То же	0,1	166	274	65	0,68	[195]
Прикрепление поперечных ребер	StE 460 ($\sigma_т$ = 499 МПа, $\sigma_в$ = 654 МПа)	»	0,05	102	206	102	0,60	[195]
	StE 690 ($\sigma_т$ = 766 МПа, $\sigma_в$ = 838 МПа)	»	0,1	160	202	26	0,5	[195]
Обварка накладки по контуру	Ст3сп ($\sigma_т$ = 260 МПа)	Балки коробчатого сечения	0,25	112	134	20	—	[193]
Обварка по контуру двух рядом расположенных накладок	То же	То же	0,25	82	91	11	—	[193]

Таблица 8.32. **Сопоставление сопротивления усталости соединений после аргонодуговой обработки и механической зачистки швов**

Соединение	Химический состав, %	Предел выносливости образцов при $N = 2\cdot10^6$, МПа		Литературный источник
		после аргонодуговой обработки	после механической зачистки	
Стыковое	Низкоуглеродистая: 0,22 C, 0,11 Si, 1,57 Mn	116	121	[13, 188]
	Низколегированная: 0,11 C, 0,24 Si, 1,28 Mn, 0,27 Ni, 0,56 Cr, 0,30 Mo, 0,12 V	181	210	[13, 188]
	Высокопрочная марки 14Х2ГМР: 0,13 C, 0,12 Mn, 0,33 Ni, 1,39 Cr, 0,46 Mo ($\sigma_т$ = 746 МПа, $\sigma_в$ = = 913 МПа)	277	310	[197]
Нахлесточное с удлиненными лобовыми швами	Низколегированная: 0,14 C, 0,12 Si, 1,26 Mn, 0,21 Ni, 0,48 Cr, 0,25 Mo, 0,07 V	101	102	[13, 188]
Балка коробчатого сечения с накладкой, обваренной по контуру угловыми швами	Ст3сп	130	100	[198]
Тавровое с полным проваром	Высокопрочная марки НТ60: 0,16 C, 0,45 Si, 1,42 Mn, 0,018 P, 0,006 S, 0,06 Nb, 0,01 Ni, 0,02 Cr ($\sigma_т$ = 430 МПа, $\sigma_в$ = 670 МПа)	259	226	[190]

В сопоставлении с механической зачисткой швов аргонодуговая обработка дает практически такой же эффект, а в ряде случаев может и превосходить ее. Об этом свидетельствуют приведенные в табл. 8.32 значения пределов выносливости, установленные по результатам испытаний однотипных образцов, прошедших аргонодуговую обработку и механическую зачистку швов. Эти данные дают основание рекомендовать аргонодуговую обработку для использования в строительстве взамен механической обработки. Целесообразность применения аргонодуговой обработки подтверждается практическим опытом, накопленным предприятиями применительно к сварным рамам тележек электровозов, сварным узлам драг, несущим элементам скипов из высокопрочной стали и другим сварным конструкциям [185]. За рубежом аргонодуговая обработка применяется в строительных конструкциях. В частности, этот вид обработки швов использовался при сооружении из высокопрочной стали сварного моста Хонсю — Сикоку (Япония) [195].

Значения расчетных сопротивлений усталости сварных соединений, прошедших аргонодуговую обработку, могут приниматься для соответствующих типов соединений такими же, как и при механической обработке.

Таблица 8.33. Изменение сопротивления усталости соединений под воздействием высокого отпуска

Соединение	Марка стали	Сечение образцов, мм	R_σ	Изменение предела выносливости, %		Отношение пределов выносливости соединений после высокого отпуска и основного металла	Литературный источник
				повышение	понижение		
Стыковое, необработанное, выполненное электрошлаковой сваркой	22К	50×75	−1,0	30	—	0,69	[161]
Стыковое, механически обработанное	22К	50×75	−1,0	11	—	0,97	[161]
Стыковое со снятым усилением и последующим шлифованием	22К	200×200	−1,0	—	8	0,88	[199]
Стыковое, необработанное	Сталь 10	20×8	0,0	—	7	—	[200]
Продольный стыковой шов	Ст3	103×6	−1,0	25	—	—	[201]
	Ст3	32×12	−1,0	—	19	—	[201]
Нахлесточное (приварка втулок)	Сталь 10	Диаметр 18	−1,0	32	—	0,75	[202]
Нахлесточное с лобовыми швами	Сталь 10	20×8	0,0	0	—	—	[200]
Нахлесточное с фланговыми швами	Сталь 10	20×8	0,0	0	—	—	[200]
Крестовое с резким концентратором напряжений	Ст3	150×8	−1,0	—	25	—	[203]
	Ст3	150×8	0,14	—	14	—	[203]
	Ст3	150×8	0,20	—	24	—	[203]
Прикрепление конструктивного элемента фланговыми швами	Ст3	Диаметр 95	−1,0	192	—	0,55	[204]
То же	45	Диаметр 95	−1,0	260	—	0,52	[204]
Прикрепление к пластине продольного ребра	СХЛ	40×10	−1,0	91	—	0,54	[201]
Присоединение к пластине двухстороннего ребра с механически обработанными концами швов по радиусу $R = 15$ мм	Ст3	80×6	−1,0	21	—	—	[201]
Прикрепление к пластине продольного ребра фланговыми швами	Ст3	160×20	0,0	61	—	—	[201]
Стыковое, необработанное, пересекаемое продольными наплавками	14Г2	80×14	−1,0	65	—	—	[13]
	14Г2	80×14	0,0	0	—	—	[13]
	14Г2	80×14	0,3	—	5		[13]
Стыковое, необработанное	10Г2С1	200×26	−1,0	40	—	—	[13]
Стыковое, необработанное, пересекаемое продольными наплавками	М16С	200×30	−1,0	100	—	—	[13]
Нахлесточное с фланговыми швами	Ст3	Два швеллера № 10 и концевые планки сечением 160×20	0,0	0	0	—	[13]
Нахлесточное с фланговыми швами, передающими нагрузку, и резким концентратором напряжений в виде незаваренной щели	Ст3	160×20	0,0	—	37	—	[13]
Прикрепление планок фланговыми швами	Ст3	160×20	0,0	43	—	—	[13]
Прикрепление планок с незаваренной щелью (резким концентратором напряжений) фланговыми швами	Ст3	160×20	0,0	100	—	—	[13]

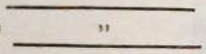
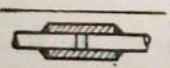
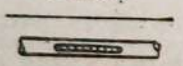
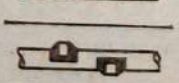
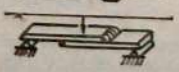
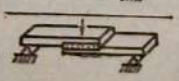
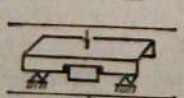
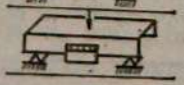
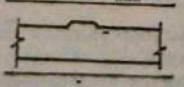
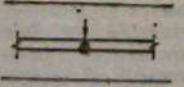
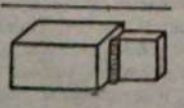
С целью повышения сопротивления усталости сварных соединений разработаны также технологии дополнительной наплавки кромок шва мягкой ионной плазмой обратной полярности [190] и воздушно-плазменной обработки [223]. В результате плазменной наплавки повышение предела выносливости тавровых соединений с полным проваром составляет 77 % [190]. Воздушно-плазменная обработка переходных зон поперечных угловых швов нахлесточного соединения способствует увеличению его циклической долговечности в два раза и повышению предела выносливости на 25 % [223] по сравнению с исходным состоянием, что соизмеримо с эффективностью [193—195] аргонодуговой обработки швов однотипных соединений.

Высокий отпуск (термообработка). Целесообразность и области рационального применения этого вида обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений определяются главным образом условиями проявления влияния растягивающих остаточных напряжений. Последние усиливают отрицательное влияние на сопротивление усталости соединений с понижением уровня действующих напряжений, уменьшением R_σ и снижением концентрации напряжений [13, 23]. При симметричном цикле нагружения влияние растяги-

Таблица 8.34. Эффективность предварительной статической перегрузки сварных соединений

Соединение	Сечение образцов, мм	R_σ	Перегрузка	Повышение предела выносливости, %	Литературный источник
Прикрепление продольного ребра к пластине	70×6	—1,0	$0{,}9\sigma_т$	135	[201]
	70×10	0,0	$0{,}5\sigma_т$	10	[201]
	70×10	0,0	$0{,}7\sigma_т$	36	[201]
	70×8	0,0	$0{,}9\sigma_т$	65	[201]
Прикрепление продольного ребра	—	—1,0	154 МПа	25	[157, 205]
	—	0,0	154 МПа	8	[157, 205]
	—	—1,0	232 МПа	58	[157, 205]
	—	0,0	232 МПа	25	[157, 205]
Стыковое, пересекаемое продольными наплавками	70×12	—1,0	160 МПа	20	[13]
	70×12	—1,0	220 МПа	38	[13]
	200×30	—1,0	170 МПа	55	[13]
Нахлесточное с фланговыми швами	Два швеллера № 10 и концевые планки сечением 160×20	0,0	170 МПа	20	[13]

Таблица 8.35. Эффективность поверхностного наклепа сварных соединений [13] (по данным ЦНИИТМАШ)

Соединение	Марка стали	Рабочая часть образца	Способ обработки соединения	R_σ	Предел выносливости, МПа		Повышение предела выносливости, %	Отношение пределов выносливости обработанного соединения и основного металла
					в исходном состоянии	после обработки		
Нахлесточное (приварка втулок)	Сталь 10		Дробеструйный наклеп	—1,0	132	185	40	1,04
	Сталь 40		Наклеп пневматическим молотком	—1,0	107	277	100	0,96
	Сталь 40		То же	—1,0	177	227	90	0,94
Продольная наплавка	Сталь 40		»	—1,0	152	237	55	1,08
Нахлесточное (приварка полуколец)	Сталь 40		»	—1,0	60	213	255	0,97
Нахлесточное с лобовыми швами	Сталь 10		»	20 МПа — σ_{max}	105	189	60	—
Нахлесточное с фланговыми швами	Сталь 10		»	То же	105	132	25	—
Приварка планок лобовыми швами	Ст3		»	86 МПа — σ_{max}	168	224	35	1,0
Приварка планок фланговыми швами	Ст3		»	То же	До 80	140	75	0,62
Стыковое (электрошлаковая сварка)	22К		Чеканка	—1,0	85	176	105	1,09
Стыковое	Сталь 10		Наклеп пневматическим молотком	20 МПа — σ_{max}	182	266	45	0,70
Прикрепление встык	Ст3		Наклеп многобойковым пневмоустройством	—1,0	105	185	80	—

вающих остаточных напряжений, а следовательно, и благоприятного воздействия высокого отпуска проявляется наиболее сильно (табл. 8.33). При отнулевом цикле остаточные напряжения снижаются под действием рабочих напряжений. В этих условиях высокий отпуск практически не изменяет сопротивление усталости соединений. И, наконец, при высоких значениях R_σ термообработка в результате разупрочнения металла околошовной зоны может привести даже к некоторому понижению сопротивления усталости соединения. Исходя из этого определяются границы целесообразного применения высокого отпуска.

По мере увеличения концентрации напряжений (нахлесточные соединения с фланговыми швами, непосредственно передающими нагрузку) разность между пределами выносливости термообработанных и нетермообработанных образцов уменьшается. В то же время прикрепления конструктивных элементов увеличивают сопротивление усталости после высокого отпуска не только в области знакопеременных напряжений, но и при однозначных переменных нагрузках.

Предварительная перегрузка конструкций. В ряде случаев перегрузка может оказаться более простой и эффективной мерой снятия растягивающих, а зачастую и способом создания сжимающих остаточных напряжений в зонах концентраторов, чем высокий отпуск. При этом положительный эффект от предварительной перегрузки наблюдается у соединений как с малой, так и с повышенной концентрацией напряжений (табл. 8.34). Это дает основание рекомендовать перегрузку конструкций для повышения сопротивления усталости соединений, особенно в тех случаях, когда ее можно осуществить без особых трудностей (резервуары, эксплуатирующиеся при переменном давлении, подкрановые балки и др.). Эффективность способа зависит от значения перегрузочных напряжений, вида соединения и асимметрии цикла.

Кратковременные начальные напряжения в конструкции, близкие к пределу текучести материала, могут быть получены при переходе от статического нагружения к вибрационному или при их сочетании [235—239]. Такой способ снятия остаточных напряжений в ряде случаев является достаточно эффективным средством повышения сопротивления усталости сварных соединений [235]. Однако при использовании вибрационного нагружения элементов конструкций необходимо учитывать и возможное снижение циклической долговечности сварных соединений вследствие накопления усталостных

Таблица 8.36. **Эффективность поверхностного наклепа сварных соединений балок [170]**

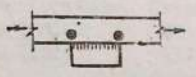
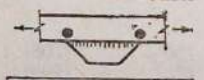
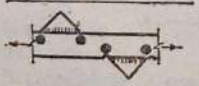
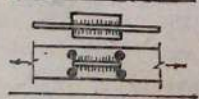
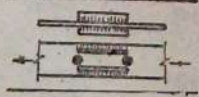
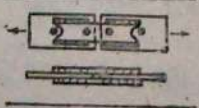
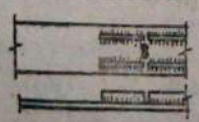
Тип балки	Обработка после сварки	R_σ	Предел выносливости при изгибе на базе $2 \cdot 10^6$ циклов		Литературный источник
			МПа	%	
Двутаврового сечения с двухсторонними сплошными швами, выполненными электродами УОНИ 13/45	Исходное состояние	0,25	120	100	[210]
	Бойком с помощью пневмомолотка	0,25	220	183	[210]
Двутаврового сечения с двухсторонними прерывистыми швами, выполненными электродами ЦМ-7 в шахматном порядке	Исходное состояние	—1,0	115	100	[208]
	Многобойковым упрочнителем в зонах концов швов	—1,0	135	117	[208]
Двутаврового сечения с двухсторонними точечными швами, выполненными в CO_2 в шахматном порядке	Исходное состояние	—1,0	105	100	[208]
	Многобойковым упрочнителем	—1,0	115	110	[208]
	Бойком с помощью пневмомолотка	—1,0	135—155	128—147	[208]
Коробчатого сечения, сваренные электрозаклепками в среде CO_2	Исходное состояние	—1,0	55	110	[207]
	Многобойковым упрочнителем	—1,0	95—105	173—191	[207]
Ступенчатые двутаврового сечения с двухсторонними швами, выполненными электродами ЦМ-7	Исходное состояние	—1,0	85	100	[209]
	Многобойковым упрочнителем	—1,0	95—115	112—135	[209]
	Бойком с помощью пневмомолотка	—1,0	105	125	[209]
Ступенчатые двутаврового сечения с двухсторонними швами, сваренными в CO_2	Исходное состояние	—1,0	75	100	[209]
	Многобойковым упрочнителем	—1,0	105	140	[209]
То же, с односторонними швами, сваренными в среде CO_2	Исходное состояние	—1,0	75	100	[206]
	Многобойковым упрочнителем	—1,0	95	127	[206]
То же, с дефектами сварки	» »	—1,0	<50	67	[206]
Ступенчатые коробчатого сечения с односторонними швами, выполненными электродами ЦМ-7	Исходное состояние	—1,0	75	100	[206]
То же, с дефектами сварки	Многобойковым упрочнителем	—1,0	<60	80	[206]
Коробчатого сечения с накладкой толщиной 20 мм, приваренной к растянутому поясу	Исходное состояние	0,25	112	100	[193]
	Многобойковым упрочнителем	0,25	133	119	[193]
Коробчатого сечения с накладкой толщиной 80 мм	Исходное состояние	0,25	123	100	[193]
	Многобойковым упрочнителем	0,25	135	111	[193]

Продолжение табл. 8.36

Тип балки	Обработка после сварки	R_σ	Предел выносливости при изгибе на базе $2 \cdot 10^6$ циклов		Литературный источник
			МПа	%	
Коробчатого сечения с двумя накладками разной толщины, приваренными к растянутому поясу	Исходное состояние	0,25	82	100	[193]
	Многобойковым упрочнителем	0,25	120	146	[193]
Коробчатого сечения с накладкой толщиной 20 мм, приваренной к растянутому поясу	Исходное состояние	0,25	125	100	[193]
	Многобойковым упрочнителем	0,25	172	138	[193]
Двутавровая с ребрами жесткости, приваренными прерывистыми швами	Исходное состояние	0	101	100	[211]
	Дробью	0	132	130	[211]

повреждений в процессе обработки. Эффективность этого способа предварительного нагружения как меры повышения сопротивления усталости сварных соединений во многом зависит от уровня перегрузочных напряжений и длительности обработки.

Таблица 8.37. **Эффективность использования точечного нагрева для повышения сопротивления усталости сварных соединений** [13]

Образец	Предел выносливости, МПа		Повышение предела выносливости, %
	без нагрева	после нагрева	
	60±40 65±45 39±39	120±100 110±90 86±86	150 100 120
	75±55	110±90	65
	80±60	140±120	100
	32±32	95±95	200
	50±50	73±73	45
	32±32	83±83	160
	37±37	83±83	125
	18±18	32±32	80
	±54	±89	65

Поверхностный наклеп. Весьма эффективной мерой увеличения долговечности изделий, испытывающих переменное нагружение, является поверхностный наклеп (табл. 8.35, 8.36), получивший благодаря работам ЦНИИТМАШ [170, 200, 202, 204, 206—209 и др.] широкое распространение в машиностроении. Поверхностное пластическое деформирование необработанных швов и прилегающих зон в ряде случаев приводит к повышению сопротивления усталости соединений до уровня основного металла. Наиболее приемлемым для соединений с не обрабатываемой после сварки поверхностью швов является наклеп многобойковым упрочнителем [170]. С помощью этого чеканящего пневматического инструмента можно за 1 ч упрочнить до 5—6 м сварного шва. Обработку следует выполнять без пропусков до появления металлического блеска всей обрабатываемой поверхности сварного шва и околошовной зоны.

Точечный и местный нагрев. В результате наведения в зонах концентраторов остаточных напряжений сжатия точечным нагревом, так же, как и при поверхностном наклепе, наибольшее увеличение сопротивления усталости наблюдается у соединений с повышенной концентрацией напряжений, и особенно в тех случаях, когда концентратор напряжений расположен на кромке несущего элемента конструкции (табл. 8.37). Это связано с тем, что сжимающие остаточные напряжения, обусловленные нагревом, существенно зависят от расположения точки нагрева по отношению к кромке пластины [216]. При нагреве значительных полос металла в районе концен тратора, согласно опытам [217, 218], наблюдается большая стабилизация остаточных напряжений и, как следствие, некоторое дальнейшее повышение долговечности соединений. Необходимо отметить, что эффективность данного метода в значительной мере зависит от соблюдения оптимальных параметров нагрева.

Местное пластическое деформирование. В отличие от поверхностного наклепа точечное обжатие вызывает пластическую деформацию металла по всей толщине образца или элемента конструкции [157]. Создание таким способом остаточных напряжений сжатия у окончания швов способствует существенному повышению пределов выносливости соединений с фланговыми швами, а также различного рода конструктивного характера (табл. 8.38).

Способ пластического деформирования может быть применен и к соединениям, имеющим концентраторы напряжений большой протяженности (стыковым соединениям, прикреплениям поперечных элементов угловыми швами). Такая обработка сходна со способом упрочнения металла с помощью поверхностного наклепа и отличается от него тем, что вблизи соединения обработке подвергается узкая полоса металла, а не все соединение. Долговечность соединений и прикреплений в результате линейного обжатия увеличивается в пять — десять раз, существенно повышаются пределы выносливости.

Взрывная обработка. При необходимости выполнения больших объемов работ и в случае упрочнения труднодоступных участков швов целесообразно использовать локальную взрывную обработку соединений. Сущность способа заключается в том, что ударная волна сжатия, возникающая вслед-

Таблица 8.38. Эффективность местного пластического деформирования сварных соединений

Соединение	Марка стали	Сечение образцов, мм	Вид обработки	R_σ	Предел выносливости, МПа		Повышение предела выносливости, %	Литературный источник
					в исходном состоянии	после обработки		
Прикрепление продольного ребра к пластине	—	102×19	Точечное обжатие	0,0	90	170	90	[157]
Нахлесточное с фланговыми швами, передающими нагрузку	Ст3	Два швеллера № 10 и концевые планки сечением 160×20	То же	0,0	80	135	70	[13]
Прикрепление планок продольными угловыми швами	М16С	200×30	» »	—1,0	20	40	100	[13]
	М16С	200×30	» »	0,6	120	140	15	[13]
Стыковое	10Г2С1 горячекатаная	200×26	Линейное обжатие	—1,0	70	100	45	[13]
	10Г2С1 термоупрочненная	200×26	То же	—1,0	65	95	45	[13]
	То же	200×26	» »	0,0	140	180	30	[13]
Прикрепление поперечных ребер угловыми швами	10Г2С1 горячекатаная	200×26	» »	—1,0	40	80	100	[13]

Таблица 8.39. Эффективность взрывной обработки сварных соединений

Соединение	Марка стали	R_σ	Предел выносливости, МПа		Повышение предела выносливости, %	Литературный источник
			в исходном состоянии	после обработки		
С поперечными угловыми швами	Ст3	—1,0	40	75	88	[13, 220, 221]
	10Г2С1	—1,0	40	70	75	[13, 220, 221]
	Ст3	0,0	98	140	43	[13, 220, 221]
	14ХМНДФР	+0,3	12	16	33	[13, 221]
	Высокопрочная	0,0	100	140	40	Данные ИЭС им. Е. О. Патона
	»	0,0	80	120	50	То же
	Высокопрочная	0,0	120	170	43	[219]
	мартенситностареющая	0,0	180	250	39	[219]
С продольными угловыми швами	М16	—1,0	22	48	120	[13, 221]
	М16	0,0	42	90	124	[13, 221]
Стыковое	Ст3	—1,0	70	82	12	Данные ИЭС им. Е. О. Патона
Стыковое, пересекаемое продольными наплавками	14Г2	—1,0	100	140	40	224]
	14Х2ГМР	—1,0	75	105	40	[224]

ствие детонации удлиненных зарядов взрывчатого вещества, располагаемых над зонами сплавления швов с основным металлом, вызывает локальные пластические деформации, которые, в свою очередь, способствуют образованию в поверхностном слое наклепа и полезных сжимающих остаточных напряжений. После взрывной обработки сопротивление усталости сварных соединений и прикреплений существенно повышается (табл. 8.39). Высокая эффективность взрывной обработки достигается при параметрах, рекомендуемых в работах [13, 220, 221, 224]. Увеличение интенсивности взрывной обработки до давления ударной волны, превышающей 13 000 МПа (130 кбар), может приводить, по данным работы [219], существенному снижению сопротивления усталости сварных соединений.

Ультразвуковая ударная обработка. Положительный эффект от ультразвуковой ударной обработки сварных соединений (табл. 8.40) достигается за счет снижения растягивающих и образования в поверхностном слое полезных остаточных напряжений сжатия, снижения концентрации напряжений и проявления эффекта деформационного упрочнения [213, 234]. Для обработки соединений используется переносный инструмент [212—215, 225, 233, 234], включающий малогабаритный преобразователь со сменными рабочими головками в виде набора стальных игл диаметром 1,6—1,9 мм. Пи-

Таблица 8.40. Эффективность ультразвуковой ударной обработки сварных соединений

Соединение	Марка стали	R_σ	Предел выносливости, МПа		Повышение предела выносливости, %	Литературный источник
			в исходном состоянии	после обработки		
Стыковое, пересекаемое продольными наплавками	Низкоуглеродистая	0,0	140	220	57	[213]
	Высокопрочная	—1,0	80	140	75	[213]
	То же	—1,0	70	130	85	[213]
	» »	0,0	110	140	27	[213]
	» »	0,6	340	440	30	[213]
С поперечными угловыми швами	» »	0,0	100	230	130	[225]
	» »	—1,0	40	120	300	[225]
	» »	+0,6	200	260	30	[225]

тающая мощность инструмента составляет 1,2 кВт, напряжение — 36—50 В, частота — 27,5 кГц. Питание высокочастотного преобразователя осуществляется от ультразвукового генератора с выходной мощностью не менее 2 кВт. Ультразвуковой ударной обработке инструментом с многоэлементным рабочим органом подвергается поверхность зоны перехода шва к основному металлу. Скорость перемещения инструмента вдоль оси шва около 0,5 м/мин.

Приведенные в таблице результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о высокой эффективности ультразвуковой ударной обработки по сравнению с другими способами повышения сопротивления усталости.

Рациональные области использования способов повышения сопротивления усталости сварных соединений. Большинство из рассмотренных способов повышения сопротивления усталости имеет ограниченную область применения. Такие меры, как механическая обработка, высокий отпуск, местный нагрев, повышают выносливость соединений только определенного вида или же при определенных условиях нагружения. Лучшие показатели в этом отношении имеют предварительная статическая перегрузка конструкций, поверхностный наклеп, точечное и линейное пластическое обжатие, а также взрывная и ультразвуковая ударная обработки. Приведенные сведения об эффективности этих способов обработки могут служить основой при рассмотрении вопроса о применении их на практике. Необходимо, однако, принимать во внимание возможное снижение сопротивления сварных конструкций хрупким разрушениям, обусловленное применением отдельных видов обработки, направленных на повышение сопротивления усталости. Такие меры, как местный нагрев, предварительная перегрузка конструкций, точечное и линейное пластическое обжатие металла околошовной зоны, могут заметно снизить сопротивление соединений хрупким разрушениям [240]. Это существенно ограничивает область их применения в строительных конструкциях. Сравнительная оценка эффективности различных способов повышения сопротивления усталости [13], выполненная с учетом предъявляемых к ним требований, позволяет наряду с механической зачисткой швов рекомендовать к практическому использованию в строительных конструкциях также аргонодуговую обработку, поверхностный наклеп многобойковым устройством, взрывную и ультразвуковую ударную.

ГЛАВА 9

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

9.1. ОСНОВЫ РАСЧЕТА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

9.1.1. Основные положения

Сварные металлические конструкции проектируют в соответствии с нормативными документами. Действие норм проектирования распространяется на все конструкции зданий и сооружений, а также на их отдельные элементы, сечения и узлы.

Проектируемые объекты должны удовлетворять предъявляемым к ним требованиям, которые можно объединить в четыре основные группы [2, 3]: эксплуатационные, состоящие в безусловном соответствии конструкций своему функциональному назначению и определяющие конструктивную форму сооружения, призванную обеспечить условия его нормальной эксплуатации; технологические, состоящие в обеспечении возможности и удобства изготовления, транспортировки и монтажа конструкций с минимальными затратами труда, с максимальной производительностью технологического оборудования и в наиболее короткие сроки; экономические, состоящие в рациональном использовании стали и сварочных материалов, применении экономичных профилей проката и эффективных марок сталей, что способствует снижению стоимости конструктивной формы и строительства в целом; требования, состоящие в обеспечении надежной и долговечной работы конструкций, связанные с выполнением условий прочности, устойчивости, жесткости и выносливости, установленных на основе максимального приближения расчетных предпосылок к действительным особенностям работы сооружения, а также с повышением стойкости стальных конструкций против внешних агрессивных воздействий.

При проектировании следует отдавать предпочтение унифицированным типовым и стандартным конструкциям, пространственным системам, конструкциям, совмещающим несущие и ограждающие функции, позволяющим применять приемы искусственного регулирования усилий, создавать конструкции с растянутыми нитями и поверхностями [2]. Для стальных конструкций следует применять эффективные марки сталей, экономичные профили проката с минимальными площадями сечений. Их соединения в заводских условиях должны быть ориентированы на применение автоматической и полуавтоматической сварки, а на монтаже — высокопрочных болтов, хотя при соответствующем обосновании допускаются и сварные монтажные соединения.

Принимаемые расчетные схемы и теоретические предпосылки расчета должны максимально соответствовать действительным условиям работы конструкции. Выбор расчетных схем зависит от применяемого метода расчета, требуемой его точности и трудоемкости вычислительных работ. Учитывая ориентацию процесса проектирования на применение ЭВМ, следует рассчитывать конструкцию как единую пространственную систему, а при соответствующем обосновании — и по деформированной схеме, учитывающей влияние перемещений узлов конструкций под нагрузкой. Упрощение расчетных схем, рассмотрение плоских систем взамен пространственных, неучет нелинейных факторов работы конструкций допускаются (при соответствующем обосновании) без ухудшения экономичности проектного решения.

При расчете стальных конструкций физические свойства моделируются уравнениями линейной изотропной теории упругости и деформационной теории пластичности. Развитие пластических деформаций стали допускается при расчете изгибаемых, внецентренно-сжатых и сжато-изогнутых элементов. В остальных случаях работа стали ограничивается упругой областью.

Расчет состоит в определении характеристик напряженно-деформированного состояния, возникающих под воздействием внешних нагрузок в конструкции в целом, ее отдельных элементах и сечениях. В некоторых случаях учитывают дополнительные напряжения, являющиеся следствием неизбежного несоответствия идеализированной расчетной схемы действительной. В то же время начальные (от прокатки, неравномерного нагрева при сварке, а также в результате предшествующей работы конструкции) напряжения во внимание не принимаются, так как они внутренне уравновешены.

9.1.2. Метод расчета стальных конструкций

Сварные строительные конструкции рассчитывают по предельным состояниям. Суть этого метода заключается в том, что с учетом назначения и ответственности сооружения на основании вероятностных оценок установлены основные показатели его работы, до достижения которых ненаступление предельных состояний гарантировано с обусловленной обеспеченностью в течение всего срока службы объекта, включая и период его возведения. Предельным считается состояние, при котором конструкция (здание или сооружение) перестает удовлетворять предъявляемым требованиям и становится непригодной к дальнейшей эксплуатации.

Установлены две группы расчетных предельных состояний. Первая включает состояния, приводящие к потере несущей способности и (или) к полной непригодности к эксплуатации конструкции в результате общей потери устойчивости формы, потери устойчивости положения, вязкого, хрупкого, усталостного или иного разрушения при совместном действии силовых факторов и неблагоприятном влиянии внешней среды, перехода неизменяемой системы в изменяемую, качественного изменения конфигурации, прекращения эксплуатации вследствие появления недопустимых перемещений из-за текучести стали, сдвигов в соединениях и пр. Ко второй группе относятся предельные состояния, затрудняющие нормальную эксплуатацию конструкций вследствие появления недопустимых перемещений в результате прогиба, горизонтальных смещений, осадок, поворота, колебаний и пр.

Достижение того или иного предельного состояния определяют при расчете конструкций, учитывая возможные неблагоприятные отклонения характеристик применяемых в проекте сталей, значений и сочетаний действующих нагрузок, а также особенности условий производства работ и эксплуатации.

Основными характеристиками сталей являются нормативные сопротивления, устанавливаемые исходя из механических свойств материала с учетом их изменчивости по пределу текучести (R_{yn}) или по временному сопротивлению разрыву (R_{un}). В нормах приведены значения R_{yn} и R_{un}, соответствующие браковочным характеристикам, установленным стандартами на стали различных марок с обеспеченностью 0,95. Возможные отклонения значений нормативных сопротивлений в неблагоприятную сторону учитывают коэффициентом надежности по материалу γ_m, зависящим от стали, статистической изменчивости ее механических свойств, а также принимая во внимание факторы, которые не могут быть определены статистически (характер разрушения стали, допуски на толщины прокатных изделий, практический опыт и т. п.). Нормативные сопротивления, деленные на коэффициенты γ_m, называются расчетными сопротивлениями:

$$R_y = R_{yn}/\gamma_m; \quad R_u = R_{un}/\gamma_m. \tag{9.1}$$

Вероятные нагрузки, действующие на строительные конструкции, определены нормами для предусматриваемых (нормативных) условий эксплуатации. Такие нагрузки называют нормативными.

Поскольку нагрузки — случайные величины, то в течение срока службы сооружения из-за их изменчивости или отступлений от условий нормальной эксплуатации возможны отклонения нагрузок от нормативных значений. Эти отклонения учитывают при расчете коэффициентами надежности по нагрузке γ_f, определяемыми на основе изучения статистической изменчивости нагрузок, назначения здания или сооружения, условий и опыта эксплуатации и экономических обоснований. Значения нормативных нагрузок, умноженные на коэффициенты γ_f, называются расчетными нагрузками.

Как правило, строительные конструкции воспринимают несколько нагрузок, различных по происхождению, характеру и длительности действия. Расчет в этом случае производят на неблагоприятное сочетание нагрузок, найденное с учетом коэффициентов сочетаний ψ, значения которых отражают уменьшение вероятности одновременного превышения несколькими нагрузками их расчетных значений по сравнению с вероятностью превышения расчетного значения одной из нагрузок.

Учет возможных отклонений от предусмотренных условий работы конструкции, имеющих систематический характер и не нашедших отражение в расчетах, осуществляется введением коэффициентов условий работы γ_c. Эти коэффициенты учитывают влияние конструктивной формы сооружений различного назначения и условность их расчетных схем, характера и длительности внешнего воздействия, его многократной повторяемости, температурно-влажностного режима эксплуатации, особенностей технологии изготовления конструкций и других факторов. Значения коэффициентов γ_c установлены нормами на основе теоретических и экспериментальных исследований действительной работы конструкций в условиях эксплуатации и производства работ.

Степень ответственности и капитальности зданий и сооружений, а также значимость последствий наступления тех или иных предельных состояний учитывают коэффициентами надежности по назначению γ_n, определяемыми на основе вероятностно-экономических обоснований.

Таким образом, расчет по первой группе предельных состояний сводится к тому, чтобы несущая способность конструкций или их элементов, найденная с учетом возможного отклонения прочностных характеристик стали в меньшую сторону и с учетом отклонений от идеальных (принятых в расчете) условий работы при заданной степени ответственности сооружения, всегда превышала наибольшие усилия, которые могут в них возникнуть от внешних воздействий. Это условие записывается в виде предельного неравенства

$$S \leqslant C, \quad S = \psi\gamma_f F_{nl}\alpha_i = \psi F_i \alpha_i;$$

$$C = \Phi \frac{R_{yn}(R_{un})}{\gamma_m} \frac{\gamma_c}{\gamma_n} = \Phi R_y (R_u) \frac{\gamma_c}{\gamma_n}. \tag{9.2}$$

Усилие S (изгибающий момент, продольная сила) выбирается при наиболее неблагоприятном сочетании нагрузок. Чтобы это усилие оказалось предельным, нагрузки F_{nl} принимают с коэффициентами надежности по нагрузке, т. е. расчетными (α_i — усилие от $F_{nl} = 1$).

Несущая способность C определяется геометрическими характеристиками сечения Ф (площадь сечения A при сжатии, растяжении или срезе, момент сопротивления W при изгибе), умноженными на показатели прочности материала с учетом их возможных отклонений от нормативных значений.

Условие для расчета по второй группе предельных состояний отражает требование непревышения деформацией (перемещением) δ, которая возникает в конструкции от действующих нагрузок, предельной величины $[\delta]$, установленной нормами:

$$\delta \leqslant [\delta]. \tag{9.3}$$

Поскольку вторая группа предельных состояний обеспечивает условия нормальной эксплуатации и не связана с несущей способностью конструкций, деформации (перемещения) δ определяют по нормативным нагрузкам. При этом геометрические характеристики сечений элементов конструкции определяют без учета наличия возможных ослаблений.

9.1.3. Нагрузки и воздействия

В соответствии с классификацией СНиП 2.01.07—85 «Нагрузки и воздействия» [5] нагрузки, действующие при эксплуатации зданий и сооружений, делятся в зависимости от длительности их приложения на постоянные и временные (длительные, кратковременные и особые). Каждый вид нагрузки характеризуется, как правило, одним нормативным значением, однако для нагрузок от людей, животных, оборудования на перекрытиях жилых, общественных и сельскохозяйственных зданий, от мостовых и подвесных кранов, снеговых и температурных климатических воздействий установлены два нормативных значения: полное и пониженное. Пониженное значение нормативных нагрузок используется при учете влияния длительности их действия, а также при проверке на выносливость и в других случаях, оговоренных нормами.

Постоянные нагрузки — от собственного веса несущих и ограждающих конструкций и частей сооружений, веса и давления грунтов, а также от предварительного напряжения — определяют исходя из проектных геометрических размеров конструкций и плотности материалов и грунтов. Коэффициенты надежности по нагрузке γ_f для постоянных нагрузок приведены в табл. 9.1.

К длительным нагрузкам относятся: вес стационарного оборудования; вес слоя воды на водонаполненных плоских покрытиях и отложений производственной пыли на конструкциях; давление газов, жидкостей и сыпучих тел в емкостях и трубопроводах; нагрузки от складируемых материалов и стеллажного оборудования на перекрытиях складов, книгохранилищ, архивов и других подобных помещений; воздействия, обусловленные деформациями основания, изменением влажности, ползучестью и усадкой материалов, температурой от стационарного оборудования. С пониженными нормативными значениями учитывают длительные нагрузки от людей, животных и оборудования на перекрытиях жилых, общественных и сельскохозяйственных зданий, от мостовых и подвесных кранов, от снеговых и температурных климатических воздействий.

Кратковременными являются: нагрузки от оборудования, возникающие в пусконаладочном, переходном или испытательном режимах его работы и при его ремонте или замене; вес людей и ремонтных материалов в зонах обслуживания и ремонта оборудования; ветровые и гололедные нагрузки; нагрузки с полными нормативными значениями, учитываемые при длительном их воздействии с коэффициентами понижения, а также нагрузки, возникающие при изготовлении, хранении, транспортировке и монтаже конструкций.

Технологические нагрузки (от оборудования, материалов, людей и пр.) устанавливают по ожидаемым наибольшим значениям для предусмотренных условий эксплуатации на

Таблица 9.1. Значения коэффициента надежности по нагрузке для постоянных нагрузок

Конструкция, грунты	γ_f
Конструкции:	
металлические	1,05
то же, усилия от собственного веса превышают 50 % общих усилий	1,1
бетонные со средней плотностью свыше 1600 кг/м³, железобетонные, каменные, армокаменные, деревянные	1,1
бетонные со средней плотностью до 1600 кг/м³	1,2
Изоляционные, выравнивающие и отделочные слои, выполняемые:	
в заводских условиях	1,2
на строительной площадке	1,3
Грунты:	
в природном залегании	1,1
насыпные	1,15
Конструкции и грунты, уменьшение веса которых ухудшает условия работы под нагрузкой	0,9

Таблица 9.2. Значения коэффициента надежности по нагрузке

Нагрузка	γ_f
Вес:	
стационарного оборудования	1,05
изоляции стационарного оборудования	1,2
заполнителей оборудования (в том числе резервуаров и трубопроводов):	
жидких	1,0
суспензий, шламов, сыпучих тел	1,1
погрузчиков, электрокаров (с грузом)	1,2
Равномерно распределенные нагрузки при полном нормативном значении	
менее 2 кПа	1,3
2 кПа и более	1,2
Сосредоточенные нагрузки на перекрытия, покрытия, лестницы, балконы и перила	1,2
Крановые нагрузки	1,1
Снеговые нагрузки при отношении нормативного значения равномерно распределенной нагрузки от веса покрытия, включая вес стационарного оборудования, к нормативному значению веса снегового покрова:	
менее 0,8	1,6
0,8 и более	1,4
Ветровые нагрузки	1,4
Гололедные нагрузки (за исключением случаев, оговоренных в специальных нормативных документах)	1,3
Температурные климатические воздействия	1,1

основании стандартов и каталогов, а для нестандартного оборудования — по данным заводов-изготовителей или рабочих чертежей. Коэффициенты надежности по нагрузке для временных, в том числе и технологических, нагрузок приведены в табл. 9.2.

Атмосферные нагрузки (от ветра, снега, гололеда) и температурно-влажностные воздействия определяют по средним годовым значениям в зависимости от географического района строительства или по значениям, соответствующим среднему периоду их превышения.

Сейсмические и взрывные воздействия, аварийные нагрузки, связанные с резкими нарушениями технологического процесса, временными неисправностями и поломками оборудования, деформациями основания, сопровождающимися коренным изменением структуры грунта или оседанием его, относятся к особым нагрузкам. Их значения устанавливаются в соответствии с требованиями соответствующих норм вероятностно-экономическими методами.

Таблица 9.3. Коэффициенты сочетаний ψ

Сочетания	Нагрузка: постоянная	длительная	кратковременная	особая
Основные				
постоянная + одна длительная	1,0	1,0	—	—
постоянная + одна кратковременная	1,0	—	1,0	—
постоянная + длительные + кратковременные	1,0	0,95	0,9 *	—
Особые	1,0	0,95	0,8 **	1,0

* При учете трех или более кратковременных нагрузок допускается принимать коэффициенты сочетаний 1,0 — для первой по степени важности нагрузки; 0,8 — для второй; 0,6 — для остальных.

** В особых сочетаниях нагрузок, включающих взрывные воздействия или нагрузки, вызываемые столкновением транспортных средств с частями сооружения, допускается принимать для кратковременных нагрузок $\psi = 0$.

На основании анализа реальных вариантов одновременного действия и возможности появления различных схем приложения временных нагрузок нормами предусмотрены два вида сочетаний нагрузок: основные, включающие постоянные, длительные и кратковременные нагрузки, и особые, состоящие из постоянных, длительных, кратковременных и одной из особых нагрузок. Нагрузки, для которых установлены два нормативных значения, могут быть включены в указанные сочетания либо как длительные (пониженные), либо как кратковременные (полные). Коэффициенты сочетаний ψ, учитываемые при этом, приведены в табл. 9.3.

9.1.4. Нормативные и расчетные сопротивления стали

Стали для строительных конструкций поставляются в соответствии с ГОСТ 27772—88, унифицировавшим требования к методам контроля, химическому составу и механическим свойствам с гарантией уровня обеспеченности 0,95 нормативных механических характеристик. Принятая классификация строительных сталей (обозначается буквой С) включает 13 наименований, среди которых С235, С245, С255, С275 и С285 являются углеродистыми, а С345, С345К, С375, С390, С390К, С440, С590 и С590К — низколегированными. Фасонный прокат выпускается из сталей от С235 до С275. Буква К обозначает модификацию химического состава данной стали. При повышенном содержании меди в обозначение стали добавляется буква Д, например С345Д. Термически упрочненная сталь обозначается буквой Т, например С370Т, С390ДТ. Фасонный прокат толщиной полки до 12 мм из сталей С245 и С255 после термообработки поставляется как сталь С345Т и С375Т, а листовой прокат из стали С345 — как сталь С390Т.

В зависимости от требований по ударной вязкости прокат толщиной 5 мм и более из стали С345 и С375 поставляется по четырем категориям. Для остальных сталей ударная вязкость нормирована после механического старения.

Расчетные сопротивления стали установлены в зависимости от вида напряженного состояния исходя из значений нормативных сопротивлений. При работе на сжатие, растяжение и изгиб расчетное сопротивление определяют с учетом коэффициентов надежности по материалу γ_m по формулам (9.1). Коэффициенты $\gamma_m = 1{,}025$ для всех сталей, кроме С590

Таблица 9.4. Нормативные и расчетные сопротивления для различного вида проката, МПа

Марка стали	Вид проката	Толщина проката, мм	Нормативное сопротивление		Расчетное сопротивление		
			R_{yn}	R_{un}	R_y	R_s	R_u
С235	Лист	2—20	235	360	230	130	350
		21—40	225	360	220	125	350
		41—100	215	360	210	120	350
		>100	195	360	190	105	350
	Фасон	2—20	235	360	230	130	350
		21—40	225	360	220	125	350
С245	Лист	2—20	245	370	240	140	360
	Фасон	2—20	245	370	240	140	360
		21—30	235	370	230	130	360
С255	Лист	2—3,9	255	380	250	145	370
		4—10	245	380	240	140	370
		11—20	245	370	240	140	360
		21—40	235	370	230	130	360
	Фасон	4—10	255	380	250	145	370
		11—20	245	370	240	140	360
		21—40	235	370	230	130	360
С275	Лист	2—10	275	380	270	155	370
		11—20	265	370	260	150	360
	Фасон	2—10	275	390	270	155	380
		11—20	275	380	270	155	370
С285	Лист	2—3,9	285	390	280	160	380
		4—10	275	390	270	155	380
		11—20	265	380	260	150	370
	Фасон	4—10	285	400	280	160	390
		11—20	275	390	270	155	380
С345	Лист	2—10	345	490	335	190	480
		11—20	325	470	315	180	460
		21—40	305	460	300	175	450
		41—60	285	450	280	160	440
		61—80	275	440	270	155	430
		81—160	265	430	260	150	420
	Фасон	2—10	345	490	335	190	480
		11—20	325	470	315	180	460
		21—40	305	460	300	175	450
С345К	Лист	4—10	345	470	335	190	460
	Фасон	4—10	345	470	335	190	460
С375	Лист	2—10	375	510	365	210	500
		11—20	355	490	345	200	480
		21—40	335	480	325	185	470
	Фасон	2—10	375	510	365	210	500
		11—20	355	490	345	200	480
		21—40	335	480	325	185	470
С390	Лист	4—50	390	540	380	220	530
С390К	»	4—30	390	540	380	220	530
С440	Лист	4—30	440	590	430	250	575
		31—50	410	570	400	230	555
С590	»	10—36	540	635	515	300	605
С590К	»	16—40	540	635	515	300	605

и С590К, для которых $\gamma_m = 1{,}05$. При этом расчетное сопротивление R_u, установленное по временному сопротивлению стали разрыву, используется в расчетах конструкций, в которых по характеру их работы допустимо развитие больших деформаций и несущая способность определяется условиями прочности. В остальных случаях основной расчетной характеристикой стали является расчетное сопротивление R_y, установленное по пределу текучести.

Для других видов напряженного состояния расчетные сопротивление равны: при сдвиге (срезе)

$$R_s = 0{,}58R_{yn}/\gamma_m = 0{,}58R_y; \qquad (9.4)$$

при смятии торцевой поверхности (при наличии пригонки)

$$R_p = R_{un}/\gamma_m; \qquad (9.5)$$

при местном смятии в цилиндрических шарнирах (цапфах) при плотном касании

$$R_{lp} = 0{,}5R_{un}/\gamma_m = 0{,}5R_u; \qquad (9.6)$$

при диаметральном сжатии катков (при свободном касании в конструкциях с ограниченной подвижностью)

$$R_{cd} = 0{,}025R_{un}/\gamma_m = 0{,}025R_u; \qquad (9.7)$$

при растяжении в направлении толщины проката

$$R_{th} = 0{,}5R_{un}/\gamma_m = 0{,}5R_u. \qquad (9.8)$$

Значения переходных коэффициентов в формулах (9.4) — (9.8) отражают особенности рассматриваемых напряженных состояний: 0,58 (для R_s) учитывает переход стали в пластическое состояние согласно энергетической теории прочности; 0,5 (для R_{lp}) связан с вычислением равнодействующей от контактных напряжений на полуповерхности цапфы; 0,025 (для R_{cd}) определяет максимальное касательное напряжение под площадкой контакта; 0,5 (для R_{th}) установлен экспериментально в связи с опасностью расслоения проката под действием сил, приложенных перпендикулярно плоскости проката. Коэффициент надежности по материалу в формулах (9.5) — (9.8) принят равным 1,1.

В табл. 9.4 приведены нормативные и расчетные сопротивления сталей для листового, широкополосного универсального и фасонного проката в зависимости от его толщины. За толщину фасонного проката принимают толщину полки профиля, наименьшее значение которой равно 4 мм. Значения расчетных сопротивлений приведены с округлением до 5 МПа.

Листовой прокат толщиной менее 4 мм поставляется в рулонах, что позволяет изготавливать из него гнутые профили с обеспеченностью 0,95 механических характеристик. Поэтому расчетные сопротивления гнутых профилей принимают равными R_y и R_u для соответствующего листового проката, допуская учет упрочнения стали в зоне гибов.

Для изготовления труб используют различные марки сталей, поставляемые по специальным ГОСТ и ТУ. Расчетные сопротивления труб при растяжении, сжатии и изгибе приведены в табл. 9.5.

9.1.5. Учет особенностей работы и степени ответственности конструкций

Значения расчетных сопротивлений стали в зависимости от особенностей действительной работы конструкции или ее элементов могут быть скорректированы коэффициентами условий работы γ_c и коэффициентами надежности по назначению γ_n. В общем случае целесообразно расчетные сопротивления умножать на отношение γ_c/γ_n: $R_y\gamma_c/\gamma_n$ или $R_u\gamma_c/\gamma_n$, причем коэффициент γ_n необходимо вводить во все выполняемые расчеты, а γ_c — в зависимости от типа конструктивного элемента и условий его работы. В этой связи коэффициент γ_n можно использовать и для корректировки расчетных нагрузок или усилий (умножением их на γ_n), что упрощает выполнение расчетных операций.

Коэффициенты условий работы γ_c для сварных стальных конструкций приведены в табл. 9.6. При этом учтены требования норм проектирования [6] о том, что при проверке прочности элементов конструкций перекрытий, воспринимающих значительные постоянные нагрузки, колонн общественных зданий, опор водонапорных башен и стержневых конструкций покрытия, работающих при статическом нагружении, необходимо одновременно вводить два значения коэффициента условий работы. Одно из них ($\gamma_c < 1$) учитывает ответственность указанных конструкций, а другое ($\gamma_c > 1$) — воз-

Таблица 9.5. **Нормативные и расчетные сопротивления труб, МПа**

Марка стали	ГОСТ, ТУ	Толщина стенки, мм	Нормативное сопротивление		γ_m	Расчетное сопротивление	
			R_{yn}	R_{un}		R_y	R_u
ВСт3кп ВСт3пс ВСт3сп ВСт3пс ВСт3сп	ГОСТ 10705—80*	До 10	225	370	1,05	215	350
	ГОСТ 10706—76*	5—15	245	370	1,05	235	350
20	ГОСТ 8731—87	4—36	245	410	1,1	225	375
09Г2С	ТУ 14-3-500—76	8—15	265	470	1,05	250	450
16Г2АФ	ТУ 14-3-567—76	6—9	440	590	1,1	400	535

Таблица 9.6. **Значения коэффициента условий работы для сварных стальных конструкций**

№ п/п	Элементы конструкций	γ_c
1	Сплошные балки и сжатые элементы ферм перекрытий при весе перекрытий, равном или большем временной нагрузки	0,9
2	Сплошные балки при расчете на общую устойчивость при $\varphi_b < 1{,}0$	0,95
3	Балки, несущие статическую нагрузку, при расчете на прочность:	
	с прокатными и составными сечениями	1,1
	балки по п. 1	0,99
4	Колонны общественных зданий и опор водонапорных башен	0,95
5	Колонны, несущие статическую нагрузку, при расчете на прочность:	
	с прокатными и сварными сечениями	1,1
	колонны по п. 4	1,045
6	Сжатые элементы ферм (кроме замкнутых трубчатых сечений) при расчете на устойчивость	0,95
7	Сжатые основные элементы решетки сварных ферм (кроме опорных) составного таврового сечения из уголков при гибкости $\lambda \geqslant 60$	0,8
8	Растянутые элементы сварных стержневых конструкций покрытий и перекрытий	0,95
9	Элементы ферм, несущих статическую нагрузку, при расчете на прочность:	
	сжатые элементы сварных ферм перекрытий по п. 1	0,945
	растянутые элементы с прокатными или сварными сечениями	1,05
10	Затяжки, тяги, оттяжки, подвески, выполненные из прокатной стали	0,9
11	Сжатые элементы решетки пространственных решетчатых конструкций из одиночных равнополочных или неравнополочных (прикрепляемых большей полкой) уголков:	
	прикрепляемые непосредственно к поясам одной полкой сварными швами, раскосы крестовой решетки, а также распорки треугольной или полураскосной решетки с совмещенными в смежных гранях узлами	0,9
	то же, раскосы крестовой или треугольной решетки с несовмещенными узлами, а также полураскосной решетки с совмещенными в смежных гранях узлами	0,8

Продолжение табл. 9.6

№ п/п	Элементы конструкций	γ_c
12	Сжатые элементы из одиночных уголков, прикрепляемые одной полкой (для неравнополочных уголков — только меньшей полкой), за исключением элементов конструкций, указанных в п. 11, и плоских ферм из одиночных уголков, а также раскосов треугольной решетки пространственных конструкций с совмещенными в смежных гранях узлами, прикрепляемых к поясам сварными швами	0,75
13	Опорные плиты из стали с пределом текучести до 285 МПа, несущие статическую нагрузку, толщиной:	
	до 40 мм	1,2
	свыше 40 до 60 мм	1,15
	свыше 60 до 80 мм	1,1
14	Сжатые пояса из одиночных уголков стоек свободно стоящих опор воздушных линий ОРУ и линий КС транспорта в первых двух панелях от башмака при сварных узловых соединениях	0,95
15	Сжатые элементы плоских решетчатых траверс опор ОРУ и КС из одиночных равнополочных уголков, прикрепляемых одной полкой (пояса, прикрепляемые к стойке опоры через фасонку; раскосы и распорки)	0,75
16	Оттяжки опор ОРУ и КС из стальных канатов и пучков высокопрочной проволоки:	
	для промежуточных опор в нормальных режимах работы	0,9
	для анкерных, анкерно-угловых и угловых опор в нормальных режимах работы	0,8
	то же, в аварийных режимах работы	0,9
17	Предварительно напряженные элементы решетки АС	0,9
18	Элементы АС:	
	фланцы кольцевого типа	1,1
	фланцы остальных типов	0,9
	стальные канаты оттяжек мачт или элементы антенных полотен при количестве:	
	3—5 оттяжек в ярусе или элементов антенных полотен	0,8
	6—8 оттяжек в ярусе	0,9

Продолжение табл. 9.6

№ п/п	Элементы конструкций	γ_c
	9 и более оттяжек в ярусе	0,95
	заделка концов в коуше зажимами или точечное опрессование во втулке	0,75
	оплетка каната на коуше или изоляторе	0,55
	элементы крепления оттяжек, антенных полотен, приводов, подкосов к опорным конструкциям и анкерным фундаментам	0,9
	анкерные тяжи без резьбовых соединений при работе их на растяжение с изгибом	0,65
	проушины при работе на растяжение	0,65
	детали креплений и соединений стальных канатов:	
	механические, кроме осей шарниров,	0,8
	оси шарниров при смятии	0,9
19	Элементы трубопроводов при расчете на внутреннее давление:	
	без учета местных напряжений (кроме обшивок плоских заглушек)	0,7 (0,95)
	с учетом местных напряжений (кроме плоских заглушек без балочной клетки)	1,1 (1,5)
	плоские заглушки без балочной клетки	0,55(0,7)
20	Элементы трубопроводов при расчете на внешнее давление:	
	оболочки прямолинейных участков и колен	0,8 (0,9)
	кольца жесткости	0,65 (0,75)
21	Анкеры плоских облицовок затворных камер и водопроводов	0,85

Примечания. 1. В пп. 19—20 приведены коэффициенты γ_c при основных сочетаниях нагрузок, а в скобках — при особых. 2. ОРУ — открытые распределительные устройства, КС — контактные сети, АС — антенные сооружения.

можность повышения расчетного сопротивления при расчете на прочность от статических нагрузок. Если оба значения $\gamma_c < 1$, то их одновременно учитывать не следует.

Коэффициенты условий работы, приведенные в табл. 9.6, при расчете соединений, как правило, не учитывают. Исключение составляют только стыковые сварные соединения растянутых элементов — затяжек, тяг, подвесок, поясов и раскосов ферм перекрытий и покрытий (пп. 8, 10), а также соединения элементов перекрытий, когда их собственный вес равен или больше временной нагрузки, и колонн общественных зданий и опор водонапорных башен (пп. 1, 4), для которых следует использовать те же коэффициенты γ_c, что и для проверок их сечений.

Для элементов конструкций, рассчитываемых на прочность с использованием расчетного сопротивления R_u, следует дополнительно учитывать коэффициент надежности $\gamma_u = 1{,}3$.

Коэффициенты надежности по назначению γ_n (табл. 9.7) учитывают в расчетах в соответствии с Правилами учета степени ответственности зданий и сооружений при проектировании конструкций, введенными Госстроем СССР с 1.07.1981 г.

9.2. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

9.2.1. Центрально-растянутые и центрально-сжатые стержни

Центрально-растянутые элементы. Предельное состояние центрально-растянутых стержней, работающих в упругой области, наступает при достижении напряжениями в сечении значений предела текучести. В этом случае расчетная формула имеет вид

$$\sigma = N/A_n \leqslant R_y\gamma_c, \qquad (9.9)$$

где A_n — площадь сечения нетто.

Для растянутых элементов, выполненных из сталей с отношением $R_u/\gamma_u > R_y$, при условии возможности их эксплуатации после достижения металлом предела текучести проверку прочности выполняют по формуле

$$\sigma = N/A_n \leqslant R_u\gamma_c/\gamma_u. \qquad (9.10)$$

Центрально-сжатые элементы. Несущая способность центрально-сжатых стержней может быть исчерпана вследствие наступления одного из двух предельных состояний: потери прочности при достижении напряжениями значений предела текучести и потери устойчивости. Первый случай характерен для коротких стержней, и их прочность проверяют по формуле (9.9). Для гибких стержней сплошного или сквозного поперечного сечения проверку устойчивости выполняют по формуле

$$\sigma = N/\varphi A < R_y\gamma_c, \qquad (9.11)$$

где A — площадь сечения брутто; φ — коэффициент продольного изгиба; определяемый либо по табл. 9.8 в зависимости от расчетного сопротивления стали и гибкости стержня, либо по формулам

$$\varphi = 1 - (0{,}073 - 5{,}53R_y/E)\,\bar{\lambda}\sqrt{\bar{\lambda}} \quad \text{при } 0 < \bar{\lambda} \leqslant 2{,}5; \qquad (9.12)$$

$$\varphi = 1{,}47 - 13R_y/E - (0{,}371 - 27{,}3\,R_y/E)\,\bar{\lambda} +$$

Таблица 9.7. **Значения коэффициента надежности по назначению**

Класс конструкций	Степень ответственности объекта	Примеры объектов	γ_n
I	Основные здания и сооружения объектов, имеющих особо важное народнохозяйственное и (или) социальное значение	Главные корпуса ТЭС, АЭС, центральные узлы доменных печей, дымовые трубы высотой более 200 м, сооружения магистральной первичной сети ЕАСС, резервуары для нефти и нефтепродуктов объемом более 10 000 м³ и т. п.	1,0
II	Здания и сооружения объектов, имеющих важное народнохозяйственное и (или) социальное значение	Объекты, не вошедшие в I и III классы	0,95
III	Здания и сооружения объектов, имеющих ограниченное народнохозяйственное и (или) социальное значение	Склады без процессов сортировки и упаковки для хранения сельхозпродуктов, удобрений, химикатов, угля, торфа и др., теплицы, парники, ограды, временные здания и сооружения	0,9
—	Временные здания и сооружения со сроком службы менее 5 лет		0,8

Таблица 9.8. Значения коэффициента φ

λ	R_y, МПа											
	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600	640
10	988	987	985	984	983	982	981	980	979	978	977	977
20	967	962	959	955	952	949	946	943	941	938	936	934
30	939	931	924	917	911	905	900	895	891	887	883	879
40	906	894	883	873	863	854	846	849	832	825	820	814
50	869	852	836	822	809	796	785	775	764	746	729	712
60	827	805	785	766	749	721	696	672	650	628	608	588
70	782	754	724	687	654	623	595	568	542	518	494	470
80	734	686	641	602	566	532	501	471	442	414	386	359
90	665	612	565	522	483	447	413	380	349	326	305	287
100	599	542	493	448	408	369	335	309	286	267	250	235
110	537	478	427	381	338	306	280	258	239	223	209	197
120	479	419	366	321	287	260	237	219	203	190	178	167
130	425	364	313	276	247	223	204	189	175	163	153	145
140	376	315	272	240	215	195	178	164	153	143	134	126
150	328	276	239	211	189	171	157	145	134	126	118	111
160	290	244	212	187	167	152	139	129	120	112	105	099
170	259	218	189	167	150	136	125	115	107	100	094	089
180	233	196	170	150	135	123	112	104	097	091	085	081
190	210	177	154	136	122	111	102	094	088	082	077	073
200	191	161	140	124	111	101	093	086	080	075	071	067
210	174	147	128	113	102	093	085	079	074	069	065	062
220	160	135	118	104	094	086	077	073	068	064	060	057

Примечание. Значения коэффициента φ увеличены в 1000 раз.

$$+ (0{,}0275 - 5{,}53R_y/E)\,\bar{\lambda}^2 \text{ при } 2{,}5 < \bar{\lambda} \leqslant 4{,}5; \quad (9.13)$$

$$\varphi = 332/\bar{\lambda}^2\,(51 - \bar{\lambda}) \text{ при } \bar{\lambda} \geqslant 4{,}5, \quad (9.14)$$

где $\bar{\lambda} = \lambda\sqrt{R_y/E}$; $\lambda = l_{ef}/i$.

Сжатые стержни открытого П-образного сечения, не укрепленные планками или решетками с открытой стороны, помимо расчета по формуле (9.11) необходимо проверить при изгибно-крутильной форме потери устойчивости:

$$\sigma = N/c\varphi_y A \leqslant R_y\gamma_c, \quad (9.15)$$

где φ_y — коэффициент продольного изгиба, найденный относительно центральной оси, параллельной стенкам профиля (рис. 9.1, *а*),

$$c = \frac{2}{1 + \delta + \sqrt{(1-\delta)^2 + 16\alpha^2/\mu}}; \quad \delta = 4\rho/\mu;$$

$$\mu = 8J_\omega/J_y h^2 + 0{,}156\,(J_t/Ah^2)\,\lambda_y^2; \quad \rho = \frac{J_x + J_y}{Ah^2} + \alpha^2;$$

$$J_t = 1/3\Sigma b_i t_i^3.$$

Здесь $\alpha = a_x/h$ — относительное расстояние между центром тяжести и центром изгиба; J_ω — секториальный момент инерции сечения; h — высота сечения; b_i и t_i — соответственно ширина и толщина прямоугольных элементов, составляющих сечение; J_x и J_y — моменты инерции сечения относительно осей x—x и y—y соответственно. Для сечения, показанного на рис. 9.1, *а*, можно принять

$$J_\omega/J_y h^2 = (39 + 28)/(6 + \beta)^2, \quad J_t/Ah^2 = \frac{1}{3}\,(t/h)^2,$$

$$\alpha = 4\,(3 + \beta)/(2 + \beta)\,(6 + \beta), \quad \beta = b/h.$$

Центрально-сжатые стержни из одиночных уголков, входящие в состав пространственных сварных решетчатых конструкций, рассчитывают, как правило, с учетом влияния эксцентричного приложения продольных сил. Для этого в формуле (9.11) следует увеличить продольную силу умножением на коэффициент α, который при прикреплении раскосов в узле только с внутренней стороны полки пояса при $N_{md}/N_m \leqslant 0{,}7$ равен: 1,0 — при центрировании стержней по центрам тяжести сечений; $1 + 0{,}12N_{md}/N_m$ — при центрировании осей раскосов на обушок пояса. Здесь N_m — продольная сила в панели пояса, N_{md} — сумма проекций усилий раскосов, примыкающих в узле к одной полке пояса. Равнодействующая N_{md} направлена вдоль оси пояса и определяется при том же сочетании нагрузок, при котором найдена сила N_m. При расчете пояса в качестве N_{md} следует принимать большее из значений, полученных для узлов на концах панели рассчитываемого пояса, а при расчете раскосов — для узла, к которому примыкает раскос.

Гибкость стержней. Значения гибкости стержней зависят от типа сечения, расчетных длин l_{ef} и радиуса инерции сечения i. Для элементов со сплошным сечением расчетные гибкости определяют в двух главных плоскостях, перпендикулярных соответственно осям x—x и y—y:

$$\lambda_x = l_{ef,x}/i_x; \quad \lambda_y = l_{ef,y}/i_y. \quad (9.16)$$

Для составных стержней, ветви которых соединены планками или решетками, гибкость λ_x относительно материальной оси (ось пересекает стенки ветвей) определяют по формуле (9.16), а относительно свободной (ось перпендикулярна к плоскости

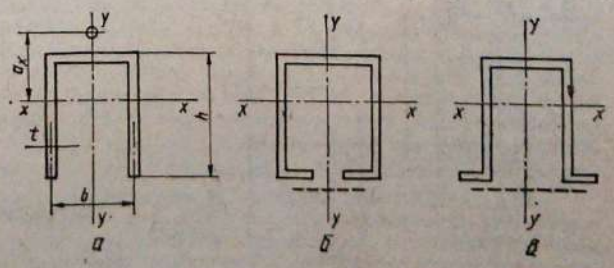
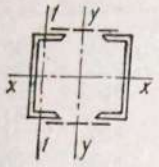
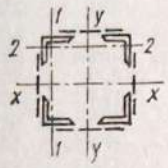
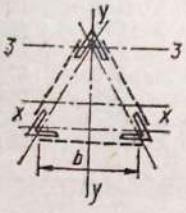


Рис. 9.1. П-образные сечения:
а — открытое; *б*, *в* — укрепленные планками или решетками

Таблица 9.9. **Приведенные гибкости составных стержней**

Схема сечения	Для стержней с планками при $l/n_l < 5$	Для стержней с планками при $l/n_l \geqslant 5$	Для стержней с решетками
	$\sqrt{\lambda_y^2 + 0{,}82\lambda_1^2(1+n)}$	$\sqrt{\lambda_y^2 + \lambda_1^2}$	$\sqrt{\lambda_y^2 + \alpha_1 A/A_{d_1}}$
	$\sqrt{\lambda^2 + 0{,}82[\lambda_1^2(1+n_1) + \lambda_2^2(1+n_2)]}$	$\sqrt{\lambda^2 + \lambda_1^2 + \lambda_2^2}$	$\sqrt{\lambda^2 + A(\alpha_1/A_{d_1} + \alpha_2/A_{d_2})}$
	$\sqrt{\lambda^2 + 0{,}82\lambda_3^2(1+3n_3)}$	$\sqrt{\lambda^2 + \frac{1}{b^2}3\lambda_3^2}$	$\sqrt{\lambda^2 + \alpha_1 2A/3A_d}$

расположения соединительных элементов) — приведенную гибкость λ_{ef} по формуле табл. 9.9.

Приведенные гибкости составных стержней с планками зависят от наибольшей гибкости стержня λ, найденной по формуле (9.16) в предположении цельного сечения (для сечения *1* гибкость определяют относительно оси y—y), гибкостей отдельных ветвей λ_i при изгибе их в плоскостях, перпендикулярных соответственно к осям *1*—*1* (для сечений *1* и *2*), *2*—*2* (для сечений *2*) и *3*—*3* (для сечений *3*) на участках между приваренными планками (в свету), и коэффициента $1/n_l$. При $1/n_l < 5$ значения λ_{ef} определяют с учетом изгиба планки, а при $1/n_l \geqslant 5$ им пренебрегают. Коэффициент n_l находят по формуле

$$n_l = J_{bl}b/J_{sl}l, \qquad (9.17)$$

где i — номер собственной оси ветви соответствующего сечения; J_{bl} — момент инерции ветви (швеллера в сечении *1*, двух уголков в сечении *2*, одного уголка в сечении *3*) относительно осей соответственно *1*—*1*, *2*—*2*, *3*—*3*; J_{sl} — момент инерции сечения одной планки относительно собственной оси x—x; b и l — расстояния соответственно между осями ветвей и центрами планок (рис. 9.2, *а*).

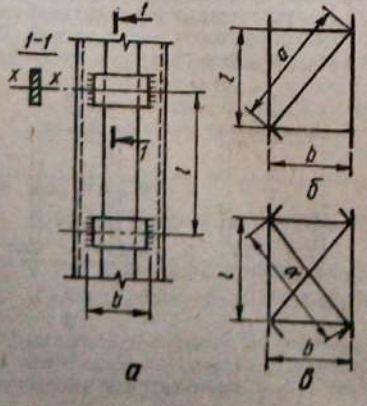


Рис. 9.2. Составные стержни:
а — на планках; *б*, *в* — схемы решеток раскосной и крестовой с распорками соответственно.

Для составных стержней с решетками приведенная гибкость определяется в зависимости от отношения площади сечения всего стержня A к площади сечения раскосов решетки A_d и коэффициента α (α_1 и α_2) $= 10a^3/b^2l$, где a, b, l — размеры, обозначенные на рис. 9.2, *б*, *в*. Для сечений *1* и *2* в качестве A_{d_1} и A_{d_2} принимают площади сечений раскосов, лежащих в двух плоскостях, перпендикулярных к осям соответственно *1*—*1* и *2*—*2*, а для сечения *3* A_d — площадь сечения раскоса, лежащего в плоскости одной грани. При крестовой решетке количество раскосов следует удваивать.

Составные стержни из уголков, швеллеров и т. п., соединенных вплотную или через прокладки, расстояния между которыми не превышают в сжатых элементах $40i$, а в растянутых — $80i$, рассчитывают, как сплошностенчатые. Для тавровых или двутавровых сечений, образованных из уголков или швеллеров, в качестве i следует принимать радиус инерции одного профиля относительно оси, параллельной плоскости расположения прокладок, а для крестовых сечений — минимальный радиус инерции одного уголка.

В составных стержнях с безраскосной или раскосной решеткой помимо проверки устойчивости стержня в целом необходимо проверить устойчивость отдельных ветвей в плоскости, перпендикулярной свободной оси. Гибкость отдельных ветвей не должна быть больше приведенной гибкости всего стержня λ_{ef} и на участке между планками не должна превышать 40, а между узлами крепления раскосов решетки — 80. Если в одной из плоскостей вместо планок расположен сплошной лист (см. рис. 9.1), то гибкость ветви определяют с использованием радиуса инерции полусечения, найденного относительно его оси, перпендикулярной плоскости планок.

Элементы соединительной решетки сжатых составных стержней рассчитывают на условную поперечную силу, возникающую при их продольном изгибе. Значение силы принимают постоянным по длине элемента и вычисляют по формуле

$$Q_{fic} = 7{,}15 \cdot 10^{-6}(2330 - E/R_y)N/\varphi. \qquad (9.18)$$

где N — продольное усилие в составном стержне; φ — коэффициент продольного изгиба, принимаемый по приведенной гибкости. Сила Q_{fic} распределяется поровну между плоскостями расположения планок или решеток, перпендикулярных свободной оси сечения. Обычно таких плоскостей две, поэтому к каждой планке или к узлу крепления раскосов решетки прикладывается сила $Q_s = 0{,}5Q_{fic}$. В П-образных сечениях, которые при $\lambda_x < 3\lambda_y$ (λ_x и λ_y — расчетные гибкости элемента в плоскостях, перпендикулярных к осям соответственно $x-x$ и $y-y$, см. рис. 9.1, *б*, *в*) рекомендуется укреплять планками или решеткой, расчетная сила, приходящаяся на соединительные элементы, равна $0{,}5Q_{fic}$.

Каждая плоскость расположения планок (решеток) в трехгранных составных стержнях воспринимает силу, равную $0{,}8Q_{fic}$.

Планки как стержни безраскосной фермы (рамы) работают на срез и на изгиб. Усилия, действующие в планке, определяются из условия равновесия вырезанного узла относительно нулевых точек, которые при одинаковых жесткостях планок располагаются в серединах панелей ветвей и планок (рис. 9.3, *а*).

Изгибающий момент в планке

$$M = Q_s l/2, \tag{9.19}$$

перерезывающая сила

$$F = Q_s l/b, \tag{9.20}$$

где b и l — расстояния между осями соответственно ветвей и планок.

Усилия в стержнях решетки определяют, как в ферме, к узлам которой приложены силы $Q_s = 0{,}5Q_{fic}$ (при двух плоскостях решетки). Усилие в раскосе

$$N_d = Q_s/\sin\alpha, \tag{9.21}$$

где α — угол наклона раскоса к ветви. Аналогично находят усилие в стойке решетки:

$$N_v = Q_s. \tag{9.22}$$

При расчете раскосов перекрестной решетки с распорками (см. рис. 9.2, *в*) помимо поперечной силы Q_{fic} необходимо учитывать дополнительное усилие N_{ad}, возникающее в каждом раскосе от продольной деформации стержня:

$$N_{ad} = \alpha N A_d/A, \tag{9.23}$$

где N — усилие в одной ветви составного стержня; A и A_d — площади сечений соответственно одной ветви и одного раскоса. Коэффициент α определяется по формуле (см. обозначения на рис. 9.2, *в*)

$$\alpha = al^2/(a^3 + 2b^3). \tag{9.24}$$

Проверка устойчивости перекрестного раскоса выполняется по формуле (9.11) на суммарное усилие $N_d + N_{ad}$.

Стержни, предназначенные для уменьшения расчетных длин сжатых элементов, рассчитывают на условную поперечную силу, возникающую при продольном изгибе основного сжатого стержня.

9.2.2. Изгибаемые элементы

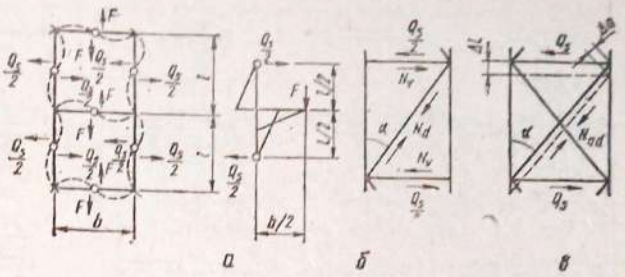
Работа в пределах упругости. При изгибе в одной из главных плоскостей проверка по нормальным напряжениям для балок (кроме балок с гибкой стенкой, перфорированных, подкрановых) производится по формуле

$$\sigma = M/W_{n\,\min} \leqslant R_y\gamma_c, \tag{9.25}$$

а при изгибе в двух плоскостях

$$\sigma = M_x y/J_{xn} \pm M_y x/J_{yn} \leqslant R_y\gamma_c; \tag{9.26}$$

здесь M, M_x, M_y — абсолютные значения изгибающих моментов, $W_{n\,\min}$ — минимальный момент сопротивления сечения нетто, J_{xn} и J_{yn} — моменты инерции нетто относительно



а *б* *в*

Рис. 9.3. Определение расчетных усилий в соединительных элементах составного стержня:
а — в планках; *б* — в раскосной решетке; *в* — в перекрестной решетке.

главных осей сечения, x и y — координаты рассматриваемой точки сечения относительно главных осей.

Проверка по касательным напряжениям выполняется по формуле

$$\tau = QS_s/\alpha J t_w \leqslant R_s\gamma_c, \tag{9.27}$$

где S_s — статический момент сдвигаемой части сечения; t_w — толщина стенки; α — коэффициент, учитывающий ослабление стенки регулярно расположенными отверстиями для болтов, равный $a/(a-d)$ (a и d — соответственно шаг и диаметр отверстий), при отсутствии ослаблений $\alpha = 1$.

В местах приложения сосредоточенной нагрузки к верхнему поясу, а также в опорных сечениях при отсутствии опорных ребер местное напряжение при расчете на прочность стенки балки определяется по формуле

$$\sigma_{loc} = F/l_{ef}t_w \leqslant R_y\gamma_c, \tag{9.28}$$

где F — расчетная нагрузка; l_{ef} — условная длина распределения нагрузки F. Значение l_{ef} зависит от условий опирания вышележащего элемента. Для случаев, представленных на рис. 9.4, $l_{ef} = b + 2t_f$, где b — ширина опирания вышележащей балки, t_f — толщина верхнего пояса сварной балки (рис. 9.4, *а*) или расстояние от наружной грани полки до начала внутреннего закругления стенки прокатной балки (рис. 9.4, *б*). При наличии под силой F ребер жесткости, верхние концы которых пристроганы к верхнему поясу, $\sigma_{loc} = 0$.

Проверку прочности стенки в сечениях с неблагоприятным сочетанием напряжений σ_x, σ_y, τ выполняют по формуле

$$\sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leqslant 1{,}15R_y\gamma_c, \quad \tau_{xy} \leqslant R_s\gamma_c. \tag{9.29}$$

Здесь $\sigma_x = \dfrac{M}{J_x}y$ — нормальное напряжение в серединной плоскости стенки, направленное параллельно оси балки; σ_y — то же, перпендикулярно к оси, в том числе σ_{loc}; τ_{xy} — касательное напряжение, вычисляемое по формуле (9.27) в той же точке стенки балки, для которой определены σ_x и σ_y.

При изгибе в двух главных плоскостях проверки (9.27), (9.29) необходимо выполнять в каждой плоскости изгиба.

Под воздействием вертикальных нагрузок, расположенных в плоскости главной оси инерции, изгибаемые элементы могут потерять общую устойчивость (устойчивость плоской формы изгиба) вследствие наличия в их сечениях сжатой зоны. Во избежание этого сжатый пояс балки должен быть закреплен для предотвращения горизонтальных смещений либо непрерывно опирающимся на пояс жестким настилом, надежно связанным с балкой, либо с помощью связей, расположенных на расстоянии l_{ef} друг от друга так, чтобы отношение расчетной длины балки l_{ef} к ширине сжатого пояса b не превышало значений, определяемых по формулам табл. 9.10.

Данные табл. 9.10 распространяются на балки симметричного двутаврового сечения (рис. 9.5, *а*) и с более развитым сжатым поясом (рис. 9.5, *б*), ширина которого превышает ширину растянутого пояса не более чем на 25 % при $1 \leqslant h/b < 6$ и $15 \leqslant b/t \leqslant 35$, где b и t — соответственно ширина и

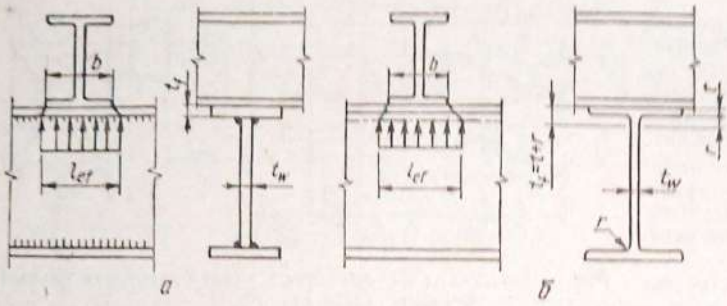


Рис. 9.4. Определение местных напряжений в стенке балок:
а — сварной; *б* — прокатной.

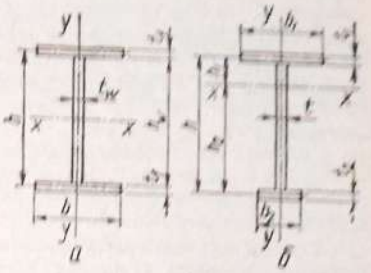


Рис. 9.5. Двутавровые сечения:
а — с двумя осями симметрии; *б* — с одной осью симметрии.

толщина сжатого пояса; h — расстояние между осями поясных швов. Для балок с отношением $b/t < 15$ в формулах табл. 9.10 следует принимать $b/t = 15$.

Закрепление сжатого пояса от горизонтальных смещений необходимо рассчитывать на фактическую или условную поперечную силу. При закреплении в отдельных точках условную поперечную силу определяют по формуле (9.18), в которой φ вычисляют по гибкости $\lambda = l_{ef}/i$ (i — радиус инерции сечения сжатого пояса в горизонтальной плоскости), а N — по формуле

$$N = (A_f + 0{,}25A_w)\, R_y, \qquad (9.30)$$

где A_f, A_w — площадь полки и стенки балки соответственно.

При наличии непрерывного закрепления сжатого пояса условная поперечная сила на единицу длины пояса балки q_{fic} равна:

$$q_{fic} = 3Q_{fic}/l, \qquad (9.31)$$

где Q_{fic} — условная поперечная сила, определяемая по формуле (9.18) при $\varphi = 1$ и продольной силе N, найденной по формуле (9.30).

Если реальные отношения l_{ef}/b больше предельных, необходимо выполнить расчет на устойчивость балок, изгибаемых в плоскости стенки, по формуле

$$\sigma = M/\varphi_b W_c \leqslant R_y\gamma_c, \qquad (9.32)$$

где W_c — момент сопротивления для сжатого пояса.

Для балок симметричного двутаврового сечения (рис. 9.5, *а*) $\varphi_b = \varphi_1$ при $\varphi_1 \leqslant 0{,}85$, $\varphi_b = 0{,}68 + 0{,}21\,\varphi_1 \leqslant 1$ при $\varphi_1 > 0{,}85$. Коэффициент

$$\varphi_1 = \psi \frac{J_y E}{J_x R_y} (h/l_{ef})^2, \qquad (9.33)$$

Значение ψ следует определять по табл. 9.11 и 9.12 в зависимости от вида нагрузки, характера ее передачи, количества закреплений сжатого пояса и параметра α, который равен для прокатных двутавров

$$\alpha = 1{,}54 \frac{J_t}{J_y} (l_{ef}/h_1)^2, \qquad (9.34)$$

для сварных двутавров

$$\alpha = 8\,(l_{ef}t_f/hb_f)^2\,(1 + at_w^3/b_f t_f^3), \qquad (9.35)$$

где J_t — момент инерции сечения при кручении; h_1 — полная высота прокатного сечения; $a = 0{,}5h$ (h — расстояние между осями поясов); l_{ef} — расчетная длина балки или консоли, которую следует принимать равной l при отсутствии закреплений сжатого пояса в горизонтальной плоскости (l — пролет балки или длина консоли при отсутствии закрепления сжатого пояса на конце консоли) или расстоянию между точками закреплений сжатого пояса от поперечных смещений (узлами крепления связей, поперечных элементов, жесткого настила и т. п.) при наличии связей по длине пролета или консоли, в том числе и на конце консоли.

При наличии закреплений сжатого пояса жестко заделанных консолей в горизонтальной плоскости только на конце или по длине консоли коэффициенты ψ следует определять по табл. 9.12, как для консоли без закреплений. В случае приложения сосредоточенной нагрузки к верхнему поясу на конце консоли $\psi = 1{,}75\psi_1$; ψ_1 следует определять согласно примечанию к табл. 9.11.

Для балок двутаврового сечения с одной осью симметрии (см. рис. 9.5, *б*) коэффициенты φ_b в формуле (9.32) равны при более развитом сжатом поясе $\varphi_b = \varphi_1$, если $\varphi_2 \leqslant 0{,}85$; $\varphi_b = \varphi_1(0{,}21 + 0{,}68\,(n/\varphi_1 + (1 - n)/\varphi_2)) \leqslant 1$, если $\varphi_2 > 0{,}85$; при более развитом растянутом поясе $\varphi_b = \varphi_2$, если $\varphi_2 \leqslant 0{,}85$; $\varphi_b = 0{,}68 + 0{,}21\,\varphi_2 \leqslant 1$, если $\varphi_2 > 0{,}85$.

Коэффициенты

$$\varphi_1 = \psi\,(2hh_1/l_{ef}^2)\,(J_y E/J_x R_y);$$

$$\varphi_2 = \psi\,(2hh_2/l_{ef}^2)\,(J_y E/J_x R_y); \qquad (9.36)$$

$$\psi = D\,(B + \sqrt{B^2 + C}); \quad n = J_1/(J_1 + J_2), \qquad (9.37)$$

где h_1 — расстояние от центра тяжести сечения до оси более развитого пояса; h_2 — то же, менее развитого пояса; J_1, J_2 — моменты инерции соответственно большего и меньшего поясов относительно оси симметрии сечения.

Коэффициенты D и C следует принимать по табл. 9.13 в зависимости от параметров α и μ:

$$\mu = n\,(1 - n)\,(9{,}87 + \alpha_1),$$

где $\alpha_1 = 0{,}385 \dfrac{J_t\,(J_1 + J_2)}{J_1 J_2} (l_{ef}/h)^2$; $n = \dfrac{J_1}{J_1 + J_2}$.

Параметр α следует определять по формуле (9.34), в которой момент инерции сечения при кручении равен

(9.38)

Таблица 9.10. **Наибольшие значения l_{ef}/b, при которых не требуется расчета на устойчивость прокатных и сварных балок**

Место приложения нагрузки	l_{ef}/b
Верхний пояс	$l_{ef}/b = [0{,}35 + 0{,}0032\,b/t + (0{,}76 - 0{,}02\,b/t)\,b/h]\sqrt{E/R_y}$
Нижний пояс	$l_{ef}/b = [0{,}57 + 0{,}0032\,b/t + (0{,}92 - 0{,}02b/t)\,b/h]\sqrt{E/R_y}$
Независимо от уровня приложения нагрузки при расчете участка балки между связями или при чистом изгибе	$l_{ef}/b = [0{,}41 + 0{,}0032\,b/t + (0{,}73 - 0{,}016\,b/t)\,b/h]\sqrt{E/R_y}$

Примечание. b и t — соответственно ширина и толщина сжатого пояса, h — расстояние (высота) между осями поясных листов, $1 \leqslant h/b < 6$, $15 \leqslant b/t \leqslant 35$.

Таблица 9.11. **Значения ψ для двутавровых балок с двумя осями симметрии**

Количество закреплений сжатого пояса в пролете	Вид нагрузки в пролете	Нагруженный пояс	$0,1 \leqslant \alpha \leqslant 40$	$40 < \alpha \leqslant 400$
Без закреплений	Сосредоточенная	Верхний	$\psi = 1,75+0,09\alpha$	$\psi = 3,3+0,053\alpha-4,5\cdot10^{-5}\alpha^2$
		Нижний	$\psi = 5,05+0,09\alpha$	$\psi = 6,6+0,053\alpha-4,5\cdot10^{-5}\alpha^2$
	Равномерно распределенная	Верхний	$\psi = 1,6+0,08\alpha$	$\psi = 3,15+0,04\alpha-2,7\cdot10^{-5}\alpha^2$
		Нижний	$\psi = 3,8+0,08\alpha$	$\psi = 5,35+0,04\alpha-2,7\cdot10^{-5}\alpha^2$
Два и более, делящих пролет на равные части	Любая	Любой	$\psi = 2,25+0,07\alpha$	$\psi = 3,6+0,04\alpha-3,5\cdot10^{-5}\alpha^2$
Одно в середине	Сосредоточенная в середине	»	$\psi = 1,75\psi_1$	$\psi = 1,75\psi_1$
	Сосредоточенная в четверти	Верхний	$\psi = 1,14\psi_1$	$\psi = 1,14\psi_1$
		Нижний	$\psi = 1,6\psi_1$	$\psi = 1,6\psi_1$
	Равномерно распределенная	Верхний	$\psi = 1,14\psi_1$	$\psi = 1,14\psi_1$
		Нижний	$\psi = 1,3\psi_1$	$\psi = 1,3\psi_1$

Примечание. Значение ψ_1 следует принимать равным ψ при двух и более закреплениях сжатого пояса в пролете.

где b_i и t_i — соответственно ширина и толщина листов, образующих сечения; $\delta = 1,25$ для двутаврового сечения с одной осью симметрии; $\delta = 1,2$ для таврового сечения.

Значения коэффициента B (табл. 9.14) зависят от следующих параметров:

$$\beta = \{0,47 - 0,035\,(b_1/h)\,[1 + b_1/h - 0,072\,(b_1/h)^2]\} \times \times (2n - 1), \qquad (9.38a)$$

$$\delta = n + 0,734\beta, \quad \mu = n + 1,145\beta,$$

где b_1 — ширина более развитого пояса.

Для двутавровых сечений при $0,9 < n < 1,0$ коэффициенты ψ следует определять линейной интерполяцией между значениями, найденными для двутавровых сечений при $n = 0,9$ и для тавровых при $n = 1$. Для тавровых сечений при сосредоточенных или равномерно распределенных нагрузках и $\alpha < 40$ коэффициенты ψ следует умножать на $(0,8 + 0,004\alpha)$.

При $n > 0,7$ и $5 \leqslant l_{ef}/b_2 \leqslant 25$ значение коэффициента φ_2 нужно уменьшить умножением на $(1,025 - 0,015\,l_{ef}/b_2)$ и принимать равным не более 0,95. В балке с менее развитым сжатым поясом значения $l_{ef}/b_2 > 25$ не допускаются.

Для балок швеллерного сечения коэффициент φ_b определяют, как для балок симметричного двутаврового сечения с вычислением коэффициента α по формуле (9.34) и умножением коэффициента φ_1, найденного по формуле (9.33), на 0,7. При этом значения J_x, J_y и J_t следует принимать для швеллера.

Работа с учетом ограниченного развития пластических деформаций. Учет пластической работы стали с ограничением пластической деформации ($\bar{\varepsilon}_{ост} = \varepsilon_{ост}\,E/R \leqslant 3$) допускается в разрезных балках, несущих статическую нагрузку и выполненных из сталей с пределом текучести до 580 МПа, при соблюдении условий, обеспечивающих общую и местную устойчивость.

При изгибе в одной из главных плоскостей

$$\sigma = M/c_1 W_{n\,min} \leqslant R_y\gamma_c, \qquad (9.39)$$

при изгибе в двух главных плоскостях

$$\sigma = M_x/c_x W_{xn\,min} + M_y/c_y W_{yn\,min} \leqslant R_y\gamma_c. \qquad (9.40)$$

Формулы (9.39) и (9.40) справедливы в предположении, что материал течет только под влиянием нормальны

Таблица 9.12. **Значения ψ для жестко заделанных консолей двутаврового сечения с двумя осями симметрии при отсутствии закреплений сжатого пояса**

Вид нагрузки	Нагруженный пояс	$4 \leqslant \alpha \leqslant 28$	$28 \leqslant \alpha \leqslant 100$
Сосредоточенная на конце консоли	Верхний	$\psi = 1,0+0,16\alpha$	$\psi = 4,0 + 0,05\alpha$
	Нижний	$\psi = 6,2 + 0,08\,\alpha$	$\psi = 7,0 + 0,05\alpha$
Равномерно распределенная	Верхний	$\psi = 1,42\sqrt{\alpha}$	

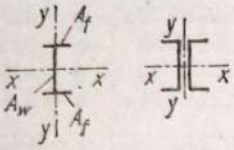
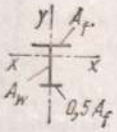
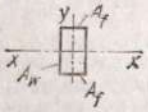
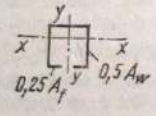
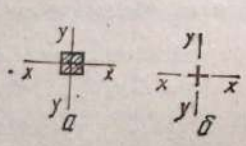
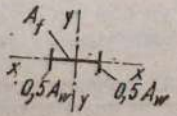
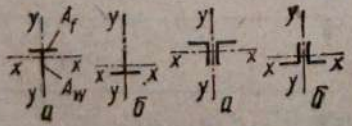
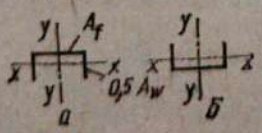
Таблица 9.13. **Значения коэффициентов D и C**

Вид нагрузки	D	C	
		двутавровое сечение $n \leqslant 0,9$	тавровое сечение, $n = 1$
Сосредоточенная в середине пролета	3,265	0,33μ	0,0826α
Равномерно распределенная	2,247	0,481μ	0,1202α
Чистый изгиб	4,315	0,101μ	0,0253α

Таблица 9.14. **Значения коэффициента B**

Схема сечения и место приложения нагрузки	Нагрузка		
	сосредоточенная в середине пролета	равномерно распределенная	вызывающая чистый изгиб
	δ	μ	β
	δ — 1	μ — 1	β
	1 — δ	1 — μ	—β
	—δ	—μ	—β

Таблица 9.15. **Значения коэффициентов** $c\,(c_x)$, c_y, n

Тип сечения	Схема сечения	$\frac{A_f}{A_w}$	$c\,(c_x)$	c_y	n при $M_y = 0$
1		0,25 0,5 1,0 2,0	1,19 1,12 1,07 1,04	1,47 1,47 1,47 1,47	1,5 1,5 1,5 1,5
2		0,5 1,0 2,0	1,40 1,28 1,18	1,47 1,47 1,47	2,0 2,0 2,0
3		0,25 0,5 1,0 2,0	1,19 1,12 1,07 1,04	1,07 1,12 1,19 1,26	1,5 1,5 1,5 1,5
4		0,5 1,0 2,0	1,40 1,28 1,18	1,12 1,20 1,31	2,0 2,0 2,0
5		—	1,47	1,47	2,0 (*а*) 3,0 (*б*)
6		0,25 0,5 1,0 2,0	1,47 1,47 1,47 1,47	1,04 1,07 1,12 1,19	3,0 3,0 3,0 3,0
7		—	1,26	1,26	1,5
8		—	1,6	1,47	3,0 (*а*) 1,0 (*б*)
9		0,5 1,0 2,0	1,6 1,6 1,6	1,07 1,12 1,19	3,0 (*а*) 1,0 (*б*) 3,0 (*а*) 1,0 (*б*) 3,0 (*а*) 1,0 (*б*)

Примечания. 1. Если $M_y \neq 0$, $n = 1{,}5$ для всех типов сечений, кроме типа 5, *а*, для которого $n = 2$, и типа 5, *б*, для которого $n = 3$. 2. Для промежуточных значений A_f/A_w при определении коэффициентов допускается линейная интерполяция.

напряжений. Поэтому в сечениях, где действуют M, M_x и M_y, значения касательных напряжений ограничены: $\tau \leqslant 0{,}9R_s$ при изгибе в одной плоскости и $\tau \leqslant 0{,}5\ R_s$ при изгибе в двух плоскостях. Эти ограничения не распространяются на опорные сечения, где при $M = 0$, $M_x = 0$ и $M_y = 0$ касательные напряжения следует проверять по формуле

$$\tau = Q/\alpha h_w t_w \leqslant R_s\gamma_c. \qquad (9.41)$$

При $\tau \leqslant 0{,}5R_s$ влиянием касательных напряжений в сечении, где одновременно действуют изгибающий момент M и перерезывающая сила Q, на развитие пластических деформаций можно пренебречь, и поэтому коэффициент $c_1 = c$. При $0{,}5\ R_s < \tau \leqslant 0{,}9\ R_s$

$$c_1 = 1{,}05\beta c = 1{,}05c\sqrt{1 - (\tau/R_s)^2/(1 - \alpha\,(\tau/R_s)^2)}, \quad (9.42)$$

где α — коэффициент, равный 0,7 для двутаврового сечения, изгибаемого в плоскости стенки, и 0 — для других типов сечения; τ — касательное напряжение, определяемое по формуле (9.41) исходя из размеров стенки t_w и h_w.

При наличии зоны чистого изгиба в формулах (9.39) и (9.40) вместо коэффициентов c_1, c_x и c_y следует принимать соответственно $c_{1m} = 0{,}5\ (1 + c)$, $c_{xm} = 0{,}5(1 + c_x)$, $c_{ym} = 0{,}5\ (1 + c_y)$.

Коэффициенты c (c_x) и c_y следует принимать по табл. 9.15 в зависимости от формы сечения, его ориентации относительно плоскости изгиба и отношения площади полки A_f к площади стенки A_w.

Для компоновки оптимальных сечений балок при их расчете с учетом требований обеспечения общей и местной устойчивости, а также жесткости значения коэффициентов c_1, c_x и c_y в формулах (9.39) и (9.40) допускается принимать меньше значений, приведенных в табл. 9.15, но не менее 1,0.

В балках переменного сечения развитие пластических деформаций допускается только в одном сечении с наиболее неблагоприятным сочетанием M и Q. При динамических, вибрационных или подвижных нагрузках расчет на прочность балок из сталей с пределом текучести до 580 МПа по формулам (9.39) и (9.40) допускается при условии, что развитие пластических деформаций не препятствует требуемым условиям эксплуатации конструкции и оборудования.

Общая устойчивость балок, рассчитываемых с учетом развития пластических деформаций, считается обеспеченной при наличии на сжатом поясе сплошного жесткого настила, надежно связанного с балкой, либо при условии, что наибольшие значения отношений расчетной длины балки к ширине сжатого пояса меньше указанных в табл. 9.10 значений l_{ef}/b, уменьшенных умножением на коэффициент $\delta = 1 - 0{,}7\ (c_1 - 1)/(c - 1)$ $(1 < c_1 \leqslant c)$.

Учет развития пластических деформаций в балках моносимметричного сечения с менее развитым сжатым поясом возможен только при условии расположения на сжатом поясе сплошного настила.

В неразрезных и защемленных балках, материал которых работает за пределами упругости, расчет на прочность следует вести с учетом перераспределения (выравнивания) опорных и пролетных моментов при условии выполнения следующих требований: пролеты балки не должны различаться более чем на 20 %, балка имеет постоянное двутавровое сечение, нагружена статической нагрузкой, приложенной в плоскости наибольшей жесткости, общая и местная устойчивость обеспечена.

Расчетный изгибающий момент

$$M = \alpha M_{max}, \qquad (9.43)$$

где M_{max} — наибольший изгибающий момент в пролете или на опоре неразрезной балки, определяемый в предположении упругой работы стали; α — коэффициент перераспределения моментов,

$$\alpha = 0{,}5\,(1 + M_{ef}/M_{max}). \qquad (9.44)$$

Условный изгибающий момент M_{ef} в неразрезных балках со свободно опертыми концами равен большему из значений:

$$M_{ef} = \max\,\{M_1/(1 + a/l)\}; \qquad (9.45)$$

$$M_{ef} = 0{,}5M_2, \qquad (9.46)$$

где M_1 и M_2 — изгибающий момент, вычисленный, как для разрезной двухшарнирной балки соответственно в крайнем и промежуточном пролетах; a — расстояние от сечения, в котором действует M_1, до крайней опоры; l — длина крайнего пролета.

В однопролетных и неразрезных балках с защемленными концами M_{ef} следует вычислять по формуле (9.45) с использованием в качестве M_2 наибольшего из моментов, найденного, как в балках с шарнирами на опорах. В балке с одним защемленным и другим свободно опертым концами значение M_{ef} следует определять по формуле (9.45).

Используя расчетный изгибающий момент, найденный по формуле (9.43), расчет на прочность при изгибе в одной плоскости следует вести по формуле (9.39), а при изгибе в двух главных плоскостях — по формуле (9.40) с учетом перераспределения опорных и пролетных моментов в обеих плоскостях при $\tau \leqslant 0{,}5R_s$.

При определении коэффициента c_1 по формуле (9.42) расчетное значение поперечной силы Q следует принимать в месте действия M_{max}. Если максимальный момент возникает в пролете, то следует проверить и опорное сечение балки.

Проверка жесткости балок. Для обеспечения нормальных условий эксплуатации изгибаемых элементов по II группе предельных состояний необходимо, чтобы деформации (прогибы) конструкции, работающей в упругой стадии под воздействием нормативных нагрузок, не превышали предельных, приведенных в табл. 9.16.

Определение прогибов следует производить без учета возможных ослаблений сечения отверстиями для болтов. Для консольных балок пролет l при определении относительного прогиба следует принимать равным удвоенному вылету консоли. Для балок перекрытий, имеющих подвесной потолок, а также при наличии штукатурки прогиб следует определять только от кратковременных нагрузок, причем в последнем случае предельный относительный прогиб равен 1/350.

В конструкциях с предусмотренным при изготовлении строительным подъемом вертикальный прогиб равен разности значений полного прогиба и строительного подъема.

Прогибы перекрытий и покрытий при наличии перегородок под ними не должны превышать расстояния (зазора) между нижней поверхностью несущих элементов и верхом перегородок (витражей, оконных и дверных коробок). Этот зазор в свою очередь не должен превышать 40 мм.

При наличии подвесных крановых путей прогибы стропильных конструкций, ограниченные по п. 2 в табл. 9.16, определяют как разность между прогибами конструкций, смежных с рассматриваемой.

Прокатные балки. Подбор сечений прокатных балок сводится к определению требуемых геометрических характеристик сечения и выбору по соответствующему сортаменту номера профиля. Требуемый момент сопротивления следует определять исходя из формул (9.25) или (9.39), а требуемый момент инерции (по условию обеспечения необходимой жесткости балки) — из формулы $J_{тр} = \dfrac{M_n l}{9{,}6E}\,[l/f]$, где M_n — момент в балке от нормативных нагрузок; $[l/f]$ — предельный относительный прогиб, найденный по табл. 9.16.

Сварные составные балки. Подбор сечений составных балок заключается в определении размеров листов исходя из требуемых геометрических характеристик сечения $W_{тр}$ и $J_{тр}$. Высота сечения должна отвечать условиям, соответствующим минимальным затратам металла при обеспечении необходимой несущей способности, а также обеспечивать требуемую жесткость балки. Сварные швы, соединяющие стенку с полками балки, должны воспринимать сдвигающую силу, которая возникает на краю стенки. Значение сдвигающей силы, действующей на 1 см длины сварных швов, определяется приведением касательных напряжений, равномерно

Таблица 9.16. **Предельные относительные прогибы элементов**

№ п/п	Элементы конструкций	Относительные прогибы f_u	Нагрузки для определения вертикальных прогибов
1	Балки крановых путей под мостовые и подвесные краны, управляемые:		
	с пола, в том числе тельферы (тали)	$l/250$	От одного крана
	из кабины при группах режима работы (по ГОСТ 25546—82)		
	1К—6К	$l/400$	То же
	7К	$l/500$	»
	8К	$l/600$	»
2	Балки, фермы, ригели, прогоны, настилы (включая поперечные ребра настилов) покрытий и перекрытий:		
	а) открытых для обзора, при пролете l, м:		
	1	$l/120$	Постоянные и временные длительные
	3	$l/150$	То же
	6	$l/200$	»
	24 (12)	$l/250$	»
	36 (24)	$l/300$	»
	б) при наличии на них элементов, подверженных растрескиванию (стяжек, полов, перегородок)	$l/150$	Действующие после выполнения стяжек, полов, перегородок
	в) при наличии тельферов (талей), подвесных кранов, управляемых (меньшее из двух):		
	с пола	$l/300$ или $a/150$	Временные с учетом нагрузки одного кана на одном пути
	из кабины	$l/400$ или $a/200$	От одного крана на одном пути
	г) подверженных действию:		
	подвижных нагрузок, в том числе при безрельсовом напольном транспорте	$l/350$	0,7 временных нагрузок или от одного погрузчика (более неблагоприятное из двух)
	нагрузок от рельсового транспорта:		
	узкоколейного	$l/400$	От одного состава вагонов на одном
	ширококолейного	$l/500$	пути
3	Элементы лестниц (марши, площадки, косоуры), балконов лоджий	То же, что в п. 2а	
4	Плиты перекрытий, лестничные марши и площадки, прогибу которых не препятствуют смежные элементы	0,7 мм	Сосредоточенная нагрузка 1 кН в середине пролета
5	Перемычки и навесные стеновые панели над проемами (ригели и прогоны остекления)	$l/200$	Приводящие к уменьшению зазора между несущими элементами и оконным или дверным заполнением, расположенным под ними

Примечание. 1. В п. 2а цифры, указанные в скобках, следует принимать при высоте помещений до 6 м включительно. 2. В п. 2в a — шаг балок или ферм, к которым крепятся подвесные крановые пути.

распределенных по толщине стенки, к сосредоточенному усилию:

$$T = \tau t_w = QS_f/J, \qquad (9.47)$$

где S_f — статический момент брутто пояса балки относительно нейтральной оси.

Пояса, как правило, крепятся к стенке двухсторонними швами. Односторонние швы применяют только для балок, несущих статическую нагрузку, приложенную симметрично относительно поперечного сечения, при наличии поперечных ребер в местах приложения сосредоточенных сил. Общая устойчивость при этом должна быть обеспечена непрерывным прикреплением по всей длине балки жесткого настила. В балках, материал которых работает за пределами упругости, односторонние швы применять не следует.

При отсутствии ребер жесткости под сосредоточенными силами, а также при приложении сосредоточенной нагрузки к нижнему поясу двухсторонние сварные швы следует рассчитывать по формуле

$$\sqrt{T^2 + V^2}/2\beta_f k_f \leqslant R_{wf}\gamma_{wf}\gamma_c, \qquad (9.48)$$

где V — давление от сосредоточенного груза F, определяемого по формуле (9.28).

Опорные ребра выполняют в торце балок с применением строжки (рис. 9.6, *а*) либо со смещением от торца с плотной пригонкой или приваркой к нижнему поясу (рис. 9.6, *б*). Напряжения в торцах ребер от действия опорной реакции не должны превышать расчетного сопротивления смятию R_p либо, если в торцевом ребре $a > 1{,}5t_p$, — расчетного сопротивления сжатию R_y. Если опорные ребра приварены к нижнему поясу балки, то сварные швы также должны быть рассчитаны на действие опорной реакции.

Опорные ребра следует проверять на устойчивость из плоскости балки, как стойки, нагруженные опорной реакцией, по формуле (9.11). Условная стойка имеет расчетную длину, равную высоте стенки балки, и сечение, состоящее из ребер и примыкающих к ним с каждой стороны участков стенки длиной по $0{,}65t_w\sqrt{E/R_y}$.

Балки с гибкой стенкой. Изгибаемые элементы, несущая способность которых определяется с учетом работы стенки после потери ею устойчивости, относятся к балкам с гибкой стенкой. Их применение допускается при статических нагрузках, вызывающих в плоскости стенки изгиб. Балки с гибкой стенкой должны иметь симметричное двутавровое сечение и быть выполненными из стали с пределом текучести до 430 МПа.

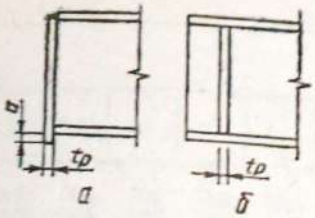


Рис. 9.6. Опорные ребра балок:
а — торцевое; *б* — смещенное от торца.

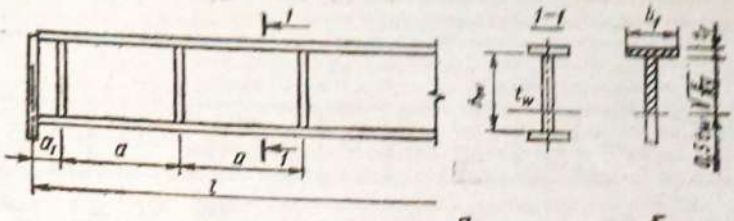


Рис. 9.7. Балка с гибкой стенкой:
а — схема; *б* — условное тавровое сечение, состоящее из сжатого пояса и участка стенки высотой $0,5t_w\sqrt{t/R_y}$.

Прочность разрезных балок с условной гибкостью стенки $6 \leqslant \bar{\lambda}_w \leqslant 13$ при наличии поперечных ребер жесткости (рис. 9.7) следует проверять по формуле

$$(M/M_u)^4 + (Q/Q_u)^4 \leqslant 1, \qquad (9.49)$$

где M и Q — момент и перерезывающая сила в рассматриваемом сечении балки.

Предельный изгибающий момент, воспринимаемый сечением балки,

$$M_u = R_y t_w h_w^2 \left[\frac{A_f}{t_w} h_w + \frac{0,85}{\bar{\lambda}_w} \left(1 - \frac{1}{\bar{\lambda}_w} \right) \right], \qquad (9.50)$$

а предельная перерезывающая сила

$$Q_u = R_s t_w h_w \left[\tau_{cr}/R_s + 3,3 \left(1 - \tau_{cr}/R_s \right) \frac{\beta\mu}{1+\mu^2} \right]; \qquad (9.51)$$

$$\tau_{cr} = 10,3 \left(1 + 0,76/\mu^2 \right) R_s/\bar{\lambda}_{ef}^2, \quad \bar{\lambda}_{ef} = \frac{d}{t_w}\sqrt{R_y/E}. \qquad (9.52)$$

Здесь τ_{cr} — критическое напряжение; μ — отношение большей к меньшей стороне пластинки, образованной поперечными ребрами и поясами балок; d — меньшая из сторон пластинки (h_w или a).

Коэффициент β зависит от параметра α: $\beta = 0,05 + 5\alpha \geqslant 0,15$, если $\alpha \leqslant 0,03$; $\beta = 0,11 + 3\alpha \leqslant 0,4$, если $0,03 < \alpha \leqslant 0,01$. Параметр α равен $\alpha = 8W_{min}(h^2 + a^2)/t_w h_w^2 a^2$, где W_{min} — минимальный момент сопротивления таврового сечения, состоящего из сжатого пояса балки и примыкающего к нему участка стенки высотой $0,5t_w\sqrt{E/R_y}$, относительно собственной оси тавра, параллельной поясу балки.

Двухсторонние поперечные ребра жесткости должны быть рассчитаны на устойчивость при центральном сжатии, а односторонние — на внецентренное сжатие с эксцентриситетом, равным расстоянию от оси стенки до центра тяжести расчетного сечения стержня, в состав которого помимо ребер включается участок стенки длиной $0,65t_w\sqrt{E/R_y}$ с каждой стороны ребра. Сжимающая сила

$$N = 3,3R_s t_w h_w \left(1 - \tau_{cr}/R_s \right)\beta\mu/\left(1 - \mu^2 \right). \qquad (9.53)$$

Расчетная длина сжатых стержней

$$l_{ef} = h_w (1 - \beta) \geqslant 0,7h_w.$$

Над опорой балку следует укреплять опорным ребром и на расстоянии не более $a_1 = 1,3t_w\sqrt{E/R_y}$ от него устанавливать дополнительное двухстороннее ребро жесткости.

Общая устойчивость балок считается обеспеченной при наличии сплошного настила, связанного со сжатым поясом, либо при расчетной длине $l_{ef} \leqslant 0,21b_f\sqrt{E/R_y}$. Проверка местного напряжения выполняется по формуле (9.28), при этом $\sigma_{loc} \leqslant 0,75R_y$.

При действии приложенной симметрично относительно плоскости стенки равномерно распределенной нагрузки или при числе сосредоточенных одинаковых нагрузок не менее пяти, расположенных на равном расстоянии друг от друга и от опор, балку с условной гибкостью стенки $7 \leqslant \bar{\lambda}_w \leqslant 13,0$ допускается не укреплять ребрами жесткости. Прочность таких балок следует проверять по формуле

$$M \leqslant R_y t_w h_w^2 \left[\frac{A_f}{t_w} h_w + \frac{1,4}{\bar{\lambda}_w} \left(1 - 1/\bar{\lambda}_w \right) \right] \delta, \qquad (9.54)$$

где δ — коэффициент, учитывающий влияние поперечной силы на несущую способность балки:

$$\delta = 1 - 5,6 \frac{A_f h_w}{A_w} l; \qquad (9.55)$$

при этом $0,025 \leqslant A_f h_w/A_w l \leqslant 0,1$, $t_f \geqslant 0,3\bar{\lambda}_w t_w$.

Определение прогиба балок с гибкой стенкой выполняют по известным формулам с уменьшением момента инерции сечения брутто на коэффициент $\alpha < 1$: для балок с ребрами жесткости $\alpha = 1,2 - 0,033\bar{\lambda}_w$, а при их отсутствии в пролете $\alpha = 1,2 - 0,033\bar{\lambda}_w - h_w/l$.

Балки с перфорированной стенкой получают разрезкой исходного прокатного двутавра по зигзагообразной линии и последующей сваркой обеих половинок выступающими частями вместе стыковым швом с полным проваром (рис. 9.8).

Балки могут быть выполнены моно- или бистальными, симметричного или несимметричного сечения. Применяемая сталь должна иметь предел текучести не выше 580 МПа.

Расчет на прочность балок, изгибаемых в плоскости стенки, ведут для ослабленных сечений. Нормальные напряжения в наиболее напряженных точках равны: в точке 1

$$Mh_1/J_x + Q_1 a/2W_{1\,max} \leqslant R_{y1}\gamma_c; \qquad (9.56)$$

в точке 2

$$Md_1/J_x + Q_1 a/2W_{1\,min} \leqslant R_{u1}\gamma_c/\gamma_u; \qquad (9.57)$$

в точке 3

$$Mh_2/J_x + Q_2 a/2W_{2\,max} \leqslant R_{y2}\gamma_c; \qquad (9.58)$$

в точке 4

$$Md_2/J_x + Q_2 a/2W_{2\,min} \leqslant R_{u2}\gamma_c/\gamma_u, \qquad (9.59)$$

где M — изгибающий момент в сечении балки, в котором расположена рассматриваемая точка; $Q_1 = QJ_1/(J_1 + J_2)$ и $Q_2 = QJ_2/(J_1 + J_2)$ — поперечные силы, воспринимаемые верхним и нижним тавровыми сечениями; Q — поперечная сила в рассматриваемом сечении; J_1 и J_2 — моменты инерции верхнего и нижнего тавровых сечений относительно собственных осей, параллельных полкам; J_x — момент инерции сечения с отверстием относительно оси x—x; W_{1max} и W_{1min}; W_{2max} и W_{2min} — максимальные и минимальные моменты сопротивления соответственно верхнего и нижнего тавровых сечений; R_{y1} и R_{u1}, R_{y2} и R_{u2} — расчетные сопротивления проката для верхнего и нижнего тавровых сечений.

Касательные напряжения в сечении балки на расстоянии $(c + 5 - 0,5a)$ от опоры

$$\tau = Q_3 S/tah_3 \leqslant R_y\gamma_c, \qquad (9.60)$$

где Q_3 — поперечная сила в рассматриваемом сечении; t — меньшая толщина стенки.

Устойчивость балок следует проверять по формуле (9.32) с вычислением геометрических характеристик для сечения

Таблица 9.17. Значения коэффициента φ_e для проверки устойчивости внецентренно-сжатых (сжато-изгибаемых) сплошностенчатых стержней двутаврового сечения при изгибе в плоскости, совпадающей с плоскостью симметрии

$\bar{\lambda} = \lambda\sqrt{R_y/E}$	m_{ef}																
	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
0,5	967	922	850	782	722	669	620	577	538	469	417	370	337	307	280	260	237
1,0	925	854	778	711	653	600	563	520	484	427	382	341	307	283	259	240	225
1,5	875	804	716	647	593	548	507	470	439	388	347	312	283	262	240	223	207
2,0	813	742	653	587	536	496	457	425	397	352	315	286	260	240	222	206	193
2,5	742	672	587	526	480	442	410	383	357	317	287	262	238	220	204	190	178
3,0	667	597	520	465	425	395	365	342	320	287	260	238	217	202	187	175	166
3,5	587	522	455	408	375	350	325	303	287	258	233	216	198	183	172	162	153
4,0	505	447	394	356	330	309	289	270	256	232	212	197	181	168	158	149	140
4,5	418	382	342	310	288	272	257	242	229	208	192	178	165	155	146	137	130
5,0	354	326	295	273	253	239	225	215	205	188	175	162	150	143	135	126	120
5,5	302	280	256	240	224	212	200	192	184	170	158	148	138	132	124	117	112
6,0	258	244	223	210	198	190	178	172	166	153	145	137	128	120	115	109	104
6,5	223	213	196	185	176	170	160	155	149	140	132	125	117	112	106	101	097
7,0	194	186	173	163	157	152	145	141	136	127	121	115	108	102	098	094	091
8,0	152	146	138	133	128	121	117	115	113	106	100	095	091	087	083	081	078
9,0	122	117	112	107	103	100	098	096	093	088	085	082	079	075	072	069	066
10,0	100	097	093	091	090	085	081	080	079	075	072	070	069	065	062	060	059
11,0	083	079	077	076	075	073	071	069	068	063	062	061	060	057	055	053	052
12,0	069	067	064	063	062	060	059	059	058	055	054	053	052	051	050	049	048
13,0	062	061	054	053	052	051	051	050	049	049	048	048	047	045	044	043	042
14,0	052	049	049	048	048	047	047	046	045	044	043	043	042	041	040	040	039

Примечания. 1. Значения коэффициентов φ_e увеличены в 1000 раз. 2. Значения φ_e принимать не выше значений φ.

с отверстием. Устойчивость считается обеспеченной при наличии сплошного настила на сжатом поясе либо при соблюдении условия $l_{ef}/b \leqslant [l_{ef}/b]$.

Прогиб балок с отношением $l/h_{ef} \geqslant 12$ следует определять, умножая момент инерции сечения с отверстием на коэффициент 0,95.

9.2.3. Элементы, подверженные действию осевой силы с изгибом

Расчет на прочность. Прочность внецентренно-сжатых сжато-изгибаемых, внецентренно-растянутых и растянуто-изгибаемых элементов сплошного сечения, работающих в пределах упругости, проверяют по формуле

$$\sigma = N/A \pm M_x y/J_{xn} \pm M_y/J_{yn} \leqslant R_y\gamma_c. \qquad (9.61)$$

Для элементов из стали с пределом текучести до 580 МПа при отсутствии непосредственного воздействия динамических нагрузок, а также при $\tau \leqslant 0{,}5R_y$ и $N/(A_nR_y) > 0{,}1$ расчет на прочность следует выполнять с учетом работы материала за пределами упругости:

$$\sigma = \left(\frac{N}{A_nR_y\gamma_c}\right)^n + \frac{M_x}{c_xW_{xn\,\min}R_y\gamma_c} + \frac{M_y}{c_yW_{yn\,\min}R_y\gamma_c} \leqslant 1. \qquad (9.62)$$

Здесь N, M_x и M_y — абсолютные значения соответственно продольной силы и изгибающих моментов при неблагоприятном их сочетании; n, c_x и c_y — коэффициенты, принимаемые по табл. 9.15.

При $N/(A_nR_y) \leqslant 0{,}1$ расчет по формуле (9.62) можно применять при условии обеспечения местной устойчивости стенок и полок сечения, как в балках, рассчитываемых с учетом развития пластических деформаций.

Расчет по формулам (9.61) или (9.62) не требуется, если значение приведенного относительного эксцентриситета для сплошного сечения $m_{ef} \leqslant 20$, в сечении отсутствуют ослабления и изгибающие моменты в расчетах на прочность и устойчивость приняты одинаковыми. Для сквозных сечений прочность каждой ветви проверяют на приведенное усилие, как для центрально-сжатого элемента, по формуле (9.9).

Внецентренно-сжатые элементы, выполненные из стали с пределом текучести свыше 580 МПа и имеющие резко несимметричные сечения (типа 10 и 11 по табл. 9.18), должны быть проверены на прочность по формуле

$$\sigma = |N/A_n - M/\delta W_{nt}| \leqslant R_u\gamma_c/\gamma_u, \qquad (9.63)$$

где W_{nt} — момент сопротивления сечения, найденный для растянутого волокна; $\delta = 1 - N\lambda^2/(\pi^2EA)$.

Расчет на устойчивость в плоскости действия момента. Внецентренно-сжатые и сжато-изгибаемые элементы могут терять устойчивость как в плоскости действия моментов (плос-

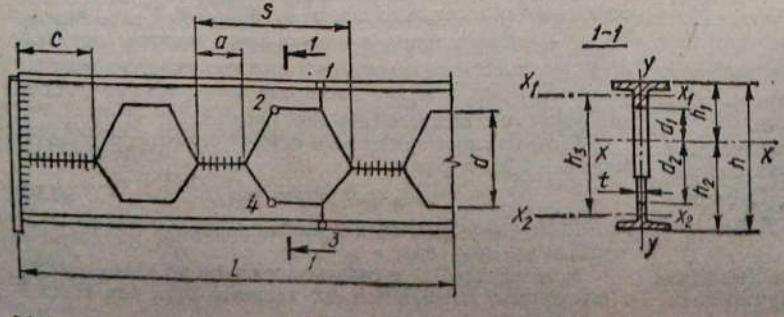


Рис. 9.8. Участок балки с перфорированной стенкой.

постенчатых стержней в плоскости действия момента,

6,5	7,0	8,0	9,0	10	12	14	17	20
222	210	183	164	150	125	106	090	077
209	196	175	157	142	121	103	086	074
195	182	163	148	134	114	099	082	070
182	170	153	138	125	107	094	079	067
168	158	144	130	118	101	090	076	065
156	147	135	123	112	097	086	073	063
145	137	125	115	106	092	082	069	060
135	127	118	108	098	088	078	066	057
125	118	110	101	093	083	075	064	055
117	111	103	095	088	079	072	062	053
108	104	095	089	084	075	069	060	051
100	096	089	084	079	072	066	057	049
094	089	083	080	074	068	062	054	047
087	083	078	074	070	064	059	052	045
076	074	068	065	062	057	053	047	041
065	064	061	058	055	051	048	043	038
058	057	055	052	049	046	043	039	035
051	050	048	046	044	040	038	035	032
047	046	044	042	040	037	035	032	029
041	041	039	038	037	035	033	030	027
039	038	037	036	036	034	032	029	026

кая форма потери устойчивости), так и из плоскости действия момента (изгибно-крутильная форма потери устойчивости), поэтому проверку устойчивости необходимо выполнять в обеих плоскостях, кроме случаев, когда $m_{ef} > 20$ для сплошностенчатых стержней и $m > 20$ для сквозных стержней (такие стержни следует проверять, как изгибаемые элементы).

Расчет на устойчивость в плоскости действия моментов, совпадающей с плоскостью симметрии сплошного или сквозного сечения, выполняют по формуле

$$\sigma = N/\varphi_e A \leqslant R_y \gamma_c. \qquad (9.64)$$

Для сплошностенчатых стержней коэффициент φ_e (табл. 9.17) зависит от условной гибкости $\bar{\lambda}$ ($\bar{\lambda} = \lambda\sqrt{R_y/E}$) и приведенного относительного эксцентриситета

$$m_{ef} = \eta m = \eta e A/W_c, \qquad (9.65)$$

где η — коэффициент влияния формы сечения (табл. 9.18); m — относительный эксцентриситет; $e = M/N$ — эксцентриситет; W_c — момент сопротивления сечения, найденный для наиболее сжатого волокна.

Для сквозных стержней с соединительной решеткой, расположенной в плоскостях, параллельных плоскости изгиба, коэффициент φ_e определяют по табл. 9.19 в зависимости от условной приведенной гибкости $\bar{\lambda}_{ef}$ ($\bar{\lambda}_{ef} = \lambda_{ef}\sqrt{R_y/E}$) (см. табл. 9.9) и относительного эксцентриситета

$$m = eAa/J, \qquad (9.66)$$

где a — расстояние от главной оси сечения, перпендикулярной к плоскости изгиба, до оси наиболее сжатой ветви, но не менее расстояния до оси стенки.

При определении эксцентриситета e расчетные значения продольной силы N и изгибающего момента M необходимо принимать для одного и того же сочетания нагрузок, найденного из расчета системы по недеформированной схеме в предположении упругой работы стали. Для колонн постоянного сечения, входящих в состав рам, в качестве M следует принимать наибольший момент в пределах длины колонны, а для ступенчатых колонн — в пределах длины участка постоянного сечения. Для колонн с одним защемленным, а другим свободным концом значение M следует принимать равным моменту в заделке, но не менее момента в сечении, удаленном на треть длины колонны от заделки. Сжатые пояса ферм и структурных конструкций, загруженные внеузловой нагрузкой, следует рассматривать при расчете как упругие неразрезные балки и в качестве M принимать наибольший момент в пределах средней трети длины панели пояса.

Выбор момента M для сжатых стержней с шарнирно опертыми концами и сечениями, имеющими одну ось симметрии, совпадающую с плоскостью изгиба, зависит от значений условной гибкости стержня $\bar{\lambda}$ и относительного эксцентриситета m, соответствующего наибольшему изгибающему моменту M_{max} в пределах длины элемента. Расчетный момент M для определения эксцентриситета e равен: при $m = M_{max}A/NW_c \leqslant 3$ и $\bar{\lambda} < 4$ $M = M_2 = M_{max} - (\bar{\lambda}/4)(M_{max} - M_1) \geqslant 0{,}5M_{max}$, где M_1 — наибольший изгибающий момент в пределах средней трети длины стержня, но не менее $0{,}5M_{max}$; при $m \leqslant 3$ и $\bar{\lambda} \geqslant 4$ $M = M_1 \geqslant 0{,}5M_{max}$; при $3 < m \leqslant 20$ и $\bar{\lambda} < 4$ $M = M_2 + \frac{m-3}{17}(M_{max} - M_2) \geqslant 0{,}5\ M_{max}$; при $3 < m \leqslant 20$ и $\bar{\lambda} \geqslant 4$ $M = M_1 + \frac{m-3}{17}(M_{max} - M_1) \geqslant 0{,}5M_{max}$.

Для сжатых стержней с шарнирно опертыми концами и сечениями, имеющими две оси симметрии, на концах которых действуют моменты M_1 и M_2 (причем $M_1 > M_2$), приведенные относительные эксцентриситеты следует определять по табл. 9.20 в зависимости от отношения концевых моментов δ ($\delta = M_2/M_1$), условной гибкости $\bar{\lambda}$ и приведенного относительного эксцентриситета m_{ef1}, найденного по максимальному моменту M_1: $m_{ef1} = \eta\frac{M_1}{N}\frac{A}{W_c}$.

Внецентренно-сжатые и сжато-изгибаемые элементы сквозного сечения с соединительной решеткой, расположенной в плоскостях, параллельных плоскости изгиба, помимо расчета по формуле (9.64), как стержня цельного сечения, необходимо проверить на устойчивость каждой ветви в плоскости действия момента. Каждую ветвь следует проверять, как центрально-сжатый стержень по формуле (9.10) на действие приведенной продольной силы, найденной с учетом дополнительного усилия N_{ad} от момента. Усилия N_{ad} для сечений, приведенных в табл. 9.9, при изгибе в плоскости, перпендикулярной оси y—y, равны: M/b — для сечений типов 1 и 3; $M/2b$ — для сечения типа 2. При действии момента в плоскости, перпендикулярной оси x—x (для сечения типа 3), $N_{ad} = 1{,}16\ M/b$, где b — расстояние между осями ветвей.

В стержнях с планками устойчивость отдельных ветвей проверяют, как для внецентренно-сжатых элементов, с учетом усилий от момента и местного изгиба ветвей от фактической или условной поперечной силы.

Расчет на устойчивость из плоскости действия момента. Расчет на устойчивость внецентренно-сжатых стержней из плоскости действия момента выполняют только для сплошностенчатых элементов, так как устойчивость сквозных стержней из плоскости обеспечивается устойчивостью каждой ветви, как для центрально-сжатых стержней, по формуле (9.10). При действии момента в плоскости наибольшей жесткости ($J_x > J_y$ и $e_y = 0$), совпадающей с плоскостью симметрии, проверку устойчивости стержня постоянного сечения из плоскости выполняют по формуле

$$\sigma = N/c\varphi_y A \leqslant R_y\gamma_c, \qquad (9.67)$$

где φ_y — коэффициент продольного изгиба, принимаемый по значению гибкости λ_y согласно требованиям, изложенным в п. 9.21. Коэффициент c равен: при $m_x \leqslant 5$

$$c = \frac{\beta}{1 + \alpha m_x}; \qquad (9.68)$$

при $m_x \geqslant 10$

$$c = \frac{1}{1 + m_x\varphi_y/\varphi_b}; \qquad (9.69)$$

при $5 < m_x < 10$

$$c = c_5 (2 - 0{,}2m_x) + c_{10} (0{,}2m_x - 1), \qquad (9.70)$$

где φ_b — коэффициент, определяемый согласно требованиям п. 9.2.2 как для балки с двумя и более закреплениями сжатого пояса (для замкнутых сечений $\varphi_b = 1{,}0$); c_5 и c_{10} — коэффициенты, определяемые соответственно по формулам (9.68) и (9.69) при $m_x = 5$ и $m_x = 10$.

Значения коэффициентов α и β в зависимости от типа сечения, относительного эксцентриситета m_x и гибкости стержня $\bar{\lambda}_y$ приведены в табл. 9.21. В качестве J_1 и J_2 при этом следует принимать моменты инерции соответственно большей и меньшей полок относительно оси симметрии сечения y—y.

Коэффициент φ_c равен φ_y при $\lambda_y = \lambda_c = 3{,}14\sqrt{\dfrac{E}{R}}$. Сечения сквозных стержней с планками или решетками можно рассматривать как замкнутые при наличии не менее двух диафрагм по длине элемента. В противном случае коэффициенты α и β следует определять, как для открытого двутаврового сечения.

Относительный эксцентриситет m_x следует определять с использованием момента M_x, равного: для стержней с шарнирно опертыми концами, закрепленными от смещения перпендикулярно к плоскости действия момента,— максимальному моменту в пределах средней трети длины, но не менее половины наибольшего по длине стержня момента; для стержней с одним защемленным, а другим свободным концом — моменту в заделке, но не менее момента в сечении, удаленном от заделки на треть длины стержня.

Если гибкость стержня $\bar{\lambda}_y > \bar{\lambda}_c = 3{,}14\sqrt{E/R}$, то значения коэффициента c, полученные по формулам (9.68) — (9.70), не должны превышать максимального значения c_{max}, найденного в зависимости от типа сечения стержня. Для стержней замкнутого сечения $c_{max} = 1$, двутаврового с двумя осями симметрии

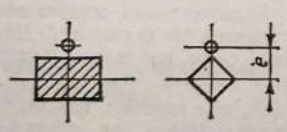
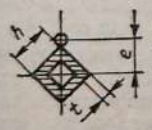
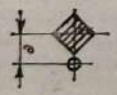
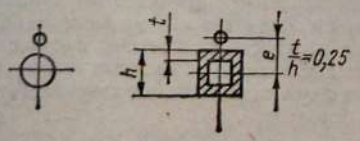
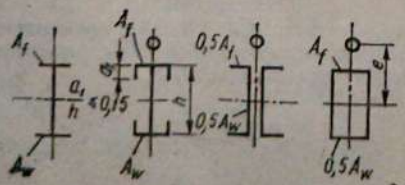
$$c_{max} = \frac{2}{1 + \delta + \sqrt{(1-\delta)^2 + 16/\mu\,(M_x/Nh)^2}}, \qquad (9.71)$$

где $\delta = 4\rho/\mu$, $\rho = (J_x + J_y)/Ah^2$; $\mu = 2 + 0{,}156 J_t \bar{\lambda}_y^2/Ah^2$; $J_t = 0{,}433 \Sigma b_i t_i^3$; b_i и t_i — соответственно ширина и толщина листов, образующих сечение; h — расстояние между осями поясов.

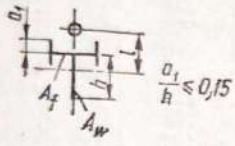
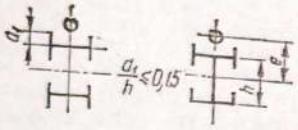
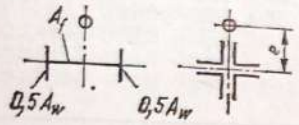
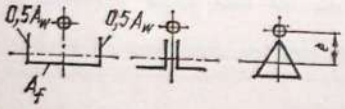
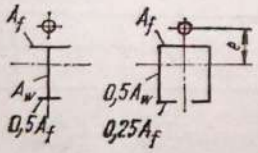
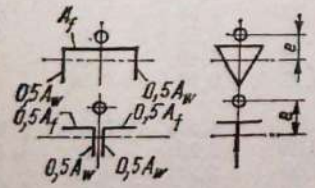
Для двутавровых сечений с одной осью симметрии (рис. 9.5, *б*)

$$c_{max} = 2\Big/\left(1 + \delta B \sqrt{(1-\delta B)^2 + \frac{16}{\mu}\left(\alpha_x - \frac{e_x}{h}\right)^2}\right);$$
$$\alpha_x = (h_1 J_1 - h_2 J_2)/J_y h;$$
$$\mu = 8 J_1 J_2 / J_y^2 + 0{,}156 J_t \bar{\lambda}_y^2 / Ah^2;$$
$$B = 1 + \frac{2\beta}{\rho}\,\frac{e_x}{h}; \quad \rho = \frac{J_x + J_y}{Ah^2} + \alpha_x^2. \qquad (9.72)$$

Таблица 9.18. **Значения коэффициента влияния формы сечения**

Тип сечения	Схема сечения	$\frac{A_f}{A_w}$	η			
			$0 \leqslant \bar{\lambda} \leqslant 5$		$\bar{\lambda} > 5$	
			$0{,}1 \leqslant m \leqslant 5$	$5 < m \leqslant 20$	$0{,}1 \leqslant m \leqslant 5$	$5 < m \leqslant 20$
1		—	1,0	1,0	1,0	
2		—	0,85	0,85	0,85	
3		—	$0{,}75+0{,}02\bar{\lambda}$	$0{,}75+0{,}02\bar{\lambda}$	0,85	
4		—	$(1{,}35-0{,}05m)-0{,}01\,(5-m)\bar{\lambda}$	1,1	1,1	
5		0,25	$(1{,}45-0{,}05m)-0{,}01\,(5-m)\bar{\lambda}$	1,2	1,2	
		0,5	$(1{,}75-0{,}1m)-0{,}02\,(5-m)\bar{\lambda}$	1,25	1,25	
		Не менее 1,0	$(1{,}9-0{,}1m)-0{,}02\,(6-m)\bar{\lambda}$	$1{,}4-0{,}02\bar{\lambda}$	1,3	

Продолжение табл. 9.18

Тип сечения	Схема сечения	$\frac{A_f}{A_w}$	η			
			$0 \leqslant \bar{\lambda} \leqslant 5$		$\bar{\lambda} > 5$	
			$0{,}1 \leqslant m \leqslant 5$	$5 < m \leqslant 20$	$0{,}1 \leqslant m \leqslant 5$	$5 \leqslant m \leqslant 20$
6	 $\frac{a_1}{h} \leqslant 0{,}15$	—	$\eta_5\,[1-0{,}3\,(5-m)\frac{a_1}{h}]$	η_5	η_5	
7	 $\frac{a_1}{h} \leqslant 0{,}15$	—	$\eta_5\,(1-0{,}8\frac{a_1}{h})$	$\eta_5\,(1-0{,}8\frac{a_1}{h})$	$\eta_5\,(1-0{,}8\frac{a_1}{h})$	
		0,25	$(0{,}75+0{,}05m)+0{,}01\,(5-m)\bar{\lambda}$	1,0	1,0	
8	 $0{,}5A_w$ $0{,}5A_w$	0,5	$(0{,}5+0{,}1m)+0{,}02\,(5-m)\bar{\lambda}$	1,0	1,0	
		Не менее 1,0	$(0{,}25+0{,}15m)+0{,}03\,(5-m)\bar{\lambda}$	1,0	1,0	
9	 $0{,}5A_w$ $0{,}5A_w$ A_f	0,5	$(1{,}25-0{,}05m)-0{,}01\,(5-m)\bar{\lambda}$	1,0	1,0	
		Не менее 1,0	$(1{,}5-0{,}1m)-0{,}02\,(5-m)\bar{\lambda}$	1,0	1,0	
10	 A_f A_w $0{,}5A_f$ A_f $0{,}5A_w$ $0{,}25A_f$	0,5	1,4	1,4	1,4	1,4
		1,0	$1{,}6-0{,}01\,(5-m)\bar{\lambda}$	1,6	$1{,}35+0{,}05m$	1,6
		2,0	$1{,}8-0{,}02\,(5-m)\bar{\lambda}$	1,8	$1{,}3+0{,}1m$	1,8
11	 A_f $0{,}5A_w$ $0{,}5A_f$ $0{,}5A_f$ $0{,}5A_w$ $0{,}5A_w$	0,5	$1{,}45+0{,}04m$	1,65	$1{,}45+0{,}04m$	1,65
		1,0	$1{,}8+0{,}12m$	2,4	$1{,}8+0{,}12m$	2,4
		1,5	$2{,}0+0{,}25m+0{,}1\bar{\lambda}$	—	—	—
		2,0	$3{,}0+0{,}25m+0{,}1\bar{\lambda}$	—	—	—

Примечания. 1. Для типов сечений 5—7 при определении A_f/A_w площадь вертикальных элементов полок не следует учитывать. 2. Для типов сечений 6—7 значения η_5 следует принимать равными значениям η для типа 5 при тех же значениях A_f/A_w.

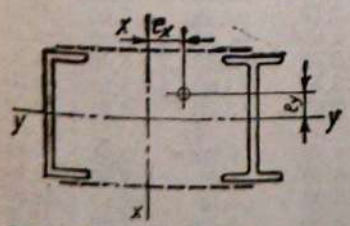


Рис. 9.9. Сквозное сечение стержня из двух ветвей.

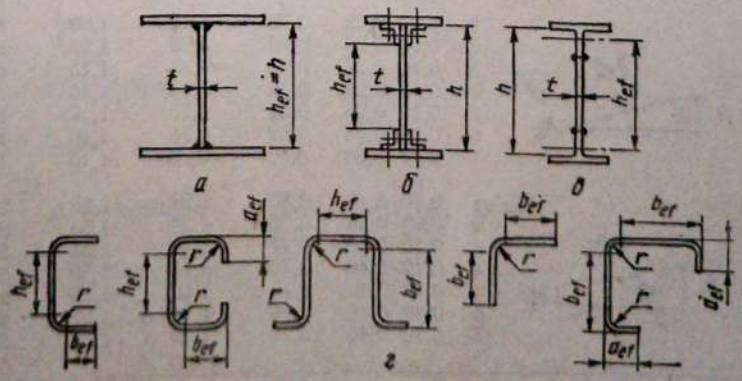


Рис. 9.10. Схемы поперечных сечений.

Таблица 9.19. Значения коэффициента φ_e для проверки устойчивости внецентренно-сжатых (сжато-изгибаемых) сквозящей с плоскостью симметрии

$\bar{\lambda}_{ef}$	m															
	0,1	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
0,5	908	800	666	571	500	444	400	364	333	286	250	222	200	182	167	154	143
1,0	872	762	640	553	483	431	387	351	328	280	243	218	197	180	165	151	142
1,5	830	727	600	517	454	407	367	336	311	271	240	211	190	178	163	149	137
2,0	774	673	556	479	423	381	346	318	293	255	228	202	183	170	156	143	132
2,5	708	608	507	439	391	354	322	297	274	238	215	192	175	162	148	136	127
3,0	637	545	455	399	356	324	296	275	255	222	201	182	165	153	138	130	121
3,5	562	480	402	355	320	294	270	251	235	206	187	170	155	143	130	123	115
4,0	484	422	357	317	288	264	246	228	215	191	173	160	145	133	124	118	110
4,5	415	365	315	281	258	237	223	207	196	176	160	149	136	124	116	110	105
5,0	350	315	277	250	230	212	201	186	178	161	149	138	127	117	108	104	100
5,5	300	273	245	223	203	192	182	172	163	147	137	128	118	110	102	098	095
6,0	255	237	216	198	183	174	165	156	149	135	126	119	109	103	097	093	090
6,5	221	208	190	178	165	157	149	142	137	124	117	109	102	097	092	088	085
7,0	192	184	168	160	150	141	135	130	125	114	108	101	095	091	087	083	079
8,0	148	142	136	130	123	118	113	108	105	097	091	085	082	079	077	073	070
9,0	117	114	110	107	102	098	094	090	087	082	079	075	072	069	067	064	062
10,0	097	094	091	090	087	084	080	076	073	070	067	064	062	060	058	056	054
11,0	082	078	077	076	073	071	068	066	064	060	058	056	054	053	052	050	048
12,0	068	066	064	063	061	060	058	057	056	054	053	050	049	048	047	045	043
13,0	060	059	054	053	052	051	050	049	049	048	047	046	045	044	044	042	041
14,0	050	049	048	047	046	046	045	044	043	043	042	042	041	041	040	039	039

Примечания. 1. Значения φ_e увеличены в 1000 раз. 2. Значения φ_e не должны быть выше значений φ.

Таблица 9.20. Приведенные относительные эксцентриситеты m_{ef} для стержней с шарнирно опертыми концами

$\delta=\frac{M_2}{M_1}$	$\bar{\lambda}$	m_{ef1}										
		0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	7,0	10,0	20,0
$\delta=-1,0$	1	0,10	0,30	0,68	1,12	1,60	2,62	3,55	4,55	6,50	9,40	19,40
	2	0,10	0,17	0,39	0,68	1,03	1,80	2,75	3,72	5,65	8,60	18,50
	3	0,10	0,10	0,22	0,36	0,55	1,17	1,95	2,77	4,60	7,40	17,20
	4	0,10	0,10	0,10	0,18	0,30	0,57	1,03	1,78	3,35	5,90	15,40
	5	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	0,23	0,48	0,95	2,18	4,40	13,40
	6	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	0,18	0,40	1,25	3,00	11,40
	7	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,50	1,70	9,50
$\delta=-0,5$	1	0,10	0,31	0,68	1,12	1,60	2,62	3,55	4,55	6,50	9,40	19,40
	2	0,10	0,22	0,46	0,73	1,05	1,88	2,75	3,72	5,65	8,60	18,50
	3	0,10	0,17	0,38	0,58	0,80	1,33	2,00	2,77	4,60	7,40	17,20
	4	0,10	0,14	0,32	0,49	0,66	1,05	1,52	2,22	3,50	5,90	15,40
	5	0,10	0,10	0,26	0,41	0,57	0,95	1,38	1,80	2,95	4,70	13,40
	6	0,10	0,16	0,28	0,40	0,52	0,95	1,25	1,60	2,50	4,00	11,50
	7	0,10	0,22	0,32	0,42	0,55	0,95	1,10	1,35	2,20	3,50	10,80
$\delta=0$	1	0,10	0,32	0,70	1,12	1,60	2,62	3,55	4,55	6,50	9,40	19,40
	2	0,10	0,28	0,60	0,90	1,28	1,96	2,75	3,72	5,65	8,40	18,50
	3	0,10	0,27	0,55	0,84	1,15	1,75	2,43	3,17	4,80	7,40	17,20
	4	0,10	0,26	0,52	0,78	1,10	1,60	2,20	2,83	4,00	6,30	15,40
	5	0,10	0,25	0,52	0,78	1,10	1,55	2,10	2,78	3,85	5,90	14,50
	6	0,10	0,28	0,52	0,78	1,10	1,55	2,00	2,70	3,80	5,60	13,80
	7	0,10	0,32	0,52	0,78	1,10	1,55	1,90	2,60	3,75	5,50	13,00
$\delta=0,5$	1	0,10	0,40	0,80	1,23	1,68	2,62	3,55	4,55	6,50	9,40	19,40
	2	0,10	0,40	0,78	1,20	1,60	2,30	3,15	4,10	5,85	8,60	18,50
	3	0,10	0,40	0,77	1,17	1,55	2,30	3,10	3,90	5,55	8,13	18,00
	4	0,10	0,40	0,75	1,13	1,55	2,30	3,05	3,80	5,30	7,60	17,50
	5	0,10	0,40	0,75	1,10	1,55	2,30	3,00	3,80	5,30	7,60	17,00
	6	0,10	0,40	0,75	1,10	1,50	2,30	3,00	3,80	5,30	7,60	16,50
	7	0,10	0,40	0,75	1,10	1,40	2,30	3,00	3,80	5,30	7,60	16,00

ных стержней в плоскости действия момента, совпадаю-

6,5	7,0	8,0	9,0	10	12	14	17	20
133	125	111	100	091	077	067	056	048
131	121	109	098	090	077	066	055	046
128	119	108	096	088	077	065	053	045
125	117	106	095	086	076	064	052	045
120	113	103	093	083	074	062	051	044
116	110	100	091	081	071	061	051	043
110	106	096	088	078	069	059	050	042
105	100	093	084	076	067	057	049	041
100	096	089	079	073	065	055	048	040
095	092	086	076	071	062	054	047	039
091	087	081	074	068	059	052	046	039
085	083	077	070	065	056	051	045	038
080	077	072	066	061	054	050	044	037
076	074	068	063	058	051	047	043	036
067	065	060	055	052	048	044	041	035
059	056	053	050	048	045	042	039	035
052	050	047	045	043	041	038	036	033
046	044	043	042	042	038	035	032	030
042	040	039	038	037	034	032	030	028
040	038	037	036	035	032	030	028	026
038	037	036	035	034	031	029	027	025

Значения J_1 и β следует определять по формулам (9.38) и (9.38а). Эксцентриситет приложения сжимающей силы e_x относительно оси x—x в формуле (9.72) необходимо подставлять со своим знаком (эксцентриситет положителен, если смещен к более развитому поясу).

Для тавровых сечений значение c_{max} следует определять по формуле (9.72), принимая $J_2 = 0$, а также $b_2 = 0$ и $t_2 = 0$ (рис. 9.5, *б*) при вычислении J_1.

Внецентренно-сжатые элементы при действии момента в плоскости наименьшей жесткости ($J_x > J_y$ и $e_y \neq 0$) при $\lambda_x > \lambda_y$ следует рассчитывать по формуле (9.64), а устойчивость из плоскости действия момента проверять, как для центрально-сжатых стержней:

$$\sigma = N/\varphi_x A \leqslant R_y \gamma_c. \qquad (9.73)$$

Расчет на устойчивость при действии момента в двух плоскостях. При действии моментов в двух главных плоскостях устойчивость сплошностенчатых сжатых стержней при совпадении плоскости наибольшей жесткости ($J_x > J_y$) с плоскостью симметрии следует проверять по формуле

$$\sigma = N/\varphi_{exy} A \leqslant R_y \gamma_c; \quad \varphi_{exy} = \varphi_{ey}\,(0{,}6\sqrt[3]{\bar{c}} + 0{,}4\sqrt[4]{\bar{c}}), \qquad (9.74)$$

где c — коэффициент, определяемый по формулам (9.68) — (9.70).

Коэффициент φ_e следует определять по табл. 9.17 в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{E/R}$ и приведенного относительного эксцентриситета

$$m_{ef\cdot y} = \eta e_y A/W_{cy}, \qquad (9.75)$$

где W_{cy} — момент сопротивления сечения для наиболее сжатого волокна относительно оси y—y; η — коэффициент, при-

Таблица 9.21. Значения коэффициентов α и β

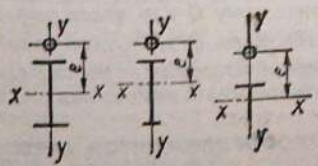
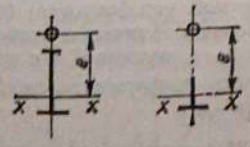
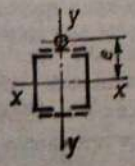
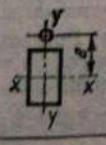
Типы сечений	α		β	
	$m_x < 1$	$1 < m_x \leqslant 5$	$\lambda_y \leqslant \lambda_c$	$\lambda_y > \lambda_c$
Открытые				
	0,7	0,65+0,05m_x	1	$\sqrt{\varphi_c/\varphi_y}$
	1—0,3$\frac{J_2}{J_1}$	1—(0,35—0,05m_x)$\frac{J_2}{J_1}$	1	1—(1—$\sqrt{\frac{\varphi_c}{\varphi_y}}$) (2$\frac{J_2}{J_1}$ — — 1) при $\frac{J_2}{J_1} < 0{,}5$, $\beta = 1$
Замкнутые: с решетками (с планками)				
	0,6	0,55+0,05m_x	1	$\sqrt{\varphi_c/\varphi_y}$
сплошные				
	0,6	0,55+0,05m_x	1	$\sqrt{\varphi_c/\varphi_y}$

Таблица 9.22. **Предельные отношения $[b_{ef}/t_f]$**

Тип элемента	Характеристика полки (тип сечения элемента)	$[b_{ef}/t_f]$
Центрально-, внецентренно-сжатый и сжато-изгибаемый	Неокаймленная (двутавр, тавр)	$(0{,}36+0{,}1\bar{\lambda})\sqrt{E/R_y}$
	Окаймленная ребром (двутавр, тавр)	$(0{,}54+0{,}15\bar{\lambda})\sqrt{E/R_y}$
	Неокаймленная (равнополочные уголки, гнутые профили, за исключением швеллера)	$(0{,}4+0{,}07\bar{\lambda})\sqrt{E/R_y}$
	Окаймленная ребром (равнополочные уголки, гнутые профили)	$(0{,}5+0{,}18\bar{\lambda})\sqrt{E/R_y}$
	Неокаймленная (бóльшая полка неравнополочного уголка, полка швеллера)	$(0{,}43+0{,}08\bar{\lambda})\sqrt{E/R_y}$
	Окаймленная ребром и усиленная планками (гнутые профили)	$(0{,}85+0{,}9\bar{\lambda})\sqrt{E/R_y}$
Изгибаемый (в пределах упругих деформаций)	Неокаймленная	$0{,}5\sqrt{E/R_y}$
	Окаймленная ребром	$0{,}75\sqrt{E/R_y}$
Изгибаемый (с учетом развития пластических деформаций)	Неокаймленная	$0{,}11\dfrac{h_{ef}}{t_w} \leqslant 0{,}5\sqrt{E/R_y}$
	Окаймленная ребром	$0{,}16h_{ef}/t_w \leqslant 0{,}75\sqrt{E/R_y}$

Примечание. При $h_{ef}/t_w \leqslant 2{,}7\sqrt{E/R_y}$ для изгибаемых элементов, рассчитываемых с учетом развития пластических деформаций, максимальное значение $[b_{ef}/t_f]$ не должно превышать для неокаймленной полки $0{,}3\sqrt{E/R_y}$, а для полки, окаймленной ребром, — $0{,}45\sqrt{E/R_y}$.

нимаемый по табл. 9.18. Для стержней двутаврового сечения с неодинаковыми полками коэффициент η следует определять, как для сечения типа 8.

Если $m_{ef,y} < m_x$, то кроме расчета по формуле (9.74) необходимо дополнительно выполнить проверку по формулам (9.64) и (9.67), принимая $e_y = 0$. Если $\lambda_x > \lambda_y$, то дополнительную проверку следует проводить при $e_y = 0$ по формуле (9.64).

В случае несовпадения плоскости наибольшей жесткости ($J_x > J_y$) с плоскостью симметрии относительный эксцентриситет $m_x = e_x A/W_{cx}$ (W_{cx} — момент сопротивления для наиболее сжатого волокна относительно оси x—x) следует увеличить на 25 %.

При действии моментов в двух главных плоскостях устойчивость стержня сквозного сечения, состоящего из двух ветвей, симметричных относительно оси y—y, с решетками в двух параллельных плоскостях (рис. 9.9) следует проверять для стержня в целом по формуле (9.64) при $e_y = 0$ и для отдельных ветвей, как внецентренно-сжатых элементов, по формулам (9.64) и (9.67). При этом приведенное усилие в каждой ветви следует определять с учетом усилия от момента M_x (см. определение силы N_{ad}), а момент M_y распределять между ветвями пропорционально их жесткостям. Если момент M_y действует в плоскости одной из ветвей, то допускается передавать M_x полностью на эту ветвь. Гибкости отдельных ветвей при расчете по формуле (9.64) следует определять по расчетной длине всего стержня относительно оси y—y, а при расчете по формуле (9.67) — по максимальному расстоянию между узлами решетки.

Планки и решетку сквозных внецентренно-сжатых стержней следует рассчитать на поперечную силу, равную большему из двух значений: фактическому Q или условному Q_{fic}, найденному по формуле (9.18). Если $Q > Q_{fic}$, то применять планки не следует. Расчет соединительных элементов следует вести в соответствии с требованиями, изложенными в п. 9.2.1.

Таблица 9.23. **Значения $\bar{\lambda}_{uw}$**

m	Сечение элемента	$\bar{\lambda}$ и $\bar{\lambda}_1$	$\bar{\lambda}_{uw}$
0	Двутавровое	$\bar{\lambda} < 2{,}0$	$1{,}3+0{,}15\bar{\lambda}^2$
		$\bar{\lambda} \geqslant 2{,}0$	$1{,}2+0{,}35\bar{\lambda} \leqslant 2{,}3$
	Коробчатое, швеллерное прокатное	$\bar{\lambda} < 1{,}0$	1,2
		$\bar{\lambda} \geqslant 1{,}0$	$1{,}0+0{,}2\bar{\lambda} \leqslant 1{,}6$
	Швеллерное, кроме прокатного	$\bar{\lambda} < 0{,}8$	1,0
		$\lambda \geqslant 0{,}8$	$0{,}85+0{,}19\bar{\lambda} \leqslant 1{,}6$
Не менее 1	Двутавровое, коробчатое	$\bar{\lambda}_1 < 2{,}0$	$1{,}3+0{,}15\bar{\lambda}_1^2$
		$\bar{\lambda}_1 \geqslant 2{,}0$	$1{,}2+0{,}35\bar{\lambda}_1 \leqslant 3{,}1$

Примечание. При $0 < m < 1$ значения $\bar{\lambda}_{uw}$ для коробчатых и двутавровых сечений следует определять линейной интерполяцией между значениями, вычисленными при $m = 0$ и $m = 1$.

9.2.4. Местная устойчивость элементов сечения

Поясные листы. Проверка местной устойчивости поясных листов (полок) сводится к сравнению фактического отношения расчетной ширины свеса полки b_{ef} к толщине t_f с наибольшими значениями, определяемыми по формулам табл. 9.22:

$$b_{ef}/t_f \leqslant [b_{ef}/t_f]. \qquad (9.76)$$

В качестве расчетной ширины свеса полок следует принимать расстояние (рис. 9.10): в сварных элементах — от грани стенки до края полки, в прокатных профилях — от начала внутреннего закругления до края полки, в гнутых профилях — от края выкружки стенки до края полки.

Приведенные в табл. 9.22 формулы для определения наибольших значений $[b_{ef}/t_f]$ справедливы для центрально-, внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов при значениях условной гибкости стержня $\bar{\lambda}$ от 0,8 до 4. При $\bar{\lambda} < 0{,}8$ или $\bar{\lambda} > 4$ в формулах следует принимать $\bar{\lambda} = 0{,}8$ или $\bar{\lambda} = 4$.

В центрально-сжатых стержнях коробчатого сечения наибольшее значение $[b_{ef}/t_f]$ следует принимать, как для стенок коробчатого сечения (табл. 9.23). Во внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементах коробчатого сечения при $m \leqslant 0{,}3$ значения $[b_{ef}/t_f]$ следует принимать, как для центрально-сжатых элементов. При $m \geqslant 1{,}0$ и $\bar{\lambda} \leqslant 2 + 0{,}04\,m$

$[b_{ef}/t_f] = \sqrt{E/R_y}$; при $m \geqslant 1{,}0$ и $\bar{\lambda} > 2 + 0{,}04\,m$ $[b_{ef}/t_f] = (0{,}4 + 0{,}3\bar{\lambda})\,(1 - 0{,}01m)\,\sqrt{E/R_y}$. При $0{,}3 < m < 1$ значения $[b_{ef}/t_f]$ следует определять линейной интерполяцией между значениями, вычисленными при $m = 0{,}3$ и $m = 1$.

Если сечения центрально-, внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов подобраны по предельной гибкости, а изгибаемых — по предельным прогибам, а также при соответствующем обосновании расчетом, наибольшие значения $[b_{ef}/t_f]$ следует умножать на коэффициент $\sqrt{R_y\varphi_m/\sigma} \leqslant 1{,}25$. В качестве φ_m для центрально-, внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов следует принимать меньшее из значений φ, φ_e, φ_{exy}, $c\varphi$, используемое для проверки устойчивости стержня; $\sigma = N/A$. Для изгибаемых элементов $\varphi_m = 1$, σ — наибольшее из двух значений, найденных по формулам (9.26) и (9.32).

Отношение ширины свеса сжатого пояса к его толщине в балках с гибкой стенкой должно быть не более $0{,}38\sqrt{E/R_y}$.

Высота окаймляющего ребра a_{ef}, измеряемая от оси полки до края ребра (см. рис. 9.10, *е*), должна быть не менее $0{,}3b_{ef}$. Если сечения усилены планками, высота ребра назначается не менее $0{,}2b_{ef}$, а его толщина — не менее $2a_{ef}\sqrt{R_y/E}$.

Стенки центрально-, внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов. Устойчивость стенки обеспечена, если фактическое отношение расчетной высоты стенки h_{ef} к толщине t_w не превышает значений $\bar{\lambda}_{uw}\sqrt{E/R_y}$ для оговоренных в табл. 9.23 типов сечений:

$$h_{ef}/t_w \leqslant \bar{\lambda}_{uw}\sqrt{E/R_y}. \qquad (9.77)$$

Для центрально-сжатых ($m = 0$), а также внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых ($m > 0$) элементов значения $\bar{\lambda}_{uw}$ (см. табл. 9.23) следует определять в зависимости от условной гибкости стержня, принимаемой в расчете на устойчивость соответственно при центральном сжатии ($\bar{\lambda}$) и в плоскости действия момента ($\bar{\lambda}_1$). В коробчатых сечениях (составных, гнутых прямоугольных и квадратных) при $m > 0$ значение $\bar{\lambda}_{uw}$ определяют для стенки, параллельной плоскости изгибающего момента.

Если внецентренно-сжатые и сжато-изгибаемые элементы двутаврового и коробчатого сечений рассчитаны по формуле (9.67), то отношение h_{ef}/t_w определяют в зависимости от значения $\alpha = (\sigma - \sigma_1)/\sigma$, где σ — наибольшее сжимающее напряжение у расчетной границы стенки, принимаемое со знаком «плюс» и вычисленное без учета коэффициентов φ_e, φ_{exy} или $c\varphi$; σ_1 — соответствующее напряжение у противоположной расчетной границы стенки.

При $\alpha \leqslant 0{,}5$ наибольшее значение h_{ef}/t_w следует принимать по формулам табл. 9.23. При $\alpha \geqslant 1$

$$\frac{h_{ef}}{t_w} = 4{,}35\sqrt{\frac{(2\alpha - 1)\,E}{\sigma\,(2 - \alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\beta^2})}} \leqslant$$

$$\leqslant 3{,}8\sqrt{\frac{E}{R_y}}, \qquad (9.78)$$

$$\beta = 1{,}4\,(2\alpha - 1)\,\frac{\tau}{\sigma}, \quad \tau = Q/t_w h.$$

При $0{,}5 < \alpha < 1$ значения h_{ef}/t_w следует определять линейной интерполяцией между значениями, вычисленными при $\alpha = 0{,}5$ и $\alpha = 1$.

Для центрально-, внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов таврового сечения наибольшее отношение расчетной высоты стенки тавра к толщине равно

$$\frac{h_{ef}}{t_w} = (0{,}4 + 0{,}07\bar{\lambda})\left(1 + 0{,}25\sqrt{2 - \frac{b_f}{h_{ef}}}\right)\sqrt{\frac{E}{R_y}}, \qquad (9.79)$$

где b_f — ширина полки тавра.

Значение h_{ef}/t_w, определяемое по формуле (9.79), справедливо для стержней, для которых удовлетворяются условия: $1 \leqslant b_f/h_{ef} \leqslant 2$ и $0{,}8 < \bar{\lambda} < 4$. При $\bar{\lambda} < 0{,}8$ или $\bar{\lambda} > 4$ в формулу (9.79) следует подставлять соответственно $\bar{\lambda} = 0{,}8$ или $\bar{\lambda} = 4$.

Для всех оговоренных выше типов сечений наибольшее значение h_{ef}/t_w, найденное по формулам табл. 9.23, а также (9.78) и (9.79), можно увеличить умножением на коэффициент $\sqrt{R_y\varphi_m/\sigma} \leqslant 1{,}25$ (где $\sigma = N/A$, $\varphi_m = \varphi$ или φ_e) при условии, что сечение элемента подобрано по предельной гибкости или при соответствующем обосновании расчетом. Для отличных от указанных сечений внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов отношения h_{ef}/t_w, найденные в зависимости от значения α, необходимо умножать на коэффициент 0,75.

Если стенка сечения центрально-сжатого элемента двутаврового сечения, имеющая расчетную высоту h_{ef}, укреплена парным продольным ребром, расположенным посередине, то значение h_{ef}/t_w, установленное по формулам табл. 9.23, следует умножать на коэффициент β. При $J_{sl}/h_{ef}t_w^3 \leqslant 6$

$$\beta = 1 + 0{,}4\,\frac{J_{sl}}{h_{ef}t_w^3}\left(1 - 0{,}1\,\frac{J_{sl}}{h_{ef}t_w^3}\right), \qquad (9.80)$$

где J_{sl} — момент инерции сечения продольного ребра. Если ребро одностороннее, то его момент инерции вычисляют относительно оси, совмещенной с ближайшей гранью стенки, при парном ребре — относительно оси стенки.

Аналогичные ребра могут быть поставлены посередине стенки внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов. При моменте инерции сечения ребра $J_{sl} \geqslant 6h_{ef}t_w^3$ наиболее нагруженную часть стенки между поясом и осью ребра следует проверить в зависимости от параметра α.

Следует отметить, что продольные ребра жесткости необходимо включать в расчетные сечения элементов.

Фактические значения h_{ef}/t_w, найденные по формулам табл. 9.23, могут быть превышены (для центрально-сжатых элементов не более чем в 2 раза). Однако в этих случаях в расчетных формулах (9.64), (9.73) и (9.74) в качестве A следует принимать значение A_{red}, найденное с уменьшенной высотой стенки h_{red}. В коробчатых сечениях значения h_{red} и h_{red1} определяют для пластинок, образующих сечение и расположенных соответственно параллельно и перпендикулярно к плоскости изгиба. Для двутаврового и швеллерного сечения $A_{red} = A - (h_{ef} - h_{red})\,t_w$. Для центрально-сжатого стержня коробчатого сечения $A_{red} = A - 2\,(h_{ef} - h_{red})\,t_w - 2 \times (h_{ef1} - h_{red1})\,t_w$, а для аналогичного внецентренно-сжатого или сжато-изгибаемого стержня $A_{red} = A - 2\,(h_{ef} - h_{red})\,t_w$.

Значение h_{red} для швеллерных сечений центрально-сжатых элементов равно

$$h_{red} = \bar{\lambda}_{uw}t_w\sqrt{\frac{E}{R_y}}, \qquad (9.81)$$

а для двутавровых и коробчатых сечений

$$h_{red} = t_w\left[\bar{\lambda}_{uw} - \left(\frac{\bar{\lambda}_w}{\bar{\lambda}_{uw}} - 1\right)(\bar{\lambda}_{uw} - k)\right]\sqrt{\frac{E}{R_y}}, \qquad (9.82)$$

где $\bar{\lambda}_{uw}$ — условная гибкость стенки соответствующего сечения, принимаемая по табл. 9.23 при $m = 0$; $\bar{\lambda}_w = \frac{h_{ef}}{t_w}\sqrt{R_y/E}$ — условная гибкость стенки $\left(\text{при вычислении } h_{red1}\ \bar{\lambda}_{w1} = \frac{h_{ef1}}{t_{w1}}\sqrt{\frac{R_y}{E}}\right)$; k — коэффициент, принимаемый равным для двутаврового сечения $k = 1{,}2 + 0{,}5\bar{\lambda}$ (при $\bar{\lambda} > 3{,}5$ следует

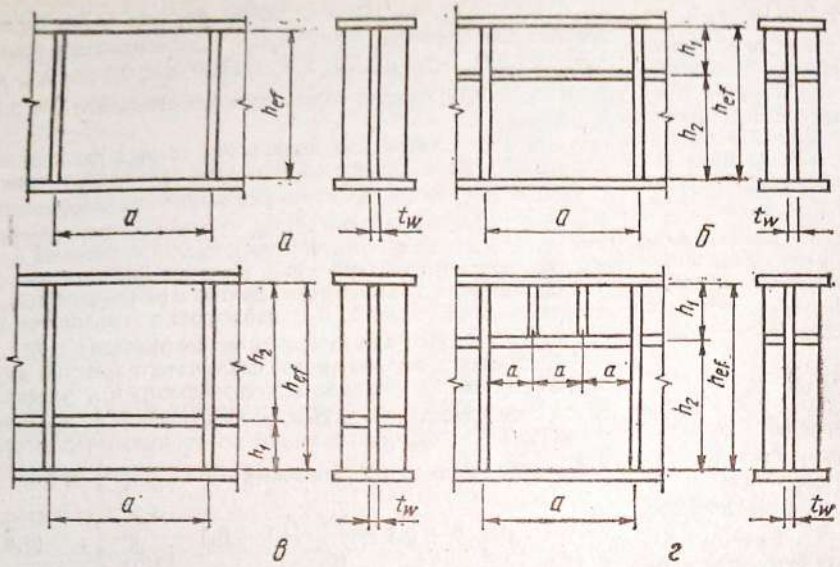


Рис. 9.11. Расчет местной устойчивости стенок балок:

а — укрепленной поперечными ребрами жесткости; *б* — укрепленной поперечными основными и продольным ребрами жесткости, расположенными у сжатого пояса; *в* — то же, у растянутого пояса; *г* — укрепленной поперечными основными и короткими, а также продольным ребрами жесткости.

принимать $\bar{\lambda} = 3{,}5$) и для коробчатого сечения $k = 2{,}9 + 0{,}2\bar{\lambda} - 0{,}7\bar{\lambda}_w$ (при $\bar{\lambda}_w > 2{,}3$ следует принимать $\bar{\lambda}_w = 2{,}3$); $\bar{\lambda}$ — условная гибкость стержня, принятая в табл. 9.23.

Значение h_{red} для внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов определяют по формуле (9.82), в которой $\bar{\lambda}_{uw}$ принимают по формулам табл. 9.23, а k вычисляются при $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_1$.

Стенки сплошных колонн при $h_{ef}/t_w \geqslant 2{,}3\sqrt{E/R_y}$ следует укреплять поперечными ребрами жесткости, число которых на каждом отправочном элементе должно быть не менее двух. Расстояние между ребрами назначают равным (2,5... 3,0) h_{ef}. Ширина парных поперечных и продольных ребер должна быть не менее $b_h = h_{ef}/30 + 40$ мм, односторонних — $b_h = h_{ef}/24 + 50$ мм. Толщину ребер принимают не менее $2b_h\sqrt{R_y/E}$.

Стенки изгибаемых элементов. Если значения условной гибкости стенки $\bar{\lambda}_w$ превышают 3,2 при отсутствии подвижной нагрузки или 2,2 при ее наличии, то стенки балок необходимо укрепить поперечными ребрами жесткости, размещенными по длине балки и на ее опорах, в том числе и под значительными сосредоточенными силами. Расстояние между осями основных ребер, поставленными на всю высоту стенки, не должно превышать $a = 2h_{ef}$ при $\bar{\lambda}_w > 3{,}2$ и $a = 2{,}5h_{ef}$ при $\bar{\lambda}_w \leqslant 3{,}2$. Эти расстояния могут быть увеличены до $3h_{ef}$ при условии, что стенка балки удовлетворяет соответствующим проверкам ее местной устойчивости и общая устойчивость балки обеспечена.

Расчет на устойчивость стенок балок необходим, если условная гибкость превышает значения: 3,5 — при отсутствии местного напряжения в балках с двухсторонними поясными швами; 3,2 — то же, с односторонними поясными швами; 2,5 — при наличии местного напряжения в балках с двухсторонними поясными швами. При этом $\bar{\lambda}_w \leqslant 6$.

Прямоугольные отсеки (пластинки) стенки, которые следует рассчитывать на устойчивость, могут быть образованы только поперечными основными ребрами (рис. 9.11, *а*), поперечными и продольными ребрами (рис. 9.11, *б*, *в*) либо поперечными основными и промежуточными короткими ребрами и продольным ребром (рис. 9.11, *г*). При этом короткие ребра должны располагаться между сжатым поясом и продольным ребром.

Расчет на устойчивость стенок балок следует выполнять с учетом всех компонентов напряженного состояния (σ, τ и σ_{loc}), определяемых в предположении упругой работы стали по сечению брутто. Сжимающее напряжение у расчетной границы стенки, принимаемое со знаком «плюс», равно:

$$\sigma = \frac{M}{J_x} y. \qquad (9.83)$$

Среднее касательное напряжение определяется с учетом полной высоты стенки h_w (см. рис. 9.10, *а*, *б*, *в*):

$$\tau = Q/t_w h_w. \qquad (9.84)$$

Местное напряжение в стенке балки σ_{loc} определяется по формуле (9.28) под сосредоточенной силой, приложенной либо к сжатому, либо к растянутому поясу. В первом случае при расчете следует учитывать одновременно три компонента напряженного состояния (σ, τ, σ_{loc}), а во втором — два (σ и τ или σ_{loc} и τ).

Средние значения момента M и поперечной силы Q следует вычислять в пределах отсека при $a \leqslant h_{ef}$ или для наиболее напряженного участка длиной, равной высоте отсека при $a > h_{ef}$. Если в рассматриваемом отсеке момент или поперечная сила меняет знак, то их средние значения следует вычислять на участке однозначной эпюры усилий.

При отсутствии местных напряжений ($\sigma_{loc} = 0$) расчет на устойчивость стенок балок симметричного сечения, укрепленных только основными поперечными ребрами, следует выполнять по формулам

$$\sqrt{(\sigma/\sigma_{cr})^2 + (\tau/\tau_{cr})^2} \leqslant \gamma_c; \qquad (9.85)$$

$$\sigma_{cr} = c_{cr} R_y/\bar{\lambda}_w^2; \qquad (9.86)$$

$$\tau_{cr} = 10{,}3\left(1 + \frac{0{,}76}{\mu^2}\right)\frac{R_s}{\bar{\lambda}_{cf}^2}; \qquad (9.87)$$

$$\bar{\lambda}_{cf} = \frac{d}{t}\sqrt{\frac{R_y}{E}}, \qquad (9.88)$$

где d — меньшая из сторон пластинки (h_{ef} или a); μ — отношение большей стороны пластинки к меньшей.

Коэффициент c_{cr} для сварных балок определяют в зависимости от значения коэффициента

$$\delta = \beta\frac{b_f}{h_{ef}}\left(\frac{t_f}{t_w}\right)^2, \qquad (9.89)$$

где $\beta = \infty$ при непрерывном опирании настила и $\beta = 0{,}8$ в прочих случаях; b_f и t_f — соответственно ширина и толщина сжатого пояса балки.

δ	Не более 0,8	1	2	4	6	10	30
c_{cr}	30	31,5	33,3	34,6	34,8	35,1	35,5

Для балок симметричного сечения, работающих с учетом развития пластических деформаций, при $\sigma_{loc} = 0$, $\tau \leqslant 0{,}9R_s$, $A_f/A_w \geqslant 0{,}25$, $2{,}2 < \bar{\lambda}_w \leqslant 6$ расчет на устойчивость стенок следует выполнять по формуле

$$M < R_y\gamma_c h_{ef}^2 \left(\frac{A_f}{A_w} + \alpha\right); \qquad (9.90)$$

$$\alpha = 0{,}24 - 0{,}15\left(\frac{\tau}{R_s}\right)^2 - 8{,}5 \cdot 10^{-3}(\bar{\lambda}_w - 2{,}2)^2,$$

где τ определяется по формуле (9.84).

В балках, материал которых работает в упругой стадии, при укреплении стенок только поперечными основными ребрами жесткости и при $\sigma_{loc} \neq 0$ устойчивость стенок проверяют по формуле

$$\sqrt{(\sigma/\sigma_{cr} + \sigma_{loc}/\sigma_{loc,cr})^2 + (\tau/\tau_{cr})^2} \leqslant \gamma_c. \qquad (9.91)$$

Значения σ, σ_{loc}, τ и τ_{cr} следует определять по формулам (9.83), (9.28), (9.84) и (9.87) соответственно. Значения σ_{cr} и $\sigma_{loc,cr}$ зависят от соотношения размеров отсека. При $a/h_{ef} \leqslant 0{,}8$ σ_{cr} определяется по формуле (9.86);

$$\sigma_{loc,cr} = c_1 R_y/\bar{\lambda}_a^2, \qquad (9.92)$$

где $\bar{\lambda}_a = a/t_w\sqrt{R_y/E}$; c_1 — коэффициент, принимаемый для сварных балок по табл. 9.24 в зависимости от отношения a/h_{ef} и значения δ, найденного по формуле (9.89).

Если сосредоточенная сила приложена к растянутому поясу, то расчет стенки следует выполнять по формуле (9.91) с учетом только σ_{loc} и τ. В этом случае при определении параметра δ по формуле (9.89) в качестве b_f и t_f следует принимать соответственно ширину и толщину растянутого пояса.

При $a/h_{ef} > 0{,}8$ и отношении σ_{loc}/σ, превышающем значения, приведенные в табл. 9.25,

$$\sigma_{cr} = c_2 R_y/\bar{\lambda}_w^2, \qquad (9.93)$$

где c_2 — коэффициент, определяемый следующим образом:

a/h_{ef}	Не более 0,8	0,9	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
c_2	30	37	39,2	45,2	52,8	62,0	72,6	84,7

Значение $\sigma_{loc,cr}$ определяется по формуле (9.92), в которой при $a/h_{ef} > 2$ следует принимать $a = 2h_{ef}$.

При $a/h_{ef} > 0{,}8$ и отношении σ_{loc}/σ, не превышающем значений, указанных в табл. 9.25, σ_{cr} определяется по формуле (9.86), $\sigma_{loc,cr}$ — по формуле (9.92), в которой при определении $\bar{\lambda}_a$ и коэффициента c_1 (см. табл. 9.24) вместо a следует подставлять $a/2$.

При укреплении стенок балок симметричного сечения поперечными основными ребрами и одним продольным ребром (см. рис. 9.11, *б*) расчет на устойчивость следует выполнять отдельно для каждой пластинки, на которые ребро разделяет отсек. Пластинку высотой h_1, расположенную между сжатым поясом и продольным ребром, следует проверять по формуле

$$\frac{\sigma}{\sigma_{cr1}} + \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr1}}\right)^2 \leqslant \gamma_c, \qquad (9.94)$$

где σ, σ_{loc}, τ, τ_{cr1} определяются по формулам (9.83), (9.28), (9.84) и (9.87) соответственно.

При $\sigma_{loc} = 0$

$$\sigma_{cr1} = \frac{4{,}76}{(1 - h_1/h_{ef})}\frac{R_y}{\bar{\lambda}_1^2}, \qquad (9.95)$$

где $\bar{\lambda}_1 = \frac{h_1}{t_w}\sqrt{R_y/E}$. При $\sigma_{loc} \neq 0$ и $\mu_1 = \frac{a}{h_1} \leqslant 2$

$$\sigma_{cr1} = \frac{1{,}19\psi}{1 - h_1/h_{ef}} R_y/\bar{\lambda}_1^2; \qquad (9.96)$$

$$\sigma_{loc,cr} = (1{,}24 + 0{,}476\mu_1)\,\psi\, R_y/\bar{\lambda}_a^2, \qquad (9.97)$$

где $\psi = \left(\mu_1 + \frac{1}{\mu_1}\right)^2$; $\bar{\lambda}_a = \frac{a}{t_w}\sqrt{R_y/E}$. Если $\mu_1 > 2$, то в формулах (9.96), (9.97) следует принимать $a = 2h_1$.

Пластину высотой h_2, расположенную между продольным ребром и растянутым поясом, следует проверять по формуле

$$\sqrt{\left[\frac{\sigma(1 - 2h_1/h_{ef})}{\sigma_{cr2}} + \frac{\sigma_{loc2}}{\sigma_{loc.cr2}}\right]^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr2}}\right)^2} \leqslant \gamma_c, \qquad (9.98)$$

где $\sigma_{loc2} = 0{,}4\,\sigma_{loc}$ при приложении сосредоточенной нагрузки к сжатому поясу; $\sigma_{loc2} = \sigma_{loc}$ — то же, к растянутому поясу; $\sigma_{loc,cr2}$ определяют по формуле (9.92) и табл. 9.25 при $\delta = 0{,}8$, заменяя значение отношения a/h_{ef} значением

Таблица 9.24. **Значения коэффициента c_1**

δ	a/h_{ef}								
	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	$\geqslant$2,0
$\leqslant$1	11,5	12,4	14,8	18,0	22,1	27,1	32,6	38,9	45,6
2	12,0	13,0	16,1	20,4	25,7	32,1	39,2	46,5	55,7
4	12,3	13,3	16,6	21,6	28,1	36,3	45,2	54,9	65,1
6	12,4	13,5	16,8	22,1	29,1	38,3	48,7	59,4	70,4
10	12,4	13,6	16,9	22,5	30,0	39,7	51,0	63,3	76,5
$\geqslant$30	12,5	13,7	17,0	22,9	31,0	41,6	53,0	68,2	83,6

Таблица 9.25. **Предельные значения σ_{loc}/σ**

δ	a/h_{ef}							
	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	$\geqslant$2,0
Не более 1	0	0,146	0,183	0,267	0,359	0,445	0,540	0,618
2	0	0,109	0,169	0,277	0,406	0,543	0,652	0,799
4	0	0,072	0,129	0,281	0,479	0,711	0,930	1,132
5	0	0,066	0,127	0,288	0,536	0,874	1,192	1,461
10	0	0,059	0,122	0,296	0,574	1,002	1,539	2,154
Не менее 30	0	0,047	0,112	0,300	0,633	1,283	2,249	3,939

$(a/h_{ef} - h_1)$; τ_{cr2} определяют по формуле (9.87) с подстановкой размеров проверяемой пластинки:

$$\sigma_{cr2} = \frac{5{,}43}{(0{,}5 - h_1/h_{ef})^2} \frac{R_y}{\bar{\lambda}_w^2}. \qquad (9.99)$$

При укреплении стенок балок симметричного сечения поперечными основными ребрами, продольным ребром и короткими поперечными ребрами высотой h_1 (см. рис. 9.11, *г*) расчет пластинки размерами $h_1 \times a_1$ (a_1 — расстояние между осями коротких ребер) следует вести по формулам (9.94) — (9.97), заменяя величину a величиной a_1. Расчет пластинки размерами $h_2 \times a$ следует выполнять по формуле (9.98).

Стенки балок асимметричного сечения (с более развитым сжатым поясом), укрепленные поперечными ребрами жесткости, следует рассчитывать по формулам (9.85) или (9.91). При этом в формулах (9.86), (9.93) значение h_{ef} следует принимать равным удвоенному расстоянию от нейтральной оси до сжатой границы отсека. При $a/h_{ef} > 0{,}8$ и $\sigma_{loc} \neq 0$ независимо от значения σ_{loc}/σ проверку по формуле (9.91) выполняют с использованием значений σ_{cr} и $\sigma_{loc,cr}$, найденных соответственно по (9.93) и (9.92), а также по (9.86) и (9.92).

Для стенок балок асимметричного сечения, укрепленных основными поперечными ребрами и одним продольным ребром, расчет ведут по формулам (9.94) и (9.98) с использованием вместо h_1/h_{ef} значения $\alpha h_1/2h_{ef}$ в формулах (9.95), (9.96) и (9.98). В формулу (9.99) вместо $(0{,}5 - h_1/h_{ef})$ следует подставлять $(1/\alpha - h_1/h_{ef})$. Здесь $\alpha = (\sigma - \sigma_t)/\sigma$, где σ_t — краевое растягивающее напряжение (со знаком «минус») у расчетной границы отсека.

Если в балках асимметричного сечения более развит растянутый (ненагруженный) пояс, то устойчивость стенки проверяют при одновременном действии σ и τ по формуле (9.78).

В балках с перфорированной стенкой при $h_{ef}/t_w > 2{,}5\sqrt{E/R_y}$ или при невыполнении условия (9.28) следует также устанавливать поперечные ребра жесткости с соблюдением правил их размещения, изложенных выше.

Отношение высоты стенки сжатого таврового сечения к ее толщине не должно превышать значения, найденного по формуле (9.79) при $\bar{\lambda} = 1{,}4$.

Минимальные размеры ребер жесткости балок ($b_h \times t_h$) назначают аналогично размерам ребер колонн.

В сварных двутавровых балках, не подвергающихся непосредственному воздействию динамических, вибрационных или подвижных нагрузок, следует применять односторонние ребра жесткости с расположением их с одной стороны стенки. В балках с односторонними поясными швами ребра жесткости располагают со стороны, противоположной расположению односторонних сварных швов.

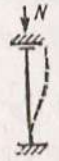
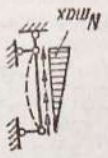
Одностороннее ребро жесткости, расположенное в месте приложения сосредоточенной нагрузки к верхнему поясу балки, необходимо рассчитать, как внецентренно-сжатую

Таблица 9.26. **Значения момента инерции сечения продольного ребра жесткости**

$\frac{h_1}{h_{ef}}$	Момент инерции	$J_{s1\min}$	$J_{s1\max}$
0,2	$(2{,}5-0{,}5\frac{a}{h_{ef}})\frac{a^2t_w^3}{h_{ef}}$	$1{,}5\,h_{ef}t_w^3$	$7h_{ef}t_w^3$
0,25	$(1{,}5-0{,}4\frac{a}{h_{ef}})\frac{a^2t_w^3}{h_{ef}}$	$1{,}5\,h_{ef}t_w^3$	$3{,}5h_{ef}t_w^3$
0,3	$1{,}5\,h_{ef}t_w^3$	—	—

Примечание. Для промежуточных значений h_1/h_{ef} значение J_{s1} допускается определять линейной интерполяцией.

Таблица 9.27. Значения μ для определения расчетных длин колонн и стоек постоянного сечения

Условия закрепления и вид нагрузки	μ	Условия закрепления и вид нагрузки	μ
	1,0		1,0
	0,7		2,0
	0,5		0,725
	2,0		1,12

стойку длиной, равной высоте стенки. В состав расчетного сечения стойки входит ребро и участок стенки длиной по $0{,}65t_w\sqrt{E/R_y}$ с каждой стороны ребра. Эксцентриситет приложения силы определяют как расстояние от срединной плоскости стенки до центра тяжести расчетного сечения стойки.

Стенки балок допускается укреплять односторонними поперечными ребрами из одиночных уголков, привариваемых к стенке пером. Размеры каждого такого ребра назначают с таким расчетом, чтобы момент инерции ребра, вычисленный относительно оси, совпадающей с ближайшей к ребру гранью стенки, был не меньше, чем для парного симметричного ребра.

В случае укрепления стенки поперечными основными и одним продольным ребрами жесткости моменты инерции сечений ребер следует определять для поперечных ребер — по формуле

$$J_h = 3h_{ef}t_w^3, \qquad (9.100)$$

для продольного ребра — по формулам табл. 9.26 с учетом его предельных значений.

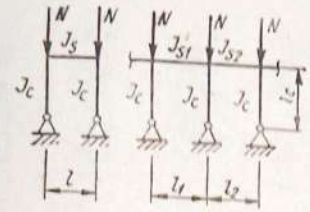
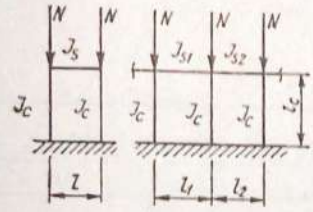
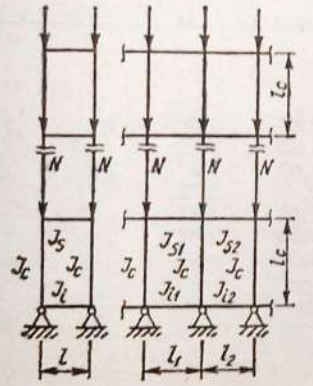
9.2.5. Расчетные длины и предельные гибкости элементов

Расчетные длины стержней зависят от условий закрепления их концов и вида нагрузки:

$$l_{ef} = \mu l_c, \qquad (9.101)$$

где l_c — геометрическая длина стержня или его участка постоянного сечения; μ — коэффициент расчетной длины.

Таблица 9.28. Значения коэффициентов n и p для рам

Номер схемы	Расчетная схема рамы	Рама: свободная, однопролетная	Рама: свободная, многопролетная	Рама: несвободная
1		$n = \frac{J_s l_c}{l J_c}$	$n = \frac{k(n_1 + n_2)}{k+1}$	—
				$n = \frac{J_s l_c}{l J_c}$, $p = \frac{J_i l_c}{l J_c}$
2		*Верхний этаж*		
		$n = \frac{J_s l_c}{l J_c}$	$n = \frac{2k(n_1 + n_2)}{k+1}$	$n = n_1 + n_2$
		$p = \frac{J_i l_c}{2 l J_c}$	$p = \frac{k(p_1 + p_2)}{k+1}$	$p = 0{,}5(p_1 + p_2)$
3		*Средний этаж*		
		$n = \frac{J_s l_c}{2 l J_c}$	$n = \frac{k(n_1 + n_2)}{k+1}$	$n = 0{,}5(n_1 + n_2)$
		$p = \frac{J_i l_c}{2 l J_c}$	$p = \frac{k(p_1 + p_2)}{k+1}$	$p = 0{,}5(p_1 + p_2)$
4		*Нижний этаж*		
		$n = \frac{J_s l_c}{2 l J_c}$	$n = \frac{k(n_1 + n_2)}{k+1}$	$n = 0{,}5(n_1 + n_2)$
		$p = \frac{J_i l_c}{l J_c}$	$p = \frac{2k(p_1 + p_2)}{k+1}$	$p = p_1 + p_2$

Расчетные длины колонн. Для колонн постоянного сечения, нагруженных центральной сжимающей силой, при четко определенном характере закрепления значения коэффициентов μ приведены в табл. 9.27.

Для колонн, входящих в состав рам, расчетные длины следует определять с учетом жесткости ригелей, примыкающих к проверяемой колонне, и характера их взаимного крепления. При наличии свободы перемещения узла сопряжения ригеля с колонной в направлении, перпендикулярном к оси колонны, рама считается свободной, а в противном случае — несвободной.

Коэффициенты расчетной длины для колонн постоянного сечения в плоскости свободной рамы при жестком креплении ригелей с колонной и одинаковом загружении верхних узлов (для схем табл. 9.28): при шарнирном креплении колонн одноэтажных рам в фундаментах (схема *1*)

$$\mu = 2\sqrt{1 + 0{,}38/n}; \qquad (9.102)$$

при жестком креплении колонн одноэтажных рам в фундаментах (схема *2*)

$$\mu = \sqrt{(n + 0{,}56)/(n + 0{,}14)}. \qquad (9.103)$$

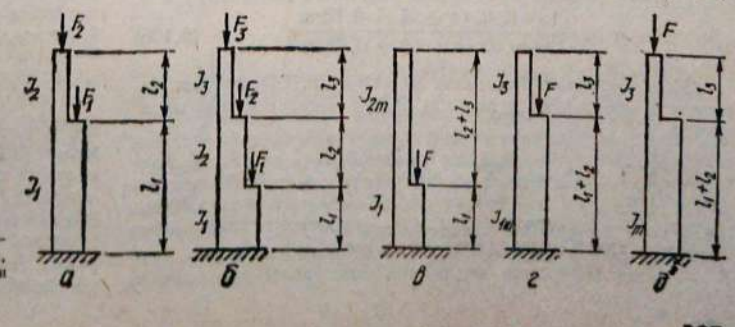


Рис. 9.12. Схемы колонн:

а — одноступенчатая; *б* — двухступенчатая; *в*, *г*, *д* — эквивалентные одноступенчатым с продольными силами, приложенными соответственно к нижнему, среднему и верхнему участкам.

Таблица 9.29. Значения μ_1 для одноступенчатых колонн с верхним свободным концом

Расчетная схема	α_1	n = 0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
	0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	0,2	2,0	2,01	2,02	2,03	2,04	2,05	2,06	2,06	2,07	2,08	2,09	2,10
	0,4	2,0	2,04	2,08	2,11	2,13	2,18	2,21	2,25	2,28	2,32	2,35	2,42
	0,6	2,0	2,11	2,20	2,28	2,36	2,44	2,52	2,59	2,66	2,73	2,80	2,93
	0,8	2,0	2,25	2,42	2,56	2,70	2,83	2,96	3,07	3,17	3,27	3,36	3,55
	1,0	2,0	2,50	2,73	2,94	3,13	3,29	3,44	3,59	3,74	3,87	4,00	—
	1,5	3,0	3,43	3,77	4,07	4,35	4,61	4,86	5,05	—	—	—	—
	2,0	4,0	4,44	4,90	5,29	5,67	6,03	—	—	—	—	—	—
	2,5	5,0	5,55	6,08	6,56	7,00	—	—	—	—	—	—	—
	3,0	6,0	6,65	7,25	7,82	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 9.30. Значения μ_1 для одноступенчатых колонн с верхним концом, закрепленным только от поворота

Расчетная схема	α_1	n = 0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
	0	2,0	1,92	1,86	1,80	1,76	1,70	1,67	1,64	1,60	1,57	1,55	1,50
	0,2	2,0	1,93	1,87	1,82	1,76	1,71	1,68	1,64	1,62	1,59	1,56	1,52
	0,4	2,0	1,94	1,88	1,83	1,77	1,75	1,72	1,69	1,66	1,62	1,61	1,57
	0,6	2,0	1,95	1,91	1,86	1,83	1,79	1,77	1,76	1,72	1,71	1,69	1,66
	0,8	2,0	1,97	1,94	1,92	1,90	1,88	1,87	1,86	1,85	1,83	1,82	1,80
	1,0	2,0	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	—
	1,5	2,0	2,12	2,25	2,33	2,38	2,43	2,48	2,52	—	—	—	—
	2,0	2,0	2,45	2,66	2,81	2,91	3,00	—	—	—	—	—	—
	2,5	2,5	2,94	3,17	3,34	3,50	—	—	—	—	—	—	—
	3,0	3,0	3,43	3,70	3,93	4,12	—	—	—	—	—	—	—

Для многоэтажных рам (схемы *3* и *4*) при $n \leqslant 0{,}2$

$$\mu = \frac{(p + 0{,}68)\sqrt{n + 0{,}22}}{\sqrt{0{,}68p\,(p + 0{,}9)\,(n + 0{,}08) + 0{,}1n}}, \qquad (9.104)$$

при $n > 0{,}2$

$$\mu = \frac{(p + 0{,}63)\sqrt{n + 0{,}28}}{\sqrt{pn\,(p + 0{,}9) + 0{,}1n}}. \qquad (9.105)$$

Для тех же колонн несвободных рам

$$\mu = \frac{1 + 0{,}46\,(p + n) + 0{,}18pn}{1 + 0{,}93\,(p + n) + 0{,}71pn}. \qquad (9.106)$$

Используемые в формулах (9.102) — (9.106) коэффициенты n и p определяются по табл. 9.28 в зависимости от параметров

$$n_1 = \frac{J_{s1}l_c}{l_1 J_c}, \quad n_2 = \frac{J_{s2}l_c}{l_2 J_c}, \quad p_1 = \frac{J_{f1}l_c}{l_1 J_c}, \quad p_2 = \frac{J_{f2}l_c}{l_2 J_c},$$

где l, l_1, l_2 — пролеты рамы; J_c и l_c — соответственно момент инерции и длина проверяемой колонны; J_s, J_{s1}, J_{s2} и J_f, J_{f1}, J_{f2} — моменты инерции сечений ригелей, примыкающих соответственно к верхнему и нижнему концам проверяемой колонны; k — число пролетов.

При шарнирном креплении верхних или нижних ригелей к колоннам для схем *2*, *3* и *4*, указанных в табл. 9.28, следует принимать $n = 0$ и $p = 0$ ($J_s = 0$ или $J_f = 0$), при жестком — не более $n = 50$ и $p = 50$ ($J_s = \infty$ или $J_f = \infty$). Для крайних колонн свободных многопролетных рам коэффициент μ следует определять, как для колонн однопролетных рам.

Если верхние узлы колонн свободной одноэтажной рамы нагружены неодинаково, то коэффициент расчетной длины наиболее нагруженной колонны при наличии жесткого диска или продольных связей по верху всех колонн определяют так:

$$\mu_{ef} = \mu\sqrt{J_c \Sigma N / N_c \Sigma J} \geqslant 0{,}7, \qquad (9.107)$$

где μ — коэффициент расчетной длины, найденный по формулам (9.102) или (9.103); J_c и N_c — соответственно момент инерции сечения и расчетное усилие в рассматриваемой колонне; ΣJ и ΣN — соответственно сумма моментов инерции сечений и сумма расчетных усилий во всех колоннах рассматриваемой рамы и четырех соседних рам (по две с каждой стороны). Все расчетные усилия (N_c и ΣN) следует принимать при единой комбинации нагрузок.

1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	5,0	10,0	20,0
2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
2,12	2,14	2,15	2,17	2,21	2,40	2,76	3,38
2,48	2,54	2,60	2,66	2,80	—	—	—
3,05	3,17	3,28	3,39	—	—	—	—
3,74	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—

1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	5,0	10,0	20,0
1,46	1,43	1,40	1,37	1,32	1,18	1,10	1,05
1,48	1,45	1,41	1,39	1,33	1,20	1,11	—
1,53	1,50	1,48	1,45	1,40	—	—	—
1,63	1,61	1,59	—	—	—	—	—
1,79	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—

Для ступенчатых колонн расчетные длины в плоскости рамы следует определять для каждого участка постоянного сечения по формуле (9.101).

Для одноступенчатых колонн (рис. 9.12, *а*) коэффициенты расчетной длины μ_1 для нижнего участка зависят от параметров

$$n = \frac{J_2 l_1}{J_1 l_2}, \quad \alpha_1 = \frac{l_2}{l_2}\sqrt{\frac{J_1}{J_2\beta}}, \quad \beta = \frac{F_1 + F_2}{F_2},$$

где J_1, J_2, l_1, l_2 — моменты инерции сечений и длины соответственно нижнего и верхнего участков колонны; F_1 и F_2 — продольные силы, приложенные соответственно к ступени и к верху колонны.

Значения μ_1 принимают по табл. 9.29 при верхнем конце колонны, свободном от всяких закреплений, и по табл. 9.30 при верхнем конце, закрепленном от поворота, и при возможности его свободного смещения. При неподвижном верхнем конце, шарнирно опертом или закрепленном от поворота, коэффициент μ_1 равен

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{\mu_{12}^2 + \mu_{11}^2(\beta - 1)}{\beta}}, \qquad (9.108)$$

где μ_{12} и μ_{11} — коэффициенты расчетной длины нижнего участка при $F_1 = 0$ и $F_2 = 0$. В зависимости от характера закрепления верхнего конца колонны значения коэффициентов μ_{12} и μ_{11} принимают по табл. 9.31 и 9.32.

Коэффициент расчетной длины μ_2 для верхнего участка во всех случаях равен

$$\mu_2 = \mu_1/\alpha_1 \leqslant 3. \qquad (9.109)$$

Для одноступенчатых колонн при $l_2/l_1 \leqslant 0{,}6$ и $\beta \geqslant 3$ коэффициенты расчетной длины для нижнего и верхнего участков принимают по табл. 9.33.

Коэффициент расчетной длины μ_1 для нижнего участка двухступенчатой колонны (см. рис. 9.12, *б*) определяют по формуле

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{\beta_1\mu_{m1}^2 + (\beta_2\mu_{m2}^2 + \mu_{m3}^2)(1 + \delta_2)^2 J_1/J_{1m}}{1 + \beta_1 + \beta_2}};$$
$$\beta_1 = F_1/F_3; \quad \beta_2 = F_2/F_3; \quad \delta_2 = l_2/l_1, \qquad (9.110)$$

где μ_{m1}, μ_{m2}, μ_{m3} — коэффициенты расчетной длины, определяемые по табл. 9.34, как для одноступенчатых колонн, эквивалентных при определении расчетной длины двухступенчатым (по схемам, приведенным на рис. 9.12, *в*, *г*, *д*); $J_{1m} = (J_1 l_1 + J_2 l_2)/(l_1 + l_2)$ — среднее значение момента инерции для участков l_1 и l_2; $J_{2m} = (J_2 l_2 + J_3 l_3)/(l_1 + l_2)$ — то же для участков $l_2 + l_3$; J_1, J_2, J_3 и l_1, l_2, l_3 — моменты инерции и длины соответственно нижнего, среднего и верхнего участков колонны.

Для среднего участка длиной l_2

$$\mu_2 = \mu_1/\alpha_2, \qquad (9.110)$$

а для верхнего участка длиной l_3

$$\mu_3 = \mu_1/\alpha_3 \leqslant 3, \qquad (9.111)$$

где $\alpha_2 = \frac{l_2}{l_1}\sqrt{\frac{J_2(F_2 + F_3)}{J_2(F_1 + F_2 + F_3)}}$;

$$\alpha_3 = \frac{l_3}{l_1}\sqrt{\frac{J_1 F_3}{J_3(F_1 + F_2 + F_3)}}.$$

Из плоскости рам (в направлении вдоль здания) расчетные длины каждого участка постоянного сечения колонны определяют, как расстояние между точками закрепления рамы от горизонтального смещения — опорами колонн, подкрановых балок и подстропильных ферм, узлами крепления связей и т. п.

Расчетные длины элементов плоских ферм и связей. Расчетные длины и гибкости стержней плоских ферм и связей определяют для двух направлений, где возможна потеря устойчивости: в плоскости ($l_{ef\,x}$ и λ_x) и из плоскости ($l_{ef\,y}$ и λ_y) фермы. Для определения расчетных длин (табл. 9.35) в плоскости фермы исходят из геометрической длины стержня l, равной расстоянию между центрами узлов, а для перекрестной решетки — расстоянию l от узла фермы до центра пересечения элементов перекрестной решетки. Расчетные длины из плоскости фермы определяют: для поясов — расстояния l_1 между узлами закрепления поясов связями или плитами покрытия (рис. 9.13, *а*, *б*); для элементов решетки — расстояния между узлами фермы; для элементов перекрестной решетки — полные геометрические длины элементов l_1 (рис. 9.13, *г*, *д*).

Для элементов с переменными по длине усилиями ($N_1 > N_2$) расчетная длина из плоскости фермы (см. рис. 9.13, *б*) равна

$$l_{ef\,y} = l_1(0{,}75 + 0{,}25N_2/N_1). \qquad (9.112)$$

Расчет на устойчивость в этом случае следует выполнять с использованием силы N_1.

При определении гибкости стержней значения радиусов инерции следует принимать с учетом ориентации сечений относительно рассматриваемых в расчете плоскостей. Для элементов из одиночных уголков радиус инерции определяют относительно оси наименьшей жесткости ($i = i_{min}$) при расчетной длине $l_{ef} > 0{,}9l$ и относительно оси уголка, перпендикулярной к плоскости фермы или параллельной ей, в остальных случаях.

Таблица 9.31. Значения μ_{12} и μ_{11} для одноступенчатых колонн с неподвижным шарнирно опертым верхним концом

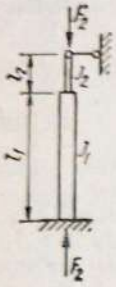
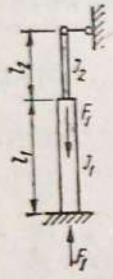
Расчетная схема	$\frac{J_2}{J_1}$	l_2/l_1														
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
		μ_{12}														
	0,04	1,02	1,84	2,25	2,59	2,85	3,08	3,24	3,42	3,70	4,00	4,55	5,25	5,80	6,55	7,20
	0,06	0,91	1,47	1,93	2,26	2,57	2,74	2,90	3,05	3,24	3,45	3,88	4,43	4,90	5,43	5,94
	0,08	0,86	1,31	1,73	2,05	2,31	2,49	2,68	2,85	3,00	3,14	3,53	3,93	4,37	4,85	5,28
	0,1	0,83	1,21	1,57	1,95	2,14	2,33	2,46	2,60	2,76	2,91	3,28	3,61	4,03	4,43	4,85
	0,2	0,79	0,98	1,23	1,46	1,67	1,85	2,02	2,15	2,28	2,40	2,67	2,88	3,11	3,42	3,71
	0,3	0,78	0,90	1,09	1,27	1,44	1,60	1,74	1,86	1,98	2,11	2,35	2,51	2,76	2,99	3,25
	0,4	0,78	0,88	1,02	1,17	1,32	1,45	1,58	1,69	1,81	1,92	2,14	2,31	2,51	2,58	2,88
	0,5	0,78	0,86	0,99	1,10	1,22	1,35	1,47	1,57	1,67	1,76	1,96	2,15	2,34	2,50	2,76
	1,0	0,78	0,85	0,92	0,99	1,06	1,13	1,20	1,27	1,34	1,41	1,54	1,68	1,82	1,97	2,1
		μ_{11}														
	0,04	0,67	0,67	0,83	1,25	1,43	1,55	1,65	1,70	1,75	1,78	1,84	1,87	1,88	1,90	1,92
	0,06	0,67	0,67	0,81	1,07	1,27	1,41	1,51	1,60	1,64	1,70	1,78	1,82	1,84	1,87	1,88
	0,08	0,67	0,67	0,75	0,98	1,19	1,32	1,43	1,51	1,58	1,63	1,72	1,77	1,81	1,82	1,84
	0,1	0,67	0,67	0,73	0,93	1,11	1,25	1,36	1,45	1,52	1,57	1,66	1,72	1,77	1,80	1,82
	0,2	0,67	0,67	0,69	0,75	0,89	1,02	1,12	1,21	1,29	1,36	1,46	1,54	1,60	1,65	1,69
	0,3	0,67	0,67	0,67	0,71	0,80	0,90	0,99	1,08	1,15	1,22	1,33	1,41	1,48	1,54	1,59
	0,4	0,67	0,67	0,67	0,69	0,75	0,84	0,92	1,00	1,07	1,13	1,24	1,33	1,40	1,47	1,51
	0,5	0,67	0,67	0,67	0,69	0,73	0,81	0,87	0,94	1,01	1,07	1,17	1,26	1,33	1,39	1,44
	1,0	0,67	0,67	0,67	0,68	0,71	0,74	0,78	0,82	0,87	0,91	0,99	1,07	1,13	1,19	1,24

Таблица 9.32. Значения μ_{12} и μ_{11} для одноступенчатых колонн с неподвижным верхним концом, закрепленным от поворота

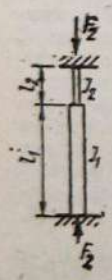
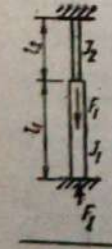
Расчетная схема	$\frac{J_2}{J_1}$	l_2/l_1														
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
		μ_{12}														
	0,04	0,78	1,02	1,53	1,73	2,01	2,21	2,38	2,54	2,65	2,85	3,24	3,70	4,20	4,76	5,23
	0,06	0,70	0,86	1,23	1,47	1,73	1,93	2,08	2,23	2,38	2,49	2,81	3,17	3,50	3,92	4,30
	0,08	0,68	0,79	1,05	1,31	1,54	1,74	1,91	2,05	2,20	2,31	2,55	2,80	3,11	3,45	3,73
	0,1	0,67	0,76	1,00	1,20	1,42	1,61	1,78	1,92	2,04	2,20	2,40	2,60	2,86	3,18	3,41
	0,2	0,64	0,70	0,79	0,93	1,07	1,23	1,41	1,50	1,60	1,72	1,92	2,11	2,28	2,45	2,64
	0,3	0,62	0,68	0,74	0,85	0,95	1,06	1,18	1,28	1,39	1,48	1,67	1,82	1,96	2,12	2,20
	0,4	0,60	0,66	0,71	0,78	0,87	0,99	1,07	1,16	1,26	1,34	1,50	1,65	1,79	1,94	2,08
	0,5	0,59	0,65	0,70	0,77	0,82	0,93	0,99	1,08	1,17	1,23	1,39	1,53	1,66	1,79	1,92
	1,0	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50
		μ_{11}														
	0,04	0,66	0,68	0,75	0,94	1,08	1,24	1,37	1,47	1,55	1,64	1,72	1,78	1,81	1,85	1,89
	0,06	0,65	0,67	0,68	0,76	0,94	1,10	1,25	1,35	1,44	1,50	1,61	1,69	1,74	1,79	1,82
	0,08	0,64	0,66	0,67	0,68	0,84	1,00	1,12	1,25	1,34	1,41	1,53	1,62	1,68	1,75	1,79
	0,1	0,64	0,65	0,65	0,65	0,78	0,92	1,05	1,15	1,25	1,33	1,45	1,55	1,62	1,68	1,71
	0,2	0,62	0,64	0,65	0,65	0,66	0,73	0,83	0,92	1,01	1,09	1,23	1,33	1,41	1,48	1,54
	0,3	0,60	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,73	0,81	0,89	0,94	1,09	1,20	1,28	1,35	1,41
	0,4	0,58	0,63	0,63	0,64	0,64	0,66	0,68	0,75	0,82	0,88	1,01	1,10	1,19	1,26	1,32
	0,5	0,57	0,61	0,63	0,64	0,64	0,65	0,68	0,72	0,77	0,83	0,94	1,04	1,12	1,19	1,25
	1,0	0,55	0,58	0,60	0,61	0,62	0,63	0,65	0,67	0,70	0,73	0,80	0,88	0,93	1,01	1,05

Таблица 9.33. **Значения μ_1 одноступенчатых колонн**

Условия закрепления верхнего конца колонны	Участок		
	нижний		верхний
	$0{,}1 < \frac{J_2}{J_1} \leqslant 0{,}3$	$0{,}5 < \frac{J_2}{J_1} \leqslant 0{,}1$	
Свободный	2,5	3,0	3,0
Закрепленный только от поворота	2,0	2,0	3,0
Неподвижный, шарнирно опертый	1,6	2,0	2,5
Неподвижный, закрепленный от поворота	1,2	1,5	2,0

Таблица 9.34. **Значения μ_{m1}, μ_{m2}, μ_{m3}**

Условия закрепления верхнего конца колонны	μ_{m1}	μ_{m2}	μ_{m3}
	при нагружении колонны		
	по рис. 9.12,	по рис. 9.12,	по рис. 9.12,
Свободный	2,0	2,0	μ_1 — по табл. 9.29 при $\alpha_1 = \frac{l_3}{l_1 + l_2}\sqrt{\frac{J_{1m}}{J_3}}$
Закрепленный только от поворота	μ_1 (μ_1 — по табл. 9.30 при $\alpha_1 = 0$)	μ_1	μ_1 — по табл. 9.30 при $\alpha_1 = \frac{l_3}{l_1 + l_2}\sqrt{\frac{J_{1m}}{J_3}}$
Неподвижный, шарнирно опертый	μ_{11} (μ_{11} — по табл. 9.31)	μ_{11}	μ_{12} — по табл. 9.31
Неподвижный, закрепленный от поворота	μ_{11} (μ_{11} — по табл. 9.32)	μ_{11}	μ_{12} — по табл. 9.32

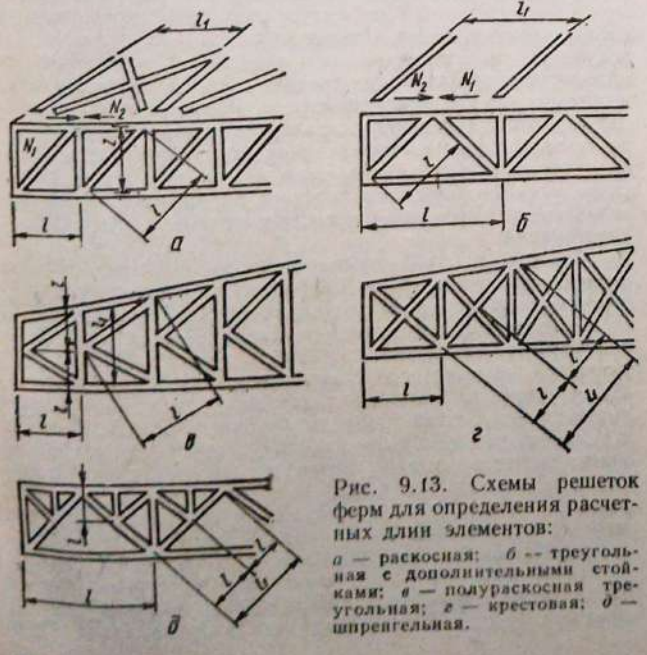


Рис. 9.13. Схемы решеток ферм для определения расчетных длин элементов:

а — раскосная; *б* — треугольная с дополнительными стойками; *в* — полураскосная треугольная; *г* — крестовая; *д* — шпренгельная.

Таблица 9.35. **Расчетная длина элементов плоских ферм**

№ п/п	Элемент конструкции	Направление продольного изгиба	
		в плоскости фермы	из плоскости фермы
1	Пояса, опорные раскосы и стойки, передающие опорные реакции	l	l_1
2	Прочие элементы ферм, кроме указанных в пп. 3—8	$0{,}8l$	l
3	Элементы решетки ферм из одиночных уголков и ферм с прикреплением элементов решетки к поясам впритык	$0{,}9l$	l
4	Элементы решетки ферм из замкнутых профилей с прикреплением элементов решетки к поясам впритык	$0{,}9l$	$0{,}9l$
5	Растянутые элементы перекрестной решетки	l	l_1
6	Сжатые элементы перекрестной решетки в случае, если оба элемента не прерываются, а поддерживающий элемент:		
	растянут	l	l
	не работает	l	$0{,}7l_1$
	сжат	l	l_1
7	Сжатые элементы перекрестной решетки в случае, если прерывается и перекрывается фасонкой только поддерживающий элемент, который:		
	растянут	l	$0{,}7l_1$
	не работает	l	l_1
	сжат	l	$1{,}4l_1$
8	Сжатые элементы перекрестной решетки в случае, если оба элемента прерываются и перекрываются фасонкой, а поддерживающий элемент растянут	l	$0{,}7l_1$

Таблица 9.36. **Расчетная длина структурных элементов конструкций**

№ п/п	Элемент конструкции	Расчетная длина
1	Неразрезные (не прерывающиеся в узлах) пояса и элементы, прикрепляемые в узлах сваркой впритык к шаровым или цилиндрическим узловым элементам	$0{,}85l$
2	Из одиночных уголков, прикрепляемые в узлах одной полкой сварными фланговыми швами:	
	$l/i_{min} \leqslant 90$	l
	$90 < \frac{l}{i_{min}} \leqslant 120$	$0{,}9l$
	$120 < \frac{l}{i_{min}} \leqslant 150$ (только для элементов решетки)	$0{,}75l$
	$150 < \frac{l}{i_{min}} \leqslant 200$ (только для элементов решетки)	$0{,}7l$
3	Прочие элементы	l

Таблица 9.37. **Предельная гибкость элементов конструкций**

№ п/п	Элемент конструкции	Состояние		
		сжатые	растянутые при нагрузке	
			статической	динамической
1	Пояса, опорные раскосы и стойки, передающие опорные реакции: плоских ферм, структурных и пространственных конструкций высотой до 50 м из труб или парных уголков	180—60α	400	250
	пространственных конструкций высотой свыше 50 м из труб или парных уголков, а также пространственных конструкций из одиночных уголков	120	400	350
2	Верхние пояса ферм, не закрепленные в процессе монтажа	220 (после завершения монтажа по п. 1)	—	—
3	Прочие элементы плоских ферм, сварных пространственных и структурных конструкций из труб, парных и одиночных уголков	210—60α	400	350
4	Основные колонны	180—60α	—	—
5	Второстепенные колонны (стойки фахверка, фонарей и т. п.), элементы решетки колонн	150	—	—
6	Элементы вертикальных связей между колоннами ниже подкрановых балок	150	300	300
	Прочие элементы связей, а также стержни, служащие для уменьшения расчетной длины сжатых стержней, и другие ненагруженные элементы, кроме указанных в п.8	200	400	400
8	Элементы пространственных конструкций таврового и крестового сечений, подверженные воздействию ветровых нагрузок, при проверке гибкости в вертикальной плоскости (ненагруженные элементы следует рассматривать как сжатые)	150	—	150
9	Пояса и опорные раскосы опор ЛЭП	—	—	250
10	Прочие элементы опор ЛЭП, кроме указанных в п. 9 и 11	—	—	350
11	Растянутые тяги траверс опор ЛЭП из одиночных уголков	—	—	150

Расчетные длины элементов структурных конструкций. Расчетные длины l_{ef} элементов структурных конструкций определяют исходя из их геометрических длин l, равных расстоянию между узлами системы (табл. 9.36). При определении гибкости стержней радиусы инерции следует принимать относительно оси, параллельной или перпендикулярной плоскости изгиба, для сжато-изгибаемых элементов и относительно оси наименьшей жесткости — в остальных случаях.

Предельные гибкости элементов. Предельные гибкости сжатых элементов (табл. 9.37, пп. 1, 3, 4) установлены в зависимости от коэффициента $\alpha = N/\varphi AR_y \geq 0{,}5$, характеризующего уровень расчетных напряжений. В необходимых случаях — при наличии изгибающих моментов или эксцентриситетов приложения силы — вместо коэффициента φ при определении α следует принимать φ_e.

Для растянутых элементов предельные гибкости зависят от характера воздействия нагрузки на конструкцию. Предельные гибкости, как для случая динамического нагружения, следует принимать для элементов, рассчитываемых на выносливость или с учетом коэффициентов динамичности. При статическом нагружении гибкость растянутых элементов достаточно проверить только в вертикальных плоскостях. Гибкость предварительно напряженных растянутых элементов не ограничивается.

Если элемент в процессе эксплуатации конструкции воспринимает знакопеременные усилия, то предельную гибкость следует принимать, как для сжатого стержня.

9.3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

9.3.1. Организация проектирования

Здания и сооружения проектируются на основании заданий на проектирование, которые составляются по утвержденной схеме развития и размещения соответствующей отрасли народного хозяйства в стране. В задании устанавливаются требования по внедрению новой техники и передового опыта, а также показатели по эффективности капитальных вложений, снижению материалоемкости и трудоемкости строительства.

Проектирование выполняется в одну или две стадии [7, 8]. В одну стадию проектируются предприятия и сооружения, которые будут строиться по типовым или повторно применяемым проектам, а также технически несложные объекты — в этом случае разрабатывается только рабочий проект. При проектировании в две стадии разрабатывается проект и рабочая документация. Стадийность разработки проектной документации устанавливается заказчиком в задании на проектирование. На стадии проекта дается краткое описание и обоснование архитектурно-строительных решений и целесообразности применения металлических конструкций, определяется основная конструктивная схема сооружения, подбираются соответствующие типовые конструкции, а также разрабатываются основные чертежи, планы и разрезы со схематическим изображением основных несущих и ограждающих конструкций.

В состав рабочей документации входят пояснительная записка, рабочие чертежи КМ (конструкции металлические) и деталировочные чертежи металлических конструкций КМД.

Чертежи КМ выполняются проектной организацией на основании утвержденного проекта. В рабочих чертежах КМ решаются все вопросы компоновки металлических конструкций и увязки их с технологическими процессами, архитектурно-строительными и другими частями проекта. В состав КМ входят данные о нагрузке, необходимые расчеты, общие компоновочные чертежи, схемы расположения частей конструкций с таблицами сечений элементов, расчеты и чертежи наиболее важных узлов конструкций и полная спецификация металла по профилям. По чертежам КМ заказывается металл и разрабатываются деталировочные чертежи КМД. Во всех чертежах, где указаны расположение и маркировка деталей конструкций, даются таблицы сечений, содержащие марку элемента, эскиз сечения, состав сечения и усилия. В случае

применения типовых узлов и нормалей разрешается заменять чертежи узлов ссылкой на соответствующие материалы. Используемые типовые материалы прилагаются к комплекту чертежей КМ. Все размеры даются в миллиметрах. Отметки в чертежах даются относительно уровня, принятого за ноль. Данные спецификации приводятся без учета отходов и припусков на обработку. В пояснительной записке к КМ и примечаниях указываются общая характеристика конструкций, характеристика видов заводских и монтажных соединений, масса конструкций (общая и по отдельным группам).

Чертежи КМД, как правило, разрабатываются в конструкторском бюро завода-изготовителя металлических конструкций с учетом технологических особенностей завода (станки, поточные линии, сварочное оборудование и т. п.).

Деталировочные чертежи включают графическое изображение отправочных марок, геометрическую схему для расчета конструкций, спецификацию деталей для каждой отправочной марки с указанием марки стали, таблицы отправочных элементов, примечания, касающиеся изготовления конструкций. К массе всех деталей отправочных элементов прибавляется в сварных конструкциях масса наплавочного металла в количестве 1—1,5 % от массы конструкции или в количестве, подсчитанном по фактическим размерам швов.

9.3.2. Типизация стальных конструкций

Типизация конструкций или разработка типовых конструкций на основе общих для конструкций (сооружений) технических характеристик является одним из методов стандартизации. Стандартизация — процесс установления и применения стандартов. Стандарт — норма, эталон, модель, принимаемая за исходные данные для сопоставления с ними других подобных объектов. В зависимости от конструктивной формы и технологического процесса изготовления определяют три области типизации. Первая область — типизация элементов конструкций массовых зданий с унифицированными параметрами. Вторая область — типизация узлов, предназначенных для всех тех случаев, когда не представляется возможным использовать типовые элементы. В этом случае типизация выполняется не только проектными организациями, но и конструкторскими бюро заводов-изготовителей. Третьей областью типизации является область разработки типовых зданий и сооружений в целом (башни, резервуары и др.). Типовые конструкции предназначаются, как правило, для поточного изготовления. В типовых конструкциях целесообразно использование экономических профилей и стали повышенной и высокой прочности [8].

Типизация дает возможность уменьшить число типоразмеров, что снижает трудоемкость изготовления, т. е. требует унификации элементов конструкций (унификация — рациональное сокращение числа объектов одинакового функционального назначения или приведение различных элементов конструкций к наименьшему числу типоразмеров, марок, форм). Унификация — один из видов стандартизации. Однако унификация приводит к увеличению общего расхода металла на строительство сооружения. Следовательно, снижение трудоемкости должно быть таким, чтобы затраты на перерасход металла были меньше экономии, полученной за счет снижения трудоемкости изготовления и монтажа типовой конструкции по сравнению с индивидуальной. Определяющим критерием целесообразности решения является обобщающий критерий — приведенные затраты.

Проблемой типового проектирования является поиск путей уменьшения типоразмеров. Факторы, определяющие число типоразмеров, разделяются на две группы. К первой группе относятся факторы, определяющие влияние числа нагрузок (т. е. зависимость массы от числа нагрузок). Вторую группу составляют факторы, определяющие влияние размера и формы конструктивных элементов (шаг стропильных ферм, шаг рам, уклон кровли, унификация узлов опирания, форма сечения элементов и т. п.), а также применяемых материалов.

Проблемой является оптимизация типовых конструкций в зависимости от числа и характера нагрузок и установление градаций сортамента типовых конструкций, обеспечивающих минимальное превышение расхода стали по сравнению с индивидуальными. Типовым проектам таких сооружений должны предшествовать типовые решения технологических процессов (типовые проекты технологии изготовления).

Развитие типизации конструкций перспективно с переходом на изготовление конструкций на высокомеханизированных поточных линиях. В этих условиях типизация конструкций является главным направлением в развитии индустриализации строительства.

9.3.3. Основы формообразования стальных конструкций

Конструктивная форма здания (сооружения), т. е. взаимное расположение частей (элементов) здания, их количество, размеры и форма каждого элемента, вид соединений отдельных элементов, определяется в процессе проектирования на основе трех основных принципов: 1) наибольшая экономия материала; 2) наименьшая трудоемкость изготовления; 3) наибольшая скорость монтажа.

Конструктивная форма должна прежде всего соответствовать своему назначению. Стальные конструкции различных зданий (жилой дом, общественное здание, промышленное здание и т. п.) имеют различные конструктивные формы. Стальные конструкции, предназначенные для восприятия внешних усилий (нагрузок,) должны обеспечивать нормальное выполнение технологического процесса. Наиболее существенно при этом правильно выбрать объемно-планировочное или объемно-пространственное решение здания. В объемно-планировочном (объемно-пространственном) решении должны найти отражение параметры конструктивной формы, функциональность, последовательность технологического процесса при эксплуатации здания, транспортная схема обслуживания оборудования и другие факторы данной структуры производства, условий эксплуатации конструкций, жизнедеятельности персонала и т. п. Такие факторы, как инженерные критерии (индустриальность, масса конструкций, возможность поточного изготовления конструкций и др.), являются вторичными по отношению к объемно-планировочному решению.

При проектировании следует учитывать следующее: 1) экономию металла; металл следует применять только в тех случаях, когда его замена другими материалами нерациональна; 2) транспортабельность отправочных элементов; в проекте должна быть предусмотрена перевозка их целыми или по частям с применением соответствующих транспортных средств; 3) технологичность конструктивной формы; конструкция должна проектироваться с учетом требований технологии изготовления и монтажа с ориентацией на наиболее современные и производительные технологические приемы, обеспечивающие максимальное снижение трудоемкости; 4) долговечность конструкции, определяемую сроками физического и морального износа; 5) эстетичность конструкц определяемую гармоничностью форм.

Основным показателем при выборе конструктивной формы сооружения (за исключением особых сооружений) является экономичность предложенного конструктивного решения, определяемая приведенными затратами [2]. При оценке экономичности предложенной конструктивной формы определяется прежде всего стоимость металла, которая является главной составляющей общей стоимости конструкции. Поэтому основным направлением удешевления конструкций служит снижение их массы. Последнее может быть достигнуто уменьшением массы как основных элементов за счет целесообразно выбранной их конструктивной формы, так и элементов конструктивного оформления (фасонок, накладок и др.), определяющих величину строительного коэффициента. Строительный коэффициент — отношение фактической массы (с учетом конструктивного оформления) к теоретической массе, подсчитанной по площади поперечного сечения элемента без учета конструктивного оформления. Строительный коэффициент характеризует качество конструктивной формы не только с точки зрения затрат металла, но также и с точки зрения

технологичности ее изготовления и сроков возведения сооружения [7].

Основным путем снижения величины конструктивного коэффициента является улучшение конструктивно-планировочного решения на основе принципов концентрации металла и упрощения конструктивной формы, обеспечивающего технологичность изготовления, а также путем правильного выбора решения узлов и сопряжений.

Принцип концентрации металла, т. е. сокращение общего числа элементов за счет уменьшения количества маломощных и увеличения сечения более мощных элементов, способствует снижению общего расхода металла. Примером может служить снижение массы металла при увеличении шага рам при достаточно большой высоте колонн или уменьшение общего расхода стали на резервуары, при заданной емкости парка резервуаров, при наличии малого количества резервуаров большой емкости, по сравнению со случаем большого числа резервуаров малой емкости.

Снижение расхода стали может быть получено также при условии максимально возможного совмещения функций различных элементов конструкций (например, совмещение подкрановой балки с подстропильной фермой или совмещение ограждающих и несущих конструкций), а также за счет блочного решения покрытий и др.

Металлоемкость конструкций снижается при применении сталей повышенной и высокой прочности. Однако при этом следует учитывать рациональную область применения той или иной стали (например, элементы большой гибкости, работающие на продольный изгиб, не выгодно проектировать из сталей повышенной и высокой прочности). Оценка эффективности применения различных марок сталей в конструкциях выполняется по критериям: масса, стоимость материала «в деле», приведенные затраты.

Затраты на изготовление конструкций определяются технологичностью последних. Технологичность конструкций — это совокупность свойств, проявляемых в возможности минимальных затрат труда, расходов при изготовлении, транспортировании, монтаже и эксплуатации однотипных конструкций. Отработка конструктивной формы на технологичность — это комплекс мероприятий по обеспечению в рабочих проектах (КМ) и деталировочных чертежах (КМД) необходимого уровня технологичности конструкции, достижения оптимальных качественных и количественных характеристик по изготовлению, транспортированию, монтажу и эксплуатации. При оценке технологичности рекомендуется учитывать следующие основные требования [7,8]: 1) достижение наименьшей стоимости и экономного расхода металла путем применения наиболее экономичных профилей проката, эффективных и надежных категорий поставки сталей, а также применения металлопроката стандартных размеров; 2) выработка таких конструктивных решений, при которых сварные швы и болтовые соединения располагались бы в местах, удобных для производства работ и доступных для контроля качества в процессе изготовления и монтажа, а также при эксплуатации сооружения; 3) в сварных конструкциях создание условий для выполнения всех швов, обеспечивающих наименьшие остаточные сварочные напряжения и деформации; 4) рациональная разбивка сооружения на транспортабельные отправочные элементы; 5) учет наличия допусков, установленных соответствующими нормативными документами на металлопрокат, изготовление и монтаж конструкций, и их влияния на конечную точность геометрических параметров сооружения; для соблюдения этого условия принимают конструкции монтажных узлов, способных погашать неточности проката, изготовления, монтажа, в необходимых случаях повышенной точности изготовления деталей и элементов конструкций достигают путем строжки деталей и элементов конструкций, фрезеровки торцов и других операций; 6) обеспечение надежной эксплуатации в течение всего срока службы сооружения, минимальных затрат на ремонт при эксплуатации, возможности реконструкции или усиления конструкций; для зданий и сооружений, в которых возможен рост нагрузок при эксплуатации, возможность, как правило, без демонтажа конструкций быстрой и экономичной реконструкции и усиления; 7) обеспечение предпосылок для применения такой технологии изготовления и таких способов монтажа, которые не снижали бы усталостную прочность и несущую способность конструкций и не вызывали бы их склонности к хрупким разрушениям.

Возможности создания прогрессивных конструктивных форм. Развитие конструктивной формы базируется на использовании всех достижений науки и техники с целью создания экономичных сооружений, соответствующих всем предъявляемым к ним требованиям.

При проектировании используется ряд возможностей получения прогрессивных конструктивных форм. Такими возможностями являются [2]: 1) использование сталей повышенной и высокой прочности; 2) дальнейшее развитие способов соединения элементов конструкций; 3) создание и применение эффективных горячекатаных и гнутосварных тонкостенных профилей и др.; 4) автоматизация процессов изготовления конструкций, применение механизации и электронного управления; использование высшего уровня индустриализации, при котором процесс монтажа конструкций на месте строительства превращается в процесс сборки или установки конструкций из крупных блоков; 5) применение ЭВМ при проектировании, позволяющее проанализировать большое число вариантов, установить влияние различных факторов на решение конструкции и выявить тип конструкции с высокими технико-экономическими показателями.

Поиск рациональной конструктивной формы базируется на ряде идей. К ним относятся: идея регулирования напряжений в процессе монтажа и эксплуатации, реализуемая прежде всего в предварительно напряженных конструкциях; идея использования металла в условиях работы, наиболее выгодной для металла,— растянутые стержни и растянутые поверхности; идея минимальных затрат на монтаже (складывающиеся конструкции).

Идея предварительного напряжения в стальных конструкциях реализуется при создании напряжений, уравновешивающихся внутри объема конструкции, что достигается созданием в конструкциях усилий, обратных по знаку усилиям от эксплуатационных нагрузок. Предварительное напряжение конструкций повышает область их упругой работы, снижает величину деформаций (прогибов), расширяет область применения высокопрочных сталей, а в некоторых случаях является единственно возможным способом усиления сооружений. Выбор способа предварительного напряжения зависит от конструктивной формы, действующих нагрузок и других факторов и определяется экономическими требованиями, а также основными требованиями предельных состояний (прочности, устойчивости, деформативности). В настоящее время созданы новые предварительно напряженные конструкции широкой номенклатуры. Однако следует иметь в виду, что предварительно напряженные конструкции при значительных циклических нагрузках и значительных пластических деформациях должны быть проверены на малоцикловое воздействие.

Идея растянутых поверхностей и стержней реализована в висячих конструкциях (тросовых) и висячих оболочках.

Складывающиеся конструкции целесообразно применять во временных сооружениях; они изготовляются на заводе, складываются в виде габаритной отправочной единицы-марки, а на монтаже (на месте строительства) расправляются, принимая проектное положение.

Оптимизация конструктивной формы. Конструктивное решение сооружения (здания), как правило, вариантно. Задачей оптимизации конструктивной формы является выбор наилучшего из возможных решений. Синтезирующим критерием может быть приведенная стоимость сооружения (приведенные затраты) при полном удовлетворении технологических требований к зданию и обеспечению достаточной его надежности. Наиболее эффективный путь оптимизации конструктивной формы зданий — это выбор рациональной конструктивной схемы, возможной для проектируемого объекта, с наиболее полным использованием прочности всего объема материала в конструкциях [4].

Оптимизация конструкций производится поэтапно. Первый этап — вариантное проектирование. Путем интуитивной

оценки выбирают несколько возможных вариантов и сравнивают технико-экономические показатели, составленные по выбранным вариантам. На этом этапе ЭВМ используется как счетное устройство.

Второй этап — дополнение программ расчета блоками конструирования и изменения геометрических (или жесткостных) параметров, которые обеспечивают оптимизацию полученного решения. При этом алгоритмы решения могут быть самыми различными, начиная от организации выбора варианта и кончая математически строгой постановкой той или иной частной оптимизационной задачи.

Третий этап — математически строгое решение оптимизационной задачи в целом. Основой для автоматизированного проектирования могут быть различные варианты методов математического программирования [7, 9, 10]. В настоящее время в практику проектирования внедряются системы автоматического проектирования, которые предусматривают автоматическое выполнение всего комплекса проектных работ, включая вычерчивание чертежей.

Оптимизация конструктивной формы учитывает степень заводской готовности, возможность укрупнительной сборки, ориентируясь на конкретную конструктивную форму, использование прогрессивных типов монтажных соединений и т. п. После выбора оптимального варианта по массе и трудоемкости изготовления проводится работа по выявлению основных факторов, определяющих надежность конструкции, включая технологические и транспортные факторы, а также способность конструктивной формы противостоять хрупкому разрушению. Окончательный выбор расчетной схемы производится с учетом приведенных затрат.

После выбора конкретной конструктивной формы окончательно принимается (анализируется и уточняется) расчетная схема с учетом параметров и методов расчета. Расчетная схема упрощается путем исключения факторов, которые несущественно влияют на работу конструкции. Далее происходит обратный переход к конструктивной схеме с целью установления соответствия последней требованиям прочности и надежности. Оценка надежности конструктивной формы производится по двум направлениям: 1) оценка механической (прочностной) надежности сооружения методами математической теории надежности и путем исследования работоспособности конструкции при изменении ее расчетной схемы; 2) оценка гибкости конструктивной формы с точки зрения ее работоспособности при возможном изменении эксплуатационных нагрузок и других условий эксплуатации. При оптимизации конструктивной формы должна быть учтена ее долговечность. Долговечность конструкции определяется ее физическим износом (потерей работоспособности вследствие коррозии, развития трещин, чрезмерных деформаций) и моральным износом вследствие изменения технологического процесса, происходящего внутри здания. Морально устаревшая конструкция не может обеспечить нормального выполнения технологического процесса внутри здания, т. е. она теряет свое основное назначение. При оптимизации конструктивной формы следует по возможности приблизить моральную долговечность к ее физической долговечности.

Рассматривая надежность как вероятностную функцию, можно считать взаимодействие конструкции с внешней средой и ее поведение случайным процессом. Для выбора оптимального решения на ЭВМ необходимо проводить сравнение принятых целевых функций. В качестве целевых функций могут быть приняты масса металла, трудоемкость изготовления, трудоемкость монтажа, скорость возведения сооружения и стоимость. Целевая функция массы металла должна быть выражена аналитически с помощью уравнений строительной механики. Если целевая функция включает технологические параметры, она должна быть задана с помощью экономической модели, характеризующей тот или иной вариант конструктивного решения. В процессе оптимизации конструктивной формы эффективно используется САПР при разработке типовых конструкций и их элементов. Целевые функции учитывают изменение массы конструкций при дискретном назначении ее размеров, а также размеров и профилей отдельных элементов, характера доминирующей нагрузки.

В задачу оптимизации при разработке типовых конструкций входит установление градации сечений стержней и рационального числа типоразмеров, обоснование комплектации унифицированных сортаментов с оптимальной градацией сечений стержней, а также выявление закономерности статистического распределения усилий в конструкциях.

Оптимизация конструктивной формы является составной частью автоматического проектирования типовых конструкций. При проектировании конструкций индивидуального назначения современные методы оптимального проектирования проявляют свои возможности в наилучшей степени [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Глава 1

1. *Аснис А. Е., Иващенко Г. А.* Повышение прочности сварных конструкций.— Киев : Наук. думка, 1985.— 256 с.

2. *Строительные* нормы и правила. Нормы проектирования. Стальные конструкции.— Ч. 2; гл. 23. СНиП П-23—81*.— ЦИТП Госстроя СССР.

3. *Мельников Н. П., Гладштейн Л. И.* Перспективы использования высокопрочной стали в строительных металлоконструкциях // Материалы по металл. конструкциям.— М. : Стройиздат, 1975.— С. 53—79. (ЦНИИпроектстальконструкция, вып. 18).

4. *IIW*. Doc. IX-535—67.— 1967.

5. *Хашимато У., Инагаки М.*// Автомат. сварка.— 1967.— № 8.— С. 26; № 9.— С. 8.

6. *Yurioka N., Ohsita S., Tamehiro H.* Pipeline Welding. AWRA symp. March.— 1981, N 1.— 80 s.

7. *Лоренц К., Дюрен К.* Эквивалент углерода как оценка свариваемости сталей для труб большого диаметра // Тр. VII совмест. сов.-западногерм. симпоз. с концерном «Манесманн АГ» по трубам большого диаметра.— М. : Мин. стр-ва предприятий нефт. и газ. пром-сти, 1982.— С. 67—77.

8. *Гладштейн Л. И., Литвиненко Д. А.* Высокопрочная строительная сталь.— М. : Металлургия, 1972.— 240 с.

9. *Бакши О. А.* О напряженном состоянии мягких прослоек в сварных соединениях при растяжении (сжатии) // Вопр. свароч. пр-ва.— Челябинск, 1965.— С. 5—26. (Тр. Челяб. политехн. ин-та.— Вып. 33).

10. *Шоршолов М. Х., Чернышова Т. А., Красовский А. И.* Испытания металлов на свариваемость.— М. : Металлургия, 1972.— 240 с.

11. *Макаров Э. Л.* Холодные трещины при сварке легированных сталей.— М. : Машиностроение, 1981.— 248 с.

12. *Копельман Л. А.* Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению.— Л. : Машиностроение, 1978.—231 с.

13. *Мешков Ю. Я.* Физические основы разрушения стальных конструкций.— Киев : Наук. думка, 1981.— 248 с.

14. *Гладштейн Л. И., Ларионова Н. П.* Влияние величины зерна феррита на характеристики деформирования и разрушения строительной стали // Пробл. прочности.— 1982.— № 7.— С. 68—75.

15. *Cheviet A., Grumbach M., Prudhomme M., Sanz G.* Comparaison des resultats de divers essais de rapture frgile // Rev. de Metallurgie.— 1970.— N 3.— P. 217—236.

16. *Васильченко Г. С., Кошелев П. Ф.* Практическое применение механики разрушения для оценки прочности конструкций.— М. : Наука, 1974.— 147 с.

17. *Работнов Ю. Н., Васильченко Г. С. и др.* Метод расчета конструкций на сопротивление хрупкому разрушению // Изв. АН СССР. Машиностроение.— 1976.— № 1.— С. 62—68.

18. *Гладштейн Л. И., Литвиненко Д. А., Онучин Л. Г.* Структура аустенита и свойства горячекатаной стали.— М. : Металлургия, 1983.— 112 с.

19. *Ицкович Г. М.* Раскисление стали и модифицирование неметаллических включений.— М. : Металлургия, 1981.— 296 с.

20. *Лихтарников Я. М.* Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций.— М. : Стройиздат, 1979.— 319 с.

21. *Кузнецов В. В., Богатова И. В., Гладштейн Л. И., Стрелецкий Д. Н.* Об оценке экономической эффективности применения в металлоконструкциях сталей повышенной и высокой прочности // Пром. стр-во.— 1983.— № 9.— С. 11—13.

22. *Латаш Ю. В., Медовар Б. И.* Электрошлаковый переплав.— М. : Металлургия, 1970.— 239 с.

23. *Шнеерсон Я. А., Вихлевщук В. А.* Полуспокойная сталь.— М. : Металлургия, 1973.— 367 с.

24. *Непрерывная* разливка стали : Темат. сб. науч. тр.— М. : Металлургия, 1989.— 137 с.

25. *Литвиненко Д. А., Погоржельских В. И., Матросов Ю. И. и др.* Контролируемая прокатка.— М. : Металлургия, 1980.— 184 с.

26. *Нестеров Д. К., Рудюк С. И., Коваленко В. Ф. и др.* Исследование уровня качества и обеспечение производства проката, дифференцированного по механическим свойствам // Повышение эффективности производства и применения проката : Обзорная информация. Черная металлургия.— М. : Черметинформация, 1989.— С. 1—38.

27. *Кузнецов В. В., Беляев В. Ф., Гладштейн Л. И., Стрелецкий Ф. Н.* Перспективные требования к металлопрокату строительных сталей // Разработка и исследование стали для металлических конструкций.— М. : ЦНИИпроектстальконструкция, 1988.— С. 5—13.

28. *Полуспокойные* стали для строительных металлических конструкций.— М. : Стройиздат, 1976.— 215 с. (Сб. тр. ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко).

29. *Гольдштейн М. И., Гринь А. В., Блюм Э. Э., Панфилов Л. М.* Упрочнение конструкционных сталей нитридами.— М. : Металлургия, 1970.— 222 с.

30. *Мельников Н. П., Гладштейн Л. И.* Стали с карбонитридным упрочнением // Вестн. АН СССР.— 1978.— № 6.— С. 80—88.

31. *Стародубов К. Ф., Узлов И. Г., Савенков В. Я. и др.* Термическое упрочнение проката.— М. : Металлургия, 1970.— 368 с.

32. *Кугушин А. А., Черненко В. Т., Бабич В. К. и др.* Повышение прочности и хладостойкости угловых профилей путем термического упрочнения с прокатного нагрева // Сталь.— 1986.— № 6.— С. 72—77.

33. *Empfehlungen* zun vermeiden von terrassenbruehen in geschweissten Konstruktionen aus Baustahl // Deutscher Ausschuss für stanlban.— Richtlinie 014. См. также: *Поповский Б. В., Лебедев Б. Ф.* О предотвращении слоистого растрескивания // Монтаж и спец. работы в стр-ве.— 1988.— № 3.— С. 17—20.

34. *Мельников Н. П., Гладштейн Л. И., Гавриленко Л. Г. и др.* Сталь с карбонитридным упрочнением электрошлакового переплава для крупногабаритных сосудов давления // Сталь.— 1982.— № 12.— С. 65—69.

35. *Гладштейн Л. И., Лактюшин В. С.* Применение атмосферостойких сталей без защитных покрытий в строительных конструкциях : Обзорная информация. Строитель.

ство и архитектура.— М. : ЦИНИС Госстроя СССР, 1979.— Вып. 6.— 52 с. (Сер. Строительные материалы, изделия и конструкции).

36. *Гладштейн Л. И., Демыгин Н. Е.* Применение никелевых хладостойких сталей в сварных листовых конструкциях для хранения и транспортировки сжиженных газов : Обзорная информация. Строительство и архитектура.— М. : ВНИИИС Госстроя СССР, 1985.— Вып. 4.— 80 с.— (Сер. 8).

37. *Иващенко Г. А., Бут В. С.* Свариваемость низколегированной полуспокойной стали 15Г2АФДпс // Свариваемость полуспокойных сталей.— Киев : ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1976.— С. 71—78.

38. *Иващенко Г. А., Аснис А. Е., Маркашова Л. И.* Влияние термического цикла на структуру зоны термического влияния стали 15Г2АФ с низким содержанием кремния // Автомат. сварка.— 1982.— № 7.— С. 22—25.

39. *Иващенко Г. А., Аснис А. Е., Бут В. С.* Испытания конструкционных сталей на склонность к слоистому растрескиванию // Там же.— 1983.— № 2.— С. 52—54.

40. *Малокремнистая* низколегированная сталь повышенной прочности и хладостойкости для ответственных сварных конструкций / В. А. Вихлевщук, А. С. Стороженко, А. Е. Аснис, Г. А. Иващенко и др.// Там же.— 1987.— № 2.— С. 38—41, 44.

41. *Разупрочнение* термически упрочненной с прокатного нагрева стали ВСт3сп при сварке / М. Н. Чаленко, Ю. В. Демченко, Г. А. Иващенко, Г. В. Жемчужников // Там же — 1988.— № 9.— С. 46—49.

42. *Михайлов К. В.* Проволочная арматура для предварительного напряженного железобетона.— М. : Стройиздат, 1964.— 190 с.

43. *Мулин Н. М.* Стержневая арматура железобетонных конструкций.— М. : Стройиздат, 1974.— 232 с.

44. *Кугушин А. А., Узлов И. Г., Калмыков В. В. и др.* Высокопрочная арматурная сталь.— М. : Металлургия, 1986.— 272 с.

Глава 2

1. *Сварка* в машиностроении : Справочник. Т. 1 / Под ред. Н. А. Ольшанского.— М. : Машиностроение, 1978.— 504 с.

2. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б. Е. Патона.— М. : Машиностроение, 1974.— 768 с.

3. *Аснис А. Е., Гутман Л. М., Покладий В. В. и др.* Сварка в смеси активных газов.— Киев : Наук. думка, 1982.— 246 с.

4. *Welding* Handbook. Vol. 2.— 7th Ed.— AWS, 1978.— 592 p.

4а. *Справочник* по сварке. Т. 2 / Под ред. Е. В. Соколова.— М. : Машгиз, 1962.— 664 с.

5. *Welding* Handbook. Vol. 1.— 7th Ed.— AWS, 1987.

6. *Gourd L. M.* Principles of welding technology.— 2nd ed. — 1986.— 234 p.

7. *Грабин В. Ф.* Металловедение сварки плавлением.— Киев : Наук. думка, 1982.— 416 с.

8. *Касаткин Б. С., Мусияченко В. Ф.* Сварные конструкции из высокопрочных низколегированных сталей // Сварка и специальная электрометаллургия.— Киев : Наук. думка, 1984.— С. 53—60.

9. *Мусияченко В. Ф.* Свариваемость и технология сварки высокопрочных сталей.— Киев : Наук. думка, 1983.— 68 с.

10. *Порошковые* проволоки для электродуговой сварки : Каталог-справочник / Под ред. И. К. Походни.— Киев : Наук. думка, 1980.— 180 с.

11. *Антонов И. А.* Газоплазменная обработка металлов.— М. : Машиностроение, 1976.— 264 с.

12. *Головченко В. С., Доброленский В. П., Мисюров И. П.* Тепловая резка металлов в судостроении.— Л. : Судостроение, 1975.— 272 с.

13. *Золотарев И. А., Окара В. Г., Коваленко И. И.* Производство стальных сварных конструкций.— Днепропетровск : Промінь, 1976.— 118 с.

14. *Изготовление* сварных конструкций: Справочник монтажника / Под ред. В. М. Краснова.— М. : Стройиздат, 1978.— 335 с.

15. *Коваленко В. С., Романенко В. В., Олещук Л. М.* Малоотходные процессы резки лучом лазера.— Киев : Техніка, 1987.— 112 с.

16. *Автоматические* комплексы и кузнечно-прессовые машины, оснащенные средствами механизации и автоматизации : Каталог.— М. : ВНИИТЭМР, 1987.— 182 с.

17. *Машины,* установки и аппаратура для газопламенной обработки металлов : Каталог / Под ред. К. В. Васильева.— М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1986.— 127 с.

18. *Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А.* Сварные конструкции. Технология изготовления. Автоматизация производства и проектирования сварных конструкций.— М. : Высш. шк., 1983.— 344 с.

19. *Рыжков Н. И.* Производство сварных конструкций в тяжелом машиностроении. Организация и технология.— 2-е изд., перераб. и доп.— М. : Машиностроение, 1980.— 375 с.

Глава 3

1. *Рыкалин Н. Н.* Источники энергии для сварки // Свароч. пр-во.— 1974, № 11.— С. 52—57.

2. *Рыкалин Н. Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке.— М. : Машгиз, 1951.— 296 с.

3. *Фролов В. В.* Теоретические основы сварки.— М. : Высш. шк., 1970.— 592 с.

4. *Сварка* в машиностроении : Справочник. Т. 1.— М. : Машиностроение, 1978.— 502 с.

5. *Сварка* в машиностроении: Справочник. Т. 3.— М. : Машиностроение, 1979.— 568 с.

6. *Патон Б. Е.* Технология электрической сварки плавлением.— М. : Машиностроение.— 768 с.

7. *Шоршоров М. Х., Чернышова Т. А., Красовский А. И.* Испытание металлов на свариваемость.— М. : Металлургия, 1972.— 240 с.

8. *Макаров Э. Л.* Холодные трещины при сварке легированных сталей.— М. : Машиностроение, 1981.— 248 с.

9. *Оценка* стойкости металла шва против образования горячих трещин при сварке магистральных трубопроводов / В. Ф. Чабуркин, Л. С. Лившиц, А. С. Рахманов и др.// Свароч. пр-во.— 1972.— № 2.— С. 12—17.

10. *Выбор* технологии сварки, обеспечивающей стойкость сварных соединений против образования холодных трещин / Э. Л. Макаров, В. Ф. Чабуркин, Л. С. Лившиц и др.// Свароч. пр-во.— 1972.— № 8.— С. 30—32.

11. *Якушин Б. Ф.* О достоверности критериев и способов оценки технологической прочности металлов в процессе кристаллизации при сварке // Свароч. пр-во.— 1971.— № 6.— С. 11—14.

12. *Касаткин Б. С., Мусияченко В. Ф.* Низколегированные стали высокой прочности для сварных конструкций.— Киев : Техніка, 1970.— 188 с.

13. *Стеклов О. И.* Прочность сварных конструкций в агрессивных средах.— М. : Машиностроение, 1976.— 200 с.

Глава 4

1. *Чулошников П. Л.* Контактная сварка.— М. : Машиностроение, 1987.— 170 с.

2. *Соколов И. И.* Газовая сварка и резка металлов.— М. : Высш. шк., 1986.— 299 с.

3. *Номенклатура* выпускаемого сварочного оборудования на 1988 год.— Завод «Электрик» им. Н. М. Шверника, 1987.— 50 с.

4. *Оборудование* для дуговой сварки: Справочное пособие / Под ред. В. В. Смирнова.— Л. : Энергоатомиздат, 1986.— 649 с.

5. *Стеклов О. И.* Основы сварочного производства.— 2-е изд.— М. : Высш. шк., 1986.— 222 с.

6. *Каталог* сварочного оборудования, серийно выпускаемого в странах — членах СЭВ.— 2-е изд./ Под ред. А. И. Чвертко.— Киев : Наук. думка, 1981.— 223 с.

7. *Номенклатурный* перечень изделий Кироваканского завода «Автогенмаш» на 1983—84 гг.— 52 с.
8. *Машины* термической резки : Проспект.— М. : ВНИИАвтогенмаш, 1985.— 8 с.
9. *Соколов М. П.* Сварочное оборудование, изготавливаемое предприятиями Минэлектротехпрома СССР. Ч. 4 // Свароч. пр-во.— 1985.— № 12.— С. 26—27.
10. *Машины*, установки и аппаратура для газопламенной обработки металлов: Каталог.— 5-е изд.— М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1986.— 126 с.
11. *Номенклатурный каталог* на освоенные и серийно выпускаемые изделия автогенного машиностроения на 1986 г.— М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1986.— 47 с.
12. *Дополнения* и изменения к Номенклатурному каталогу на освоение и серийно выпускаемые изделия автогенного машиностроения на 1987 г.— М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1987.— 8 с.
13. *Леваков В. С.* Основы котельного производства.— М. : Высш. шк., 1986.— 380 с.
14. *Сварка* и резка в промышленном строительстве.— 3-е изд./ Под ред. Б. Д. Малышева.— М. : Стройиздат, 1989.— В 2-х т.— Т. 1.— 590 с. Т. 2.— 400 с.
15. *Браткова О. Н.* Источники питания сварочной дуги.— М. : Высш. шк., 1982.— 182 с.
16. *Закс М. И.* Сварочные выпрямители.— Л. : Энергоатомиздат, 1983.— 94 с.
17. *Александров А. Г., Милютин В. С.* Источники питания для дуговой сварки.— М. : Машиностроение, 1982.— 78 с.
18. *Цукерман М. Б.* Источники питания сварочной дуги и электрошлакового процесса.— М. : Высш. шк., 1974.— 237 с.
19. *Оборудование* для механизированной дуговой сварки и наплавки / Под ред. А. И. Чвертко.— М. : Машиностроение, 1981.— 264 с.
20. *Сварочное* оборудование : Каталог-справочник. Ч. 1—8 / Под ред. А. И. Чвертко.— Киев : Наук. думка, 1968—1987.
21. *Чвертко А. И., Тимченко В. А.* Унифицированное оборудование для автоматической и механизированной дуговой сварки и наплавки.— Киев : Наук. думка, 1987.— 192 с.

Глава 5

1. *Наплавочные* материалы стран — членов СЭВ : Каталог / Под ред. И. И. Фрумина, В. Б. Еремеева.— Киев ; М. : Междунар. центр науч. и техн. информации, 1979.— 619 с.
2. *Сварочные* материалы стран — членов СЭВ : Каталог / Под ред. И. К. Походни.— Киев; М. : Междунар. центр науч. и техн. информации, 1981.— 511 с.
3. *Подгаецкий В. В., Люборец И. И.* Сварочные флюсы.— Киев : Техніка, 1984.— 167 с.
4. *Походня И. С., Суптель А. М., Шлепаков В. Н. и др.* Порошковые проволоки для дуговой сварки : Каталог-справочник / Под ред. И. К. Походни.— Киев : Наук. думка, 1980.— 180 с.
5. *Свецинский В. Г., Галинич В. И., Кушнерев Д. М. и др.* Сварочные материалы для механизированных способов дуговой сварки.— М. : Машиностроение, 1983.— 102 с.
6. *Шинкарев Б. М., Суптель А. И.* Сварка строительных металлоконструкций порошковой проволокой.— Киев : Будівельник, 1978.— 176 с.
6. *Шинкарев Б. М., Суптель А. И.* Сварка строительных металлоконструкций порошковой проволокой.— Киев : Будівельник, 1978.— 176 с.

Глава 6

1. *Махненко В. И.* Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций.— Киев : Наук. думка, 1976.— 320 с.
2. *Окерблом Н. О.* Сварочные напряжения в металлоконструкциях.— М. : Машгиз, 1950.— 140 с.
3. *Винокуров В. А.* Сварочные деформации и напряжения.— М. : Машиностроение, 1968.
4. *Ueda J., Jamakawa F.* Analisis of Thermal Elastik — Plastik stress and strain during Welding by Finite Element Method // Trans. J. Weld. Soc., 1971.
5. *Гатовский К. М., Кархин В. А.* Теория сварочных деформаций и напряжений : Учебное пособие.— Л. : Ленингр. кораблестроит. ин-т, 1980.— 331 с.
6. *Винокуров В. А., Григорьянц А. Г.* Теория сварочных деформаций и напряжений.— М. : Машиностроение, 1984.— 280 с.
7. *Masubuchi K.* Numerical Modelling of Thermal Stresses and Metal Movement During Welding / Numerical Modelling of Manufacturing Processes // The American Society of Mechanical Engineers, pvp-pB-025.— 1977, 1—18.
8. *Masubuchi K.* Analisis of Welded structures // Pergamon Press, 1980.— 642 p.
9. *Патон Е. О. и др.* Усадочные напряжения при сварке цилиндрических сосудов // Автоген. дело.— 1936.— № 5, 6.
10. *Окерблом Н. И.* Расчет деформаций сварных конструкций при сварке.— М. : Машгиз, 1950.— 150 с.
11. *Трочун И. П.* Внутренние усилия и деформации при сварке.— М. : Машгиз, 1964.— 180 с.
12. *Игнатьева В. С.* Распределение собственных напряжений в пластинах, сваренных за один проход // Свароч. пр-во.— 1956.— № 3.— С. 40—52.
13. *Касаткин Б. С., Прохоренко В. М., Чертов И. М.* Напряжения и деформации при сварке.— Киев : Вищ. шк., 1987.— 245 с.
14. *Подстригач Я. С., Пляцко Г. В., Осадчук В. А.* К определению остаточных сварочных напряжений в цилиндрических оболочках // Автомат. сварка.— 1971.— № 3.— С. 50—58.
15. *Недосека А. Я.* Влияние деформаций по толщине на остаточные напряжения в пластине со сварной точкой // Автомат. сварка.— 1973.— № 7.— С. 20—25.
16. *Талыпов Г. Б.* Сварочные деформации и напряжения.— Л. : Машиностроение, 1973.— С. 37—42.
17. *Кузьминов С. А.* Сварочные деформации судовых корпусных конструкций.— Л. : Судостроение, 1974.— 285 с.
18. *Окерблом Н. И., Деменцевич В. П., Байкова И. П.* Проектирование технологии изготовления сварных конструкций.— Л. : Судпромгиз, 1963.— С. 28—34.
19. *Рыкалин Н. И.* Расчеты тепловых процессов при сварке.— М. : Машгиз, 1951.— С. 41—46.
20. *Seyffarth P.* Schweiβ — ZTU — Schaubilder.— Berlin, 1982.— 235 S.
21. *Биргер И. А.* Расчет конструкций с учетом пластичности и ползучести // Изв. АН СССР. Механика.— 1965.— № 2.— С. 29—36.
22. *Биргер И. А., Демянушко И. В.* Теория пластичности при неизотермическом нагружении // Инж. журн., МТТ.— 1968.— № 6.— 75—80.
23. *Satoh K., Terasaki T.* Effect of Weld Heat-Input Parameters of Residual Stress Distribution in Butt Joint // IIW Colloquium «Applications of Numerical Techniques in Welding».— Dublin, 1978.
24. *Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Розынко Г. Ф., Надери Х.* Особенности в распределении остаточных напряжений и перемещений при сварке круговых швов на плоских деталях различной толщины // Автомат. сварка.— 1984.— N 1.— С. 1—4.
25. *Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А.* Сварные конструкции.— М. : Высш. шк., 1982.— 270 с.
26. *Экспериментальные методы* исследования деформаций и напряжений : Справоч. пособие.— Киев : Наук. думка, 1981.— 583 с.
27. *Антонов А. А.* Лазерная интерферометрия в задачах об остаточных напряжениях // Тр. Всесоюз. симпоз. по остат. напряжениям и методам регулирования.— М., 1982.— 412 с.
28. *Гуща О. И., Махорт Ф. Г., Черноченко А. А.* Применение акустоупругости объемных поверхностных волн для определения напряжений // Материалы III Всесоюз.

симпоз. «Технологические остаточные напряжения».— М., 1988.— С. 134—141.

29. *Биргер И. А., Козлов М. Л.* Остаточные напряжения: проблемы и перспективы // Материалы III Всесоюз. симпоз. «Технологические остаточные напряжения».— М., 1988.— С. 60—73.

30. *Большаков П. П. и др.* Портативный рентгеновский определитель напряжений ПРОН и методика для изменения макронапряжений в металле энергооборудования // Материалы III Всесоюз. симпоз. «Технологические остаточные напряжения».— М., 1988.— С. 79—83.

31. *Венгринович В. Л., Цукерман В. Л., Бусько В. Н.* Магнитошумовой метод и аппаратура для изменения напряжений в ферромагнитных материалах // Материалы III Всесоюз. симпоз. «Технологические остаточные напряжения».— М., 1988.— С. 101—105.

32. *Сагалевич В. М., Савельев В. Ф.* Стабильность сварных соединений и конструкций.— М. : Машиностроение, 1986.— 264 с.

33. *Tanaka K., Joheda J., Sakaguchi A., Kinoshita T.* Weld Distortion of Aluminium Alloy Butt Joints: An Trasverse Shrinkage // J. Light Metal Weld. Constr.— 1984.— **22**, N 2.— P. 1—9.

34. *Лобанов Л. М., Махненко В. И., Великоиваненко Е. А. и др.* О параметрах предварительного упругого выгиба применительно к сферическим оболочкам // Автомат. сварка.— 1988.— № 9.— С. 1—4.

35. *Fujita J., Nomoto T.* Welding stress and deformation analysis based on inherentstrain method // IIW Colloquium «Applications of Numerial Techniques in Welding».— Dublin, 1978.

36. *Махненко В. И., Пивторак Н. И., Байер М.* Статистические характеристики деформаций сварных балок коробчатого сечения // Автомат. сварка.— 1987.— № 8.— С. 15—17.

37. *Махненко В. И., Коротынский А. Е., Кисилевский Я. Ф. и др.* Пути повышения точности изготовления сварных металлоконструкций // Там же.— 1983.— № 12.— С. 1—6.

38. *Лобанов Л. М., Пивторак В. А.* Голографические методы исследования напряженно-деформированных состояний и контроля качества сварных конструкций // Проблемы сварки и специальной электрометаллургии.— Киев : Наук. думка, 1990.— С. 47—51.

39. *Spraragen W., Cordovi M.* Peening-Its Effect of Relief of Residual Stresses, Distortion and Mechanical Properties of Welds: A Revien of the Literature // Weld. J.— 1944.— 23 (3).

40. *Кравцов Т. Г., Рыжков И. Ф., Статников Е. Ш.* Повышение сопротивления усталости наплавленных валов ультразвуковой обработкой // Автомат. сварка.— 1981.— № 10.— С. 35—38.

41. *Махненко В. И., Кравцов Т. Г.* Толщина пластически деформированного слоя при ультразвуковой ударной обработке наплавленных изделий // Автомат. сварка.— 1986.— № 8.— С. 98—110.

42. *Павловский В. И., Пащин И. А.* Регулирование напряженно-деформированного состояния при сварке тонкостенных крупногабаритных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов // Материалы III Всесоюз. симпоз. «Технологические остаточные напряжения».— М., 1988.— С. 293—298.

43. *Патон Б. Е., Уткин В. Ф., Лобанов Л. М. и др.* Изготовление сварных крупногабаритных тонкостенных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов // Автомат. сварка.— 1989.— № 10.— С. 100—108.

Глава 7

1. *Махненко В. И., Мосенкис Р. Ю.* Расчет коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами // Автомат. сварка.— 1985.— № 8.— С. 7—18.

2. *Березовский Б. М., Бакши О. А.* Коэффициент концентрации напряжений в стыковых сварных соединениях // Вопр. свароч. пр-ва.— 1981.— № 266.— С. 3—10. (Тр. Челяб. политехн. ин-та.)

3. *Кархин В. А., Копельманн Л. А.* Концентрация напряжений в стыковых соединениях // Свароч. пр-во.— 1976.— № 2.— С. 6—7.

4. *Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А.* Сварные конструкции.— М. : Высш. шк., 1982.— 272 с.

5. *Махненко В. И., Великоиваненко Е. А.* Распределение напряжений и пластических деформаций в сечении угловых швов при статических нагрузках, близких к предельным // Автомат. сварка.— 1988.— № 6.— С. 5—13.

6. *Навроцкий Д. И.* Расчет сварных соединений с учетом концентрации напряжений.— Л. : Машиностроение, 1968.— 170 с.

7. *Teder D., Werner G.* Determination of the carrying capacity of fillet-welded lap joints by stepwise numerical procedure // IIW Colloquin «Aplication of Numerical Techniques in Welding».— Dublin, 1978.

8. *Махненко В. И., Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф.* Распределение напряжений и деформаций вдоль фланговых швов // Автомат. сварка.— 1985.— № 5.— С. 3—10.

9. *Faltus F.* Joints with fillet welds.— Academia Prague, 1985.— 300 p.

10. *Rollos A.* The Effective weld length of beam to column Connections withot Stiffing Plates // IIW.— Doc. XV.— P. 213—266.

11. *Ueda T., Kawataka H.* Fatigue strength of spot welded joint // Trans Nat. Res. Inst. Metals.— 1970.— **2**, N 5.— P. 186—199.

12. *Черепанов Г. П.* Механика хрупкого разрушения.— М. : Наука, 1974.— 640 с.

13. *Барышев В. М., Душенин Н. П.* Резервы снижения расхода наплавленного металла при изготовлении металлоконструкций // Монтаж. и спец. работы в стр-ве.— 1978.— № 11.— С. 24—25.

14. *Бакши О. А.* Механическая неоднородность сварных соединений : Автореф. дис. ... д-ра техн. наук.— М., 1967.— 35 с.

15. *Узлов И. Г., Савенко В. Я., Поляков С. Н.* Термическая обработка проката.— Киев : Техніка, 1981.— 159 с.

16. *Стрелецкий Н. С.* Основы методики расчета соединений по предельным состояниям // Строительство.— 1952.— № 9.— С. 5—8.

17. *Балдин В. А.* Расчет стальных конструкций по методу предельного состояния // Исслед. по стальным конструкциям.— М. : Стройиздат, 1950.— С. 7—36.

18. *Балдин В. А., Урицкий М. Р.* Обеспеченность нормативных и расчетных сопротивлений малоуглеродистой стали для строительных металлоконструкций // Пром. стр-во.— 1978.— № 7.— С. 19—21.

19. *Лившиц Л. Н.* Исследование технологических возможностей снижения удельного расхода наплавленного металла в строительных стальных конструкциях : Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Челябинск, 1979.— 22 с.

20. *Мосенкис Ю. Г.* Вопросы сварки соединений со швами уменьшенного сечения и исследование их служебных свойств : Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Киев, 1973.— 21 с.

21. *DIN 4100.* Geschweisste Stahlbauten mit rorwiegend ruheder Belastung. Berechnung und bauliche Durchbildung Deutsche // Normen, 1982.— 10 s.

22. *CM-74.* Regles de calcul des constructions en aier L'institut technique du batiment et des travaux publies.— 1974.— 315 p.

23. *ECCS-EG 77-2F.* European recomedations for steel constructions. Europena Conventions for Constructional Steelwork.— 1978.— 237 p.

24. *Данилов С. А.* Исследование прочности сварных соединений и применение результатов в судостроении.— Л. : Судостроение, 1964.— 263 с.

25. *Окерблом Н. О.* Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций.— М. : Машиностроение, 1964.— 419 с.

26. *Mobius W., Seyffarth W.* Festigkeitsversuche an Uberlappverbindungen mit stirn and flanken Kehlnahtan

schlussen // Schweisstechnik.— 1982.— N 1.— S. 36—37.

27. *Винокуров В. А., Куркин А. С.* Прочность сварных соединений с угловыми швами и метод их расчета // Свароч. пр-во.— 1981.— № 8.— С. 3—5.

28. *Formules* de calcul des assemblage soudes a des efforts statictques // Soudage et techniques connexes.— 1965.— N 3/4.— P. 147—160.

29. *Махненко В. И., Починок В. Н., Мосенкис Р. Ю. и др.* Совершенствование методов расчета сварных соединений с использованием соответствующих банков данных и персональных ЭВМ // Применение математических методов в сварке.— Киев, 1988.— С. 102—111.

30. *Махненко В. И., Ющенко К. А., Починок В. Е., Воронин С. А.* Расчетная оценка несущей способности сварных швов с неполным проплавлением // Автомат. сварка.— 1984.— № 4.— С. 1—6.

31. *СНиП 11-23—81.* Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Стальные конструкции.— М. : Стройиздат, 1982.— 93 с.

32. *Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П.* Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность.— М. : Машиностроение, 1985.— 340 с.

33. *Махненко В. И., Починок В. Е.* Сопротивление циклическим нагрузкам сварных соединений, имеющих швы с неполным проплавлением // Автомат. сварка.— 1984.— № 18.— С. 33—40.

34. *Макаров И. И., Емельянов Т. М.* Влияние технологических дефектов на долговечность и надежность сварных соединений // Надежность сварных соединений и конструкций.— М. : Машиностроение, 1967.— С. 47—63.

35. *Зайцев Г. С., Шведова Н. М.* Сопротивление усталости сварных соединений с конструктивным непроваром // Повышение прочности и долговечности деталей машин / Под ред. И. В. Кудрявцева.— М. : Машиностроение, 1969.— С. 60—64.

36. *Дубовик В. Г., Абаринов А. А.* Исследование некоторых свойств строительных сталей // Металлические конструкции (Сб. науч. тр. Челяб. политехн. ин-та).— Челябинск, 1973.— № 137.— С. 16—26.

37. *Технологическая прочность* металлов при сварке / Э. Л. Макаров, Б. Ф. Якушин // Сварка в машиностроении : Справочник. Т. 3.— М. : Машиностроение, 1979.— С. 393—435.

38. *Островская С. А.* Влияние скорости остывания на структуру и механические свойства металла шва, сваренного автоматом и полуавтоматом под флюсом и вручную качественным электродом // Автомат. сварка.— 1951.— № 6.— С. 3—22.

39. *Касаткин Б. С., Мусияченко В. Ф.* Низколегированные стали высокой прочности для сварных конструкций.— Киев : Техніка, 1970.— 188 с.

40. *Лебедев Б. Д.* Бейнитно-мартенситные структуры в металле низколегированных швов // Свароч. пр-во.— 1974.— № 10.— С. 14—16.

41. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона.— М. : Машиностроение, 1974.— 768 с.

42. *Provisional* international investigation of brittle fractures // IIW.— Doc. : IX — 407—64.— 14 p.

43. *Барышев В. М., Заморов Ю. В.* Оценка работоспособности металла сварных соединений стальных конструкций с конструктивными угловыми швами // Вопр. сварки строит. металлоконструкций.— 1981.— С. 94—107.— (Тр. ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко).

44. *Барышев В. М.* Работоспособность металла однопроходного шва при высокой скорости охлаждения при сварке // Свароч. пр-во.— 1985.— № 6.— С. 14—16.

45. *Robertson I. I.* Propogtion of brittle fracture in steel // Iron and Steel Inst.— 1953.— N 12.— P. 32.

46. *Feely F. G.* Studies of brittle failure of tonkage steel plates // Welding J.— 1965.— N 12.— P. 21.

47. *Eiber R. J., Moclure G. M.* The Oil and Gas (23 Sept. 1963).— 158 p.

48. *Masubuchi K.* Analysis of Welded structures // Pergamon Press, 1980.— 642 p.

49. *Махненко В. И., Рябчук Т. Г., Починок В. Е.* Совершенствование методов расчета на прочность сварных соединений с точечными швами // Автомат. сварка.— 1990.— № 1.— С. 9—14.

50. *Cooper E. F., Smith R. A.* Fatigue crack propogation at spot welds // Metal. Const.— 1986.— **18**, N 6.— P. 383R—386R.

51. *Ueda J., Ikeda K., Jao T. et al.* Brittee fracture initiation characteristics under bi-axial loading // Advances in Res. on Strength and Fract. Material. Vol. 2A.— Pergamon Press, 1978.— P. 173—182.

52. *Machnenko V. J., Pochinok V. E.* Minimal Kehlnahtabmessungen bei statischer Belastung // Zis Mitteilungen.— 1986.— N 9.— P. 975—993.

53. *Бурдекин Ф. М., Харрисон Дж. Д.* Альтернативные концепции упруго-пластической механики разрушения // Practical applications of fracture mechanics to the prevention of feilure of welded structures : Proc. of IIW coms IX—X Colloquium.— Bratislava, 1979.— 325 p.

54. *Brazda E., Zemen M.* A contribution to the correlation between the notch toughness and COD test results for weld metal. and heat affected zone // IIW Colloquium on Practical Applications of Tracture Mechanics.— Bratislava, 1979.— 137 p.

55. *Vasilchenko G. S., Morozov E. M., Shur D. M.* Evaluation of the bearing capacity of cracked components of welded structures // IIW Colloquium on Practical Applications of Fracture Mechanics.— Bratislava, 1979.— P. 52—58.

56. *Уэлс А. А.* Влияние остаточных напряжений на хрупкое разрушение // Разрушение / Под ред. Г. Либовица.— Т. 5.— М. : Машиностроение, 1977.— С. 399.

57. *Farrar T. C., Dolby R. E.* / Metal. Constr. and Brit. Weld J.— 1969.— **1**, N 2.— P. 32—39.

58. *Lombardini T.* Evaluation of lamellar tearing in the structural steel // IIW Doc. IX-1138—79.— 14 p.

59. *Studio* delle caratteristiche nella direzione dello spessore di lamiere di acciaio per construzioni saldate // Revista italiana della saldatura.— Italia, 1982.— **34**, N 5.— S. 49—59.

60. *Микляев П. Г., Фридман Я. Б.* Анизотропия механических свойств материалов.— М. : Металлургия, 1969.— 267 с.

61. *Георгиев М. Н.* Вязкость малоуглеродистых сталей.— М. : Металлургия, 1973.— 224 с.

Глава 8

1. *Афанасьев Н. Н.* Статистическая теория усталостной прочности материалов.— Киев : Изд-во АН УССР, 1953.— 105 с.

2. *Егобори Т.* Научные основы прочности и разрушения материалов / Пер. с яп.— Киев : Наук. думка, 1978.— 351 с.

3. *Иванова В. С., Терентьев В. Ф.* Природа усталости металлов.— М. : Металлургия, 1975.— 455 с.

4. *Коцаньда С.* Усталостное разрушение металлов / Пер. с польск.— М. : Металлургия, 1976.— 455 с.

5. *Циклическая вязкость* разрушения металлов и сплавов / Под ред. В. С. Ивановой, С. Е. Гуревич.— М. : Наука, 1981.— 199 с.

6. *Циклические деформации* и усталость металлов / Под ред. В. Т. Трощенко.— Киев : Наук. думка, 1985.— Т. 1.— 216 с.

7. *Трощенко В. Т., Покровский В. В., Прокопенко А. В.* Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении.— Киев : Наук. думка, 1987.— 251 с.

8. *ГОСТ 23207—78.* Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения.— М. : Изд-во стандартов, 1978.— 48 с.

9. *Вейбулл В.* Усталостные испытания и анализ их результатов.— М. : Машгиз, 1964.— 276 с.

10. *Трощенко В. Т.* Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении.— Киев : Наук. думка, 1981.— 343 с.

11. *IIW X111-663—72.* Evaluation par extrapolation des limites d'endurance en rapport aveck le type de la courbe

de fatigue et la probabilite de la rapture / S. V. Serensen, V. I. Troufjakow, V. I. Dvoretsky, O. I. Kramarenko.

12. *Дворецкий В. И.* Расчет ресурса сварных металлоконструкций при случайном нагружении // Надежность и долговечность машин и сооружений.— Киев : Наук. думка, 1984.— № 5.— С. 40—47.

13. *Труфяков В. И.* Усталость сварных соединений.— Киев : Наук. думка, 1973.— 216 с.

14. *IIW XIII-384—65.* Proposition on the method of fatique testing welded joints / S. Serensen, V. Trufiakov.

15. *Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М.* Несущая способность и расчет деталей машин на прочность.— Изд. 3-е.— М. : Машиностроение, 1975.— 488 с.

16. *Paris P., Gomez M., Anderson W.* A rational analytic theory of fatigue // Trend in Engineering.— 1961.— N. 13.— P. 9—14.

17. *РД 50-344—82.* Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении: Метод. указания.— М. : Изд-во стандартов, 1982.— 68 с.

18. *Одинг И. А.* Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов.— М. : Машгиз, 1962.— 260 с.

19. *Махутов Н. А.* Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность.— М. : Машиностроение, 1981.— 272 с.

20. *Прочность* материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях. В 2-х т./ Под ред. Г. С. Писаренко.— Киев : Наук. думка, 1980.— Т. 1.— 535 с.

21. *Форрест П.* Усталость металлов / Пер. с англ.— М. : Машиностроение, 1976.— 352 с.

22. *Хейвуд Р. Б.* Проектирование с учетом усталости.— М. : Машиностроение, 1969.— 504 с.

23. *Прочность* сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В. И. Труфякова.— Киев : Наук. думка, 1990.— 255 с.

24. *Бельчук Г. А.* Сварные соединения в корпусных конструкциях.— Л. : Судостроение, 1969.— 128 с.

25. *Определение* геометрии швов в тавровых соединениях / О. А. Бакши, Н. Л. Зайцев, Л. Б. Шрон, И. В. Шурова // Автомат. сварка.— 1982.— № 8.— С. 67—68.

26. *Бакши О. А., Зайцев Н. Л., Шрон Л. Б.* Влияние геометрии угловых швов на коэффициент концентрации и градиенты напряжений в тавровых соединениях // Свароч. пр-во.— 1982.— № 8.— С. 3—5.

27. *Методы* расчета циклической прочности сварных соединений / А. В. Ильин, Г. П. Карзов, В. П. Леонов и др.— Л. : ЛДНТП, 1983.— 32 с.

28. *Навроцкий Д. И.* Концентрация напряжения в сварных стыковых швах.— Л. : Машгиз, 1956.— С. 101—110 (Тр. Ленингр. политехн. ин-та, № 183).

29. *Кархин В. А., Копельман Л. А.* Концентрация напряжений в стыковых соединениях // Свароч. пр-во.— 1976.— № 2.— С. 6—7.

30. *Турмов Г. П.* Определение коэффициентов концентрации напряжений в сварных соединениях // Автомат. сварка.— 1976.— № 10.— С. 14—17.

31. *Березовский Б. М., Бакши О. А.* Коэффициент концентрации напряжений в стыковых сварных соединениях.— Челябинск.— 1981.— С. 3—10. (Тр. Челяб. политехн. ин-та, № 226).

32. *IIW XIII-1098—83.* A study on fatigue waluation of A 5083 stiffened plate structure / K. Sakai, T. Ulnuera, N. Jino.

33. *Стаканов В. И., Костылев В. И., Рыбин Ю. К.* Концентрация напряжений в стыковых сварных соединениях // Автомат. сварка.— 1987.— № 11.— С. 94—101.

34. *Махненко В. И., Мосенкис Р. Ю.* Расчет коэффициента концентрации напряжений в сварных соединениях со стыковыми и угловыми швами // Автомат. сварка.— 1985.— № 8.— С. 7—12.

35. *Statistical analyses* of fatigue strength of arc-welded joints using covered electrodes under varions welding conditions with parficular affention to their shope / M. Nihei, E. Sasaki, M. M. Inogaki // Trans. Nat. Bes. Inst. Metals.— 1981.— N 2.— P. 21—23.

36. *Труфяков В. И., Махутов Н. А.* Прочность сварных соединений при переменных нагрузках // Сварка в машиностроении : Справочник в 4-х т.— М. : Машиностроение, 1979.— Т. 3.— С. 81—111.

37. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона.— М. : Машиностроение, 1974.— 768 с.

38. *Прохоров И. И.* Физические процессы в металлах при сварке. В 2-х т.— М. : Машиностроение,1968.— Т. 2.— 599 с.

39. *Земзин В. Н., Шрон Р. З.* Термическая обработка и свойства сварных соединений.— Л.: Машиностроение, 1978.— 367 с.

40. *Клыков Н. А., Скребков А. Г.* Чувствительность сварных соединений малоуглеродистых сталей к концентрации напряжений при циклических нагрузках // Автомат. сварка.— 1967.— № 7.— С. 43—46.

41. *Кудрявцев П. И., Гельман А. С.* Влияние механической неоднородности на усталостную прочность сварных соединений // Свароч. пр-во.— 1964.— № 11.— С. 1—4.

42. *Решетов А. Л., Клыков Н. А.* Влияние неоднородности механических свойств на предел усталости сварных соединений с мягкой прослойкой // Автомат. сварка.— 1975.— № 4.— С. 8—11.

43. *Решетов А. Л., Клыков Н. А.* Влияние концентрации напряжений на усталостную прочность сварных соединений с мягкими прослойками // Вопр. свароч. пр-ва.— Челябинск, 1975.— С. 22—31. (Тр. ЧПИ, вып. 168).

44. *Кудрявцев П. И.* Определение влияния концентрации напряжений на усталостную прочность механически неоднородных сварных соединений // Машиностроение.— 1966.— № 2.— С. 68—73.

45. *IIW XIII-531—69.* Effect of external geometry of reinforcement of the fatigue strength of a welded joints / K. Takahashi.

46. *Кудрявцев П. И.* Закономерности сопротивления повторно-статическим нагружениям механически неоднородных сварных соединений // Машиноведение.— 1966.— № 2.— С. 68—73.

47. *Даунис М. А., Братенас А. П.* Сопротивление деформированию и разрушению механических неоднородных сварных соединений при малоцикловом нагружении // Пробл. прочности.— 1984.— № 2.— С. 37—42.

48. *Труфяков В. И., Якубовский В. В.* Прочность сварных соединений в области малоциклового нагружения при отнулевом растяжении // Автомат. сварка.— 1981.— № 10.— С. 1—5.

49. *Якубовский В. В.* Характеристики ограниченной долговечности стыковых соединений // Автомат. сварка.— 1986.— № 9.— С. 25—30.

50. *Винокуров В. А., Григорьянц А. Г.* Теория сварочных деформаций и напряжений.— М. : Машиностроение, 1984.— 280 с.

51. *Расчетные методы* исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций.— Киев : Наук. думка, 1976.— 320 с.

52. *Окерблом Н. О.* Сварочные напряжения в металлоконструкциях.— М.; Л. : Машгиз, 1950.— 144 с.

53. *Гуща О. И., Лебедев В. К.* Некоторые результаты применения ультразвукового неразрушающего метода измерения остаточных напряжений // Пробл. прочности.— 1973.— № 8.— С. 71—73.

54. *Кудрявцев Ю. Ф., Гуща О. И.* Некоторые закономерности изменения остаточных напряжений при циклическом нагружении в зависимости от их начального уровня и концентрации напряжений // Пробл. прочности.— 1986.— № 11.— С. 32—38.

55. *Орехов Г. Т.* Определение остаточных сварных напряжений магнитоупругим методом // Автомат. сварка.— 1974.— № 4.— С. 30—32.

56. *Труфяков В. И., Гуща О. И., Троценко В. П.* Изменение остаточных напряжений в зонах концентрации при циклическом нагружении // Пробл. прочности.— 1976.— № 12.— С. 14—17.

57. *Бакши О. А., Клыков Н. А., Романов Е. С.* О совместном влиянии концентрации напряжений, свойств металла околошовной зоны и остаточных напряжений на усталость образцов при плоском напряженном состоянии // Автомат. сварка.— 1971.— № 7.— С. 38—42.

58. *Прочность* при малоцикловом нагружении. Основы методов расчета и испытаний / С. В. Серенсен, Р. М. Шнейдерович, А. П. Гусенков и др.— М. : Наука, 1975.—285 с.

59. *Карзов Г. П., Леонов В. П., Тимофеев Б. Т.* Сварные сосуды высокого давления. Прочность и долговечность.— Л. : Машиностроение, 1982.— 287 с.

60. *Богдыль П. Т., Ларионов В. В., Бонченко Г. А.* Исследование закономерностей развития местных упругопластических деформаций в стыковых сварных соединениях методом фотоупругих покрытий // Свароч. пр-во.— 1976.— № 9.— С. 13—15.

61. *Исследование* напряженно-деформированного состояния лобовых швов нахлесточных соединений методом муаровых полос / О. А. Бакши, Н. Л. Зайцев, В. А. Маковецкий, Р. З. Шрон // Автомат. сварка.— 1974.— № 4.

62. *Шагдыр Т. Ш., Якубовский В. В.* Применение длительных сеток и муаровых полос при изучении упруго-пластического деформирования сварных соединений // Там же.— 1981.— № 7.— С. 17—21.

63. *B 55500* specification for unfired pressure vessels — British Standards Inst, 1987.— 174 p.

64. *Hobbasher A.* Design recomendations for cyclic loaded steel structures // Welding in the world.— 1982.— 20, N 7/8.— P. 153—165.

65. *IIW XIII-941—80.* Derivation of design rules for pressure vessels / Y. Harisson, S. Maddox.— 42 p.

66. *Муханов К. К., Ларионов В. В., Ханухов Х. М.* Метод оценки несущей способности сварных стальных конструкций при малоцикловом нагружении // Расчеты на прочность.— 1975.— Вып. 17.— С. 259—284.

67. *Кудрявцев П. И.* Исследование сопротивления сварных соединений повторно-статическим нагружениям // Исследования прочности сталей при циклическом нагружении в упруго-пластической области.— 1967.— С. 89—104. (Тр. ЦНИИТмаш, вып. 77).

68. *Игнатьева В. С., Кулахметьев Р. Р., Ларионов В. В.* Оценка влияния сварочных напряжений на долговечность соединений с продольными стыковыми швами в условиях малоциклового нагружения // Автомат. сварка.— 1983.— № 2.— С. 14—17.

69. *Навроцкий Д. И.* Прочность сварных соединений.— М. ; Л. : Машгиз, 1961.— 176 с.

70. *Выносливость* сварных соединений низколегированных сталей / В. И. Труфяков, Ю. А. Стеренбоген, П. П. Михеев, А. В. Бабаев // Автомат. сварка.— 1966.— № 11.— С. 1—6.

71. *РД 40-551—85.* Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Расчетно-экспериментальные методы оценки сопротивления усталости сварных соединений.— М. : Изд-во стандартов, 1986.— 52 с.

72. *Сопротивление* усталости сварных соединений углеродистых и низколегированных полуспокойных сталей / В. И. Труфяков, П. П. Михеев, А. В. Бабаев, А. З. Кузьменко // Свариваемость полуспокойных сталей.— Киев : ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1976.— С. 91—105.

73. *IIW XIII-908—78.* The change of fatigue crack stresses / V. I. Trufiakov, P. P. Mikheev, A. Z. Kuzmenko, V. V. Yakubovsky.— 21 p.

74. *Micheev P., Babaev A., Kuzmenko A.* Ermidung festigkeit von logierten halbberuhigten stahlen // Schweisstechnik.— 1978.— N 11.— S. 506—509.

75. *Макаров И. И.* Работоспособность сварных соединений с технологическими отклонениями: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук.— М., 1977.— 36 с.

76. *Weck R.* A rational approach to standards for welded construction // Brit. Weld. J.— 1966.— N 11.— P. 658—668.

77. *Newman R., Dawes M.* Exploratory fatigue tests on transwerse butt neelds containing lack of penetration // Ibid.— 1965.— N 3.— P. 117—120.

78. *IIW XIII-520—68.* The analysis of fatigue test results for bult welds with lack penetration defects using a fracture mechanics approach / H. Harrison.

79. *Бабаев А. В.* Влияние остаточных напряжений на зарождение и скорость развития усталостных трещин в сварных соединениях с непроварами // Автомат. сварка.— 1977.— № 12. — С. 30—32.

80. *Бабаев А. В.* Сопротивление усталости стыковых соединений с подрезами и остаточными напряжениями // Там же.— 1979.— № 6.— С. 3—5.

81. *Труфяков В. И.* Выносливость продольных и поперечных пористых швов // Новые проблемы сварочной техники.— Киев : Техніка, 1964.— С. 103—114.

82. *Аснис А. Е.* Вибрационная прочность сварных соединений из низколегированных и малоуглеродистых сталей при симметричном и пульсирующем циклах нагружения // Автомат. сварка.— 1951.— № 5.— С. 3—17.

83. *Перлис И. Л.* Влияние технологических факторов в стыковых швах на прочность сварных соединений.— М. : Трансжелдориздат.— 25 с. (Тр. НИИмостов, № 41).

84. *Черепанов Г. П.* Механика хрупкого разрушения.— М. : Наука, 1974.— 640 с.

85. *Махненко В. И., Починок В. Е.* Сопротивление циклическим нагрузкам сварных соединений, имеющих швы с неполным проплавлением // Автомат. сварка.— 1984.— № 10.— С. 33—40.

86. *Бабаев А. В., Кныш В. В., Лабунская Н. Ф.* Учет влияния остаточных напряжений при расчетном определении периода зарождения и развития усталостной трещины в соединениях с непроварами // Там же.— 1985.— № 1.— С. 8—10.

87. *Гуревич С. Е., Едидович Л. Д.* О скорости распространения трещины и пороговых значениях коэффициента интенсивности напряжений в процессе усталостного разрушения // Усталость и вязкость разрушения металлов.— М. : Наука, 1974.— С. 36—78.

88. *Пэрис П., Ердоган Ф.* Критический анализ законов распространения трещины // Техн. механика / Пер. с англ.— 1963.— Сер. Д, № 4.— С. 60—68.

89. *Hoeppner D., Krupp W.* Prediction of component life by application of fatigue crack growth knoweledge.— Eng. Fract. Mech.— 1974.— 6, N 1.— P. 47—70.

90. *Школьник Л. М.* Скорость роста трещин и живучесть металла.— М. : Металлургия, 1973.— 215 с.

91. *Ромвари П., Тот Л., Надь Д.* Анализ закономерностей распространения усталостных трещин в металлах // Пробл. прочности.— 1980.— № 12.— С. 18—28.

92. *Propagation* under through thickness stress fatigue crack in structural steels with varying sulphur centent / K. Kaboyashi, A. Naurumoto, T. Funakashi, I. Haira // Welding in the world.— 1977.— 9, N 10.— P. 222—236.

93. *Форман Р., Керни В., Энг О.* Численное исследование распространения трещин в циклически нагруженных конструкциях // Теорет. основы инж. расчетов / Пер. с англ.— 1967.— Сер. Д, № 3.— С. 8—16.

94. *Ярема С. Я., Микитишин С. И.* Аналитическое описание диаграммы усталостного разрушения материалов // Физ.-хим. механика материалов.— 1975.— № 6.— С. 47—51.

95. *Pearson S.* The effect of mean stress on fatigue crack propagation in holfinch thick specimens of aluminium alloys of high and low fracture tonghness // Eng. Fract. Mech.— 1972.— 4, N 1.— P. 9—31.

96. *Manson S.* Fatigue a complex subject some simple approximations // Exp. Mech.— 1965.— N 7.— P. 193—226.

97. *Lehr K., Lin H.* Fatigue crack propagation and strain cycling properties // Int. J. of Fract. Mech.— 1969.— 5, N 1.— P. 45—55.

98. *Dower W.* Fatigue crack growth under C. O. D. cycling // Eng. Fract. Mech.— 1973.— 5, N 1.— P. 11—21.

99. *Шур Д. М., Мазепа А. Г., Гринь Е. А.* Изучение закономерностей роста трещин при малоцикловой усталости с использованием *J*-интеграла // Тез. пленар. докл. VIII Всесоюз. конф. по усталости металлов.— М., 1982.— С. 36—41.

100. *Влияние* асимметрии цикла нагружения на трещиностойкость конструкционных сплавов / А. В. Ясний, В. В. Покровский, В. Г. Каплуненко и др.// Пробл. прочности.— 1982.— № 11.— С. 29—31.

101. *Алексеев Г. В., Леонов В. П.* Некоторые закономерности роста трещин при циклических нагрузках // Выбор и обоснование методов и норм контроля качества сварных соединений.— Л. : ЛДНТП, 1976.— С. 36—43.

102. *Lin H., Lino N.* A mechanical model of fatigue crack propagation // Proc. of the second Intern. Conf. of Fracture.— Brighton, 1977.— P. 812—823.

103. *Walton D., Woodman N., Ellison E.* A finite-element method applied to predictioning fatigue-crack growth // J. of Str. Analysis.— 1973.— 8, N 4.— P. 294—313.

104. *Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П.* Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность.— М. : Машиностроение, 1985.— 224 с.

105. *Малашенков С. П., Вовняков А. Г., Бенгус Г. Ю.* Влияние ширины и толщины образца на вязкость разрушения и параметры диаграммы усталостного разрушения полуфабрикатов из алюминиевых сплавов // Трещиностойкость материалов и элементов конструкций.— Киев : Наук. думка, 1980.— С. 269—273.

106. *Симинькович В. Н., Гладкий Я. Н., Деев Н. А.* Построение кинетических диаграмм усталости по результатам испытаний на машине с жестким нагружением образцов разной толщины // Методы и средства оценки трещиностойкости конструкционных материалов.— Киев : Наук. думка, 1981.— С. 228—231.

107. *Зависимость* скорости роста усталостной трещины в Ст3сп от размеров и ориентации образца / М. Н. Георгиев, В. Ю. Догадушкин, Н. Я. Межова и др. // Физ.-хим. механика материалов.— 1981.— **17**, № 3.— С. 18—24.

108. *Clark W., Trout H.* Influence of temperature and section size on fatigue crack growth behavior in Ni—Mo—V alloy steel // Eng. Fract. Mech.— 1970.— **2**, N 2.— P. 107— 123.

109. *Вессел Э., Кларк У., Пройл У.* Расчеты стальных конструкций с крупными сечениями методами механики разрушения // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению / Пер. с англ. под ред. Ю. Н. Работнова.— М. : Мир, 1974.— С. 213—244.

110. *Влияние* размеров образца на трещиностойкость корпусных теплоустойчивых сталей / В. Т. Трощенко, В. В. Покровский, В. Г. Каплуненко и др.// Пробл. прочности.— 1982.— № 10.— С. 3—11.

111. *Трощенко В. Т., Покровский В. В., Каплуненко В. Г.* Влияние размеров образцов на характеристики циклической трещиностойкости теплоустойчивых сталей. Сообщение 1 // Там же.— 1986.— № 4.— С. 3—9.

112. *Sullivan A., Crooker T.* The effect of speciment thickness upon the fatigue crack growth rate of A 516—60 pressure vessel stul // Trans. ASME J.— 1977.— **99**, N 2.— P. 248—252.

113. *Труфяков В. И., Михеев П. П., Кузьменко А. З.* Влияние масштабного фактора и остаточных сварочных напряжений на скорость развития усталостных трещин // Пробл. прочности.— 1980.— № 6.— С. 6—7.

114. *Elber W.* Fatigue crack closure under cyclic tension // Eng. Fract. Mech.— 1970.— N 2.— P. 37—53.

115. *IIW XIII-1095—83.* The effect of residual stress and R-value on the service life of welded connections subject to fatigue / I. Overbecke, J. Back.

116. *Klesnil M., Lukas P.* Effect of stress cycle assymmetry on fatigue crack growth // Mater. Sci. and Eng.— 1972.— N 9.— P. 231—239.

117. *Зависимость* скорости развития усталостных трещин от асимметрии цикла / В. И. Труфяков, В. В. Кныш, П. П. Михеев, А. З. Кузьменко // Пробл. прочности.— 1987.— № 3.— С. 5—7.

118. *Глинка Г.* Влияние формы распределения остаточных напряжений на рост усталостных трещин // Там же.— 1978.— № 5.— С. 51—54.

119. *Игнатьева В. С., Кулахметьев Р. Р., Ларионов В. В.* Влияние остаточных напряжений на развитие усталостной трещины в области сварного стыкового шва // Автомат. сварка.— 1985.— № 1.— С. 1—4.

120. *Труфяков В. И., Михеев П. П., Кузьменко А. З.* Влияние остаточных сварочных напряжений на развитие усталостных трещин в конструкционной стали // Там же.— 1977.— № 10.— С. 6—7.

121. *Аналитическое описание* закономерностей распространения усталостных трещин с учетом остаточных сварочных напряжений / В. И. Труфяков, В. В. Кныш, П. П. Михеев, А. З. Кузьменко // Там же.— 1985.— № 6.— С. 1—4.

122. *Влияние* остаточных напряжений на траекторию и скорость распространения трещин при циклическом нагружении сварных соединений / Г. П. Карзов, В. А. Кархин, В. П. Леонов, Б. З. Марголин // Там же.— 1986.— № 6.— С. 5—10.

123. *Махненко В. И.* Влияние остаточных напряжений на распространение усталостных трещин в элементах сварных конструкций // Там же.— 1978.— № 4.— С. 1—3.

124. *Развитие* усталостных трещин в тавровых соединениях с учетом сварочных напряжений / Г. П. Карзов, В. А. Кархин, В. П. Леонов, Б. З. Марголин // Пробл. прочности.— 1983.— № 11.— С. 70—73.

125. *Herikawa K., Sakakibara A., Mori T.* Effect of residual stresses on threshold realue for fatigue crack // Trans. of JWRI.— 1983.— **12**, N 2.— P. 135—142.

126. *Mukai I., Murata M., Kim E. J.* A proposal for stress intensity factor range calculation method by partial opening model of fatigue crack under nueld residual stress field and prediction of the crack propagation behavior // Quart. of the J. W. S.— 1987.— 5, N 2.— P. 85—88.

127. *Влияние* асимметрии цикла нагружения и остаточных напряжений на скорость распространения усталостных трещин в конструкционных сталях / В. И. Труфяков, П. П. Михеев, В. В. Кныш, А. З. Кузьменко // Трещины в сварных соединениях.— Братислава, 1985.— Т. 2.

128. *Relationship* between the fatigue crack propagation rate and asymmetry of loading cycle and residual stress / V. I. Trufiakov, V. V. Knysh, P. P. Mikheev, A. Z. Kuzmenko // Budown. okret.— Gdansk, 1986.— N 43.— S. 241—245.

129. *Учет* влияния остаточных сварочных напряжений при определении циклической трещиностойкости соединений по критериям линейной механики разрушения / П. П. Михеев, В. В. Кныш, И. С. Коваленко, А. З. Кузьменко // Тез. докл. I Всесоюз. конф. «Механика разрушения материалов».— Львов, 1987.— С. 212.

130. *Уэллс А.* Влияние остаточных напряжений на хрупкое разрушение // Разрушение. В 7-ми т./ Под ред. Г. Либовица.— М. : Машиностроение, 1977.— Т. 4.— С. 299—332.

131. *Parry M., Nordberg H., Nertzberg R.* Fatigue crack propagation in A514 base plate and welded joints // Weld. J.— 1972.— **51**, N 10.— P. 485—490.

132. *Партон В. З., Морозов Е. М.* Механика упругопластического разрушения.— М. : Наука, 1985.— 502 с.

133. *Vasilchenko G. S., Morozov E. M., Shur D. M.* Evaluation of the bearing capocity of cracked components of welded structures // IIW Colloquium. on Practical Application of Fracture Mechanics to the Prevention of Failure of Welded Structures.— Bratislava, 1979.— P. 52—60.

134. *Болотин В. В., Еременко А. Ф.* Исследование моделей накопления усталостных повреждений // Расчеты на прочность.— М. : Машиностроение, 1979.— Вып. 2.— С. 3—29.

135. *Кузьменко В. А., Васинюк И. М., Крук Б. З.* Многоцикловая усталость при переменных амплитудах нагружения.— Киев : Наук. думка, 1986.— 264 с.

136. *Окубо Х.* Определение напряжений гальваническим меднением / Пер. с яп.— М. : Машиностроение, 1969.— 152 с.

137. *Троценко Д. А., Денисов Ю. А., Данилов Г. И.* Способ обнаружения усталостных трещин // Завод. лаб.— 1975.— **41**, № 1.— С. 98—101.

138. *Дворецкий В. И., Троценко Д. А., Мясоедов М. И.* Исследование накопления усталостных повреждений в свар-

ных соединениях с помощью медных гальванических пленок // Автомат. сварка.— 1982.— № 6.— С. 5—13.

139. *Miner M. A.* Cunculativa damage in fatigue // Trans. ASME. Appl. Mum.— 1945.— 67.— P. 159—164.

140. *Кочаев В. П.* Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени.— М. : Машиностроение, 1977.— 232 с.

141. *Nishikara T., Janiada T.* Fatigue of metals under varying repeated stress // Proc. of the sixth Jap. Cougr. for Appl. Mum.— Tokyo, 1956.— 172 p.

142. *Труфяков В. И., Дворецкий В. И.* Рекомендации по расчету ресурса эксплуатации сварных металлоконструкций при случайном нагружении // Технические материалы для стандартизации в рамках СЭВ.— Тимишоара : ИСИМ СРР, 1980.

143. *Расчеты* и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость при двухосном нагружении.— М. : Изд-во стандартов, 1985.— 9 с.

144. *Буглов Е. Г., Филатов М. Я., Коликов Э. А.* Сопротивление материалов при двухчастотном нагружении : Обзор // Пробл. прочности.— 1973.— № 5.— С. 13—17.

145. *Зайцев Г. З., Мамаева Е. И.* Закономерности циклической повреждаемости и разрушение сталей при двухчастотном нагружении // Проблемы разрушения металлов.— М. : Изд-во РОТО МДНТП, 1975.— С. 63—76.

146. *Романов А. Н., Гаденин М. М.* Сопротивление малоцикловому изотермическому деформированию и разрушению при двухчастотном нагружении // Материалы Всесоюз. симпоз. по малоцикловой усталости при повыш. температурах.— Челябинск, 1974.— С. 113—127.

147. *Tonaka T.* Effect of superimposed stress of high Frequency on fatigue strength / Bul. of JSME.— 1968.— 11, N 43.— P. 77—83.

148. *Сергиевский А. Д.* Сопротивление усталости эксплуатируемых пролетных строений железнодорожных мостов.— Л. : Трансжелдориздат, 1963.— 24 с.

149. *Труфяков В. И., Ковальчук В. С.* Определение долговечности при двухчастотном нагружении. Сообщение 1 : Обзор // Пробл. прочности.— 1982.— № 9.— С. 9—15.

150. *Труфяков В. И., Ковальчук В. С.* Определение долговечности при двухчастотном нагружении. Сообщение 2. Предлагаемая методика // Пробл. прочности.— 1982.— № 10.— С. 15—20.

151. *Богданов Б. Т.* Статическая выносливость сплавов Д16Т, В95АТ и 30ХГСА при совместном действии нагрузок разной частоты // Прочность и долговечность авиационных конструкций.— Киев : ГВФ, 1965.— Вып. 2.— С. 124—127.

152. *Дворкин Я. Л.* Влияние параметров двухчастотного цикла на долговечность образцов из сплавов Д16Т // Завод. лаб.— 1973.— № 4.— С. 464—466.

153. *Jamada T., Kilogano S.* Investigation of fatigue strength of fatigue strength of metals under Aclual suroice loads (with two superimposed cyclic loadings) // Bul. of JSME.— 1967.— 10, N 38.— P. 245—252.

154. *Ковальчук В. С., Труфяков В. И.* Расчетное определение скорости развития усталостных трещин при двухчастотном нагружении // Автомат. сварка.— 1983.— № 127.— С. 68—69.

155. *Моэжерова Н. А.* Развитие трещин в панелях гермофюзеляжа при совместном действии циклических нагрузок от наддува и высокочастотных вибраций // Пробл. прочности.— 1980.— № 1.— С. 63—65.

156. *Трощенко В. Т., Покровский В. В., Скоренко Ю. С.* Закономерности развития усталостных трещин в конструкционных сталях при двухчастотном нагружении // Там же.— 1985.— № 10.— С. 30—39.

157. *Gurney T. R.* Fatigue of welded structures. Cambridge University Press.— London; New York; Melburne; 1979.— 456 p.

158. *Мюнзе В. Х.* Усталостная прочность сварных стальных конструкций.— М. : Машиностроение, 1968.— 312 с.

159. *Takahashi K.* Effect of external geometry of reinforcement on the fatigue strength of a weld joint / Document IIW XIII-531—69.— Tokyo, 1969.— 25 p.

160. *Дучинский Б. Н.* Прочность и основания расчета сварных соединений, работающих на переменные и знакопеременные усилия // Вибрационная прочность сварных мостов.— М. : Трансжелдориздат, 1952.— С. 137—199. (Тр. ЦНИС, 8).

161. *Кудрявцев И. В., Саввина Н. М.* Исследование усталостной прочности соединений, выполненных электрошлаковой сваркой на образцах большого сечения // Сварочн. пр-во.— 1956.— № 11.— С. 1—6.

162. *Гохберг М. М.* Металлические конструкции кранов.— М. ; Л. : Машгиз, 1959.— 182 с.

163. *Савельев В. Н., Наврoцкий Д. И., Макурин В. А., Шишкин В. Ю.* Вибрационная прочность сварных стыковых соединений из стали НЛ-2 // Сварочн. пр-во.— 1958.— № 8.— С. 14—17.

164. *Колтунов П. С.* Вибрационная прочность сварных соединений из стали НЛ-2 (СХЛ-2) // Экспериментальные исследования стальных конструкций.— М. : Стройиздат, 1950.— С. 151—225.

165. *Аснис А. Е., Иващенко Г. А.* Повышение прочности сварных соединений при переменных нагрузках // Автомат. сварка.— 1976.— № 10.— С. 36—39.

166. *Раевский Г. В.* Вибрационная нагрузка вагонов и вибрационные испытания сварных узлов вагонного типа // Вопросы сварного вагоностроения.— Киев : Изд-во АН УССР, 1941.— С. 21—52.

167. *Дучинский Б. Н.* Выносливость элементов сварных мостовых конструкций при переменных и знакопеременных напряжениях // Исследования прочности и долговечности сварных мостовых конструкций.— М. : Трансжелдориздат, 1956.— С. 86—162. (Тр. ЦНИИС, 20).

168. *Пухнер О.* Влияние собственных напряжений, возбуждаемых в материале, на предел выносливости // Чехосл. тяжелая пром-сть.— 1961.— № 1.— С. 4—11.

169. *Инструкция* по механической обработке сварных соединений в стальных конструкциях мостов (ВСН 188—78).— М. : Минтрансстрой, МПС. Централ. ин-т совершенствования технологии стр-ва норматив. исслед. и науч.-техн. информ. в транспорт. стр-ве «Оргтрансстрой», 1978.— 36 с.

170. *Кудрявцев И. В., Наумченко Н. Е.* Усталость сварных конструкций.— М. : Машиностроение, 1976.— 270 с.

171. *Мамулия Г. Е., Белянин В. А.* Пути повышения долговечности отремонтированных сваркой рам конструкций сельскохозяйственных машин // Сварочн. пр-во.— 1968.— № 10.— С. 21—23.

172. *Newman R. P., Çurney T. R.* Fatigue tests of plain plate speciments and transverse butt welds in mild steel// Brit. Weld. J.— 1959.— 6, N 12.— P. 569—594.

173. *Дучинский Б. Н.* Материалы для расчета сварных швов и соединений мостовых конструкций // Исследования вибрационной прочности сварных мостовых конструкций.— М. : Трансжелдориздат, 1954.— С. 132—179. (Тр. ЦНИС, 10).

174. *Бельчук Г. А.* Сварные швы в соединениях корпуса судна.— М. ; Л. : Машгиз, 1954.— 127 с.

175. *Манилова Р. З., Наврoцкий Д. И., Шишкин В. Ю.* Исследование вибрационной прочности сварных тавровых соединений // Автомат. сварка.— 1958.— № 5.— С. 32—40.

176. *Кудрявцев И. В., Минков Я. Л., Гуляева Н. М.* Упрочнение сварных швов дымососов // Экспериментальные исследования конструкционной прочности машиностроительных материалов и деталей машин.— М. : Машиностроение, 1967.— С. 124—131. (ЦНИИТмаш, кн. 109).

177. *Строительные нормы* и правила. Нормы проектирования. Стальных конструкции (СНиП 11—23—81*) / Госстрой СССР.— М. : Стройиздат, 1988.— 96 с.

178. *Большаков К. П.* Влияние некоторых конструктивных и технологических факторов на вибрационную прочность сварных конструкций // Вибрационная прочность сварных мостов.— М. : Трансжелдориздат, 1952.— С. 5—74. (Тр. ЦНИИС, 8).

179. *Большаков К. П.* Влияние зачистки переходной зоны сварного соединения на его вибрационную прочность // Ж.-д. стр-во.— 1953.— № 9.— С. 24—26.

180. *Большаков К. П.* Конструктивные и технологические мероприятия по снижению концентрации напряжений в сварных конструкциях // Исследование вибрационной прочности сварных мостовых конструкций.— М. : Трансжелдориздат, 1954.— С. 6—65. (Тр. ЦНИИС, **10**).

181. *Большаков К. П.* Снижение напряжений в узлах сварных пролетных строений // Исследование прочности и долговечности сварных мостовых конструкций.— М. : Трансжелдориздат, 1956.— С. 6—85. (Тр. ЦНИИС, 20).

182. *Большаков К. П.* Условия проявления вредного влияния остаточных напряжений на выносливость сварных конструкций и меры по его устранению // Исследования сварных соединений металлических и железобетонных мостов.— М. : Трансжелдориздат, 1960.— С. 56—101. (Тр. ЦНИИС, 35).

183. *Большаков К. П.* Повышение выносливости узлов связей с составными фасонками // Там же.— С. 7—55.

184. *Труфяков В. И., Михеев П. П.* Способы повышения выносливости сварных соединений // Автомат. сварка.— 1964.— № 11.— С. 28—36.

185. *Аснис А. Е., Иващенко Г. А.* Повышение прочности сварных конструкций.— Киев : Наук. думка, 1978.— 193 с.

186. *Аснис А. Е., Иващенко Г. А.* Способ снятия сварочных напряжений / А. с. № 197804, опубл. 09.06.67.

187. *Аснис А. Е., Иващенко Г. А.* Повышение прочности сварных соединений из низколегированных сталей // Повышение надежности сварных конструкций подвижного состава.— М. : Транспорт, 1973.— С. 53—59. (Тр. ЦНИИ МПС, вып. 485).

188. *Kenyon N., Morrison W. B., Quarrel A. G.* Fatigue strenght of Welded joints in structural steel // Brit. Weld. J — 1966.— 13, N 3.— P. 123—137.

189. *Kaufmann P.* Verbesserung des Ermudungsverhaltens von Stumpfschwei verbindungen // Schweisstechnik (DDR).— 1971.— N 12.— S. 560—562.

190. *Shimada W., Hoshiouchi S., Hijikata A., Joshioka S., Inoue A.* Improvement of fatigue strength in fillet welded joint by CO_2 soft plasma are overlaying on weld toc.// Doc. IIW XIII-830—77.— 25 p.

191. *Аснис А. Е., Иващенко Г. А., Назаренко А. Н.* Применение в сварных конструкциях сталей с пределом текучести 40—45 кг/мм², легированных ниобием и ванадием // Автомат. сварка.— 1971.— № 4.— С. 24—25.

192. *Minner H. H., Seeger T.* Investigations on the fatigue strenght of weldble high strength steels StE 460 and StE 690 in as-welded and tig-dressed conditions // Doc IIW XIII-912—79.— 22 p.

193. *Крайчик М. М., Шляпин В. Б., Моисеев И. А. и др.* Влияние различных способов упрочняющей обработки сварных конструкций подвижного состава на повышение их усталостной прочности // Повышение надежности сварных конструкций подвижного состава.— М. : Транспорт, 1973.— С. 22—29. (Тр. ЦНИИ МПС, вып. 485).

194. *Яманов В. М., Лыков Л. С.* Усталостная и ударная прочность соединений, сваренных в углекислом газе // Автомат. сварка.— 1971.— № 1.— С. 47—49.

195. *Hotte T.* Some aspects improving fatigue strength of butt welded joint // Doc. IIW XIII-532—69.— 18 p.

196. *Касаткин Б. С., Мусияченко В. Ф., Шавнукова Г. Н.* Прочность сварных соединений стали 14Х2ГМР при переменных нагрузках // Автомат. сварка.— 1972.— № 9.— С. 46—49.

197. *Мусияченко В. Ф., Миходуй Л. И., Солодкий С. Д.* Аргонодуговая обработка сварных соединений высокопрочных низколегированных сталей // Аргонодуговая обработка сварных соединений.— Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1983.— С. 56—62.

198. *Крайчик М. М.* Влияние отдельных факторов на циклическую прочность сварных конструкций подвижного состава // Вести. ВНИИ ж.-д. трансп.— 1970.— № 3.— С. 33—37.

199. *Кудрявцев И. В., Наумченков Н. Е., Саввина М. М.* Усталостная прочность соединений элементов крупных сечений, выполненных электрошлаковой сваркой // Свароч. пр-во.— 1958.— № 4.— С. 15—19.

200. *Кудрявцев И. В.* Повышение усталостной прочности сварных соединений поверхностным наклепом // Повышение усталостной прочности машин поверхностной обработкой.— М. : Машгиз, 1952.

201. *Гохберг М. М., Тун Бао И.* Влияние предварительного нагружения и высокого отпуска на усталостную прочность сварных соединений // Конструкции и расчеты машин.— М. ; Л. : Машиностроение, 1964.— С. 76—83. (Тр. Ленингр. политехн. ин-та, 236).

202. *Кудрявцев И. В.* Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении.— М. : Машгиз, 1951.— 278 с.

203. *Навроцкий Д. И., Звягинцев С. К., Исаев Н. И.* Исследование влияния внутренних напряжений на прочность сварных элементов с резким изменением формы при вибрационной нагрузке // Сварочное производство.— М. ; Л. : Машгиз, 1954.— С. 74—86. (Тр. Ленингр. политехн. ин-та, 4).

204. *Кудрявцев И. В., Балабанов Н. А.* Усталостная прочность стальных пластин с приваренными накладками // Там же.— 1956.— № 6.— С. 1—5.

205. *Gurney T. R.* Exploratory fatigue tests on fillet welded speciments subjected to prior overloading // Brit. Weld. J.— 1963.— 10, N 10.— P. 530—533.

206. *Наумченков Н. Е.* Усталостная прочность балок, изготовленных сваркой в углекислом газе // Свароч. пр-во.— 1971.— № 4.— С. 29—31.

207. *Наумченков Н. Е., Боград С. А.* Выносливость соединений коробчатого сечения из стали Ст3, сваренных электрозаклепками в углекислом газе // Там же.— 1968.— № 8.— С. 1—3.

208. *Наумченков Н. Е., Боград С. А.* Сопротивление усталости тавровых соединений, выполненных сваркой в углекислом газе угловыми точечными швами // Там же. — 1969.— № 1.— С. 31—33.

209. *Наумченков Н. Е., Боград С. А.* Повышение прочности и долговечности сварных крановых металлоконструкций поверхностно-пластическим деформированием // Вестн. машиностроения.— 1970.— № 1.— С. 30—32.

210. *Крайчик М. М.* Усталостная прочность и упрочнение сварных соединений из малоуглеродистой и низколегированной сталей // Автомат. сварка.— 1953.— № 3.— С. 24—36.

211. *Braithweite A. B.* Fatigue tests on Bailey bridge trausoms // Brit. Weld. J.— 1964.— **11**, N 12.— P. 641—644.

212. *Остаточные напряжения* при упрочнении сварных соединений стали ЮЗ ультразвуковым инструментом / В. Г. Степанов, Е. Ш. Статников, М. И. Клестов и др.// Технология судостроения.— 1974.— № 7.— С. 32—34.

213. *Эффективность* применения ультразвуковой обработки для повышения сопротивления усталости сварных соединений / П. П. Михеев, А. Я. Недосеков, И. В. Пархоменко и др.// Автомат. сварка.— 1984.— № 3.— С. 4—7.

214. *Статников Е. Ш., Шевцов Е. М., Куликов В. Ф.* Ультразвуковой ударный инструмент для упрочнения сварных швов и уменьшения остаточных напряжений // Новые физические методы интенсификации технологических процессов.— М. : Металлургия, 1977.— С. 27—29. (Тр. МИСиС, № 92).

215. *А. с. 472782 (СССР).* Ультразвуковая головка для деформационного упрочнения и релаксационной обработки / Е. Ш. Статников, Л. В. Куравлев, А. Ф. Алексеев.— Опубл. в Б. и., 1975, № 21.

216. *Horak V.* Einfluss niedriger Temperaturen und raumlicher Spannungszustange auf Tragfahigkeit und Sprodbruchgefahr der Konstruktionselemente // Schweisstechnik.— 1962.— N 12.— S. 485—490.

217. *Еврафов Г. К., Осипов В. О.* Об использовании остаточных напряжений для повышения усталостной прочности сварных конструкций // Свароч. пр-во.— 1960.— № 10.— С. 7—10.

218. *Еврафов Г. К., Осипов В. О.* Усталостная прочность сварных соединений эксплуатируемых железнодорожных мостов // Там же.— 1965.— № 8.— С. 6—8.

219. *Chadwick H. D.* How Explosive Peening Affects Fatigue Properties in Maraging Steel. Fortiweld and an

Al:Zn : Mg // Alloy Metal Constr. and Brit. Weld. J.—1971.— N 10.— P. 374—380; N 11.— P. 413—415.

220. *Михеев П. П., Труфяков В. И., Буштедт Ю. П.* Применение импульсной обработки для повышения выносливости сварных соединений // Автомат. сварка.— 1967.— № 10.— С. 63—64.

221. *Труфяков В. И., Михеев П. П., Кудинов В. М.* Импульсная обработка сварных соединений // Повышение прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием.— М. : ЦНИИТмаш, 1970.— 90.— С. 181—186.

222. *СНиП 2.05.03—84.* Мосты и трубы / Госстрой СССР.— М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985.— 200 с.

223. *Михеев П. П., Труфяков В. И., Эсибян Э. М. и др.* Повышение сопротивления усталости сварных соединений воздушно-плазменной обработкой // Автомат. сварка.— 1984.— № 12.— С. 50—52.

224. *Труфяков В. И., Михеев П. П., Кудинов В. М. и др.* Повышение сопротивления усталости сварных соединений взрывным нагружением // Там же.— 1974.— № 9.— С. 29—32.

225. *Михеев П. П., Недосека А. Я., Пархоменко И. В. и др.* Повышение сопротивления усталости сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой // Тез. докл. междунар. симпоз. «Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения».— Киев : Наук. думка, 1984.— 100 с.

226. *Наумченков Н. Е.* Исследование усталостной прочности соединений стали 22К, выполненных различными способами // Сварочн. пр-во.— 1965.— № 6.— С. 32—34.

227. *Oliver R., Ritter W.* Wohlerlinienkatalog fur Schweissverbindungen aus Baustahlen // Einheitliche Auswertung von Ergebnissen aus Schwingfestig eitsversuchen.— Stumpfstoss — Dusseldorf: DVS, 1979.— Bd. 56 (1).— 575 S.

228. *Статическая и усталостная прочность* стыковых соединений, выполненных односторонней автоматической сваркой на флюсомедной подкладке / Г. Ф. Коданов, Г. А. Бельчук, В. С. Головченко и др.// Сварочн. пр-во.— 1971. —№ 5.— С. 28—30.

229. *Быков В. А., Никитин В. А.* Сопротивление многократному изгибу стальных полос с приваренным поперечным ребром // Там же.— 1955.— № 9.— С. 8—10.

230. *Oliver R., Ritter W.* Wöhlerlinienkatalog für Schweissverbindugen aus Baustöhlen // Einheitliche statistische Auswertung von Ergebnissen aus Schwingfestigkeitsversuchen.— Querstefe — Dusseldorf: DVS, 1980.— Bd. 56 (2).— 551 S.

231. *Gurney T., Maddox S.* A re-analyses of fatigue data for welded joints in steel // The Welding Institute Research report.— 1972.— NE 144/72.— 47 p.

232. *Oliver R., Ritter W.* Wöhlerlinienkatalog für Schweissverbindungen aus Baustahlen Einheitliche statistische Auswertung von Ergebnissen aus Schwingfestigkeitsversuchen. Längssteife.— Düsseldorf: DVS, 1982.— Bd. 56 (4).— 481 S.

233. *А. с. 1420035 (СССР).* Способ обработки сварных металлоконструкций. Приоритет от 23.02.87 г./ Е. Ш. Статников, В. И. Труфяков, П. П. Михеев, В. Л. Сенюков, А. З. Кузьменко, А. В. Слабодчиков.— 8 с.

234. *Повышение* сопротивления усталости сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой/ П. П. Михеев, А. Я. Недосека, И. В. Пархоменко и др.// Ультразвуковые колебания и их влияние на механические характеристики конструкционных материалов.— Киев : Наук. думка, 1986.— С. 42—46. (Сб. науч. тр.).

235. *Trufjakov V. I., Mikhejev P. P., Beatovic B.* Mjere povisenja otpornosti na Samor zavarenih spojeva zasnovaniji na preraspodjeli zaostalin napora // International Symposium Highguality welded structures designing performing and control, 17—18 May 1978.— Zagreb.— P. 243—259.

236. *Сагалевич В. М., Мейсер А. М.* Устранение сварных деформаций и напряжений листовых конструкций нагружением с вибрацией // Сварочн. пр-во.— 1976.— № 9.— С. 1—3.

237. *Применение* вибрационного нагружения для снятия остаточных напряжений в сварных рамах / О. И. Зубченко, А. Н. Грузд, Г. Т. Орехов, А. Г. Состин // Автомат. сварка.— 1974.— № 9.— С. 64—66.

238. *Махненко В. И., Пивторак Н. И.* Перераспределение остаточных напряжений в сварных балках при вибрационной обработке // Там же.— 1978.— № 9.— С. 28—31.

239. *Сагалевич В. М., Завалишин Н. Н., Нашивочников В. В.* Устранение деформаций сварных балочных конструкций вибрацией // Сварочн. пр-во.— 1979.— № 9.— С. 9—12.

240. *Труфяков В. И., Гиренко В. С., Михеев П. П.* Влияние местных пластических деформаций на сопротивляемость сварных соединений хрупким разрушениям // Повышение прочности и долговечности машин поверхностным пластическим деформированием.— М. : ЦНИИТмаш, 1970.— С. 147—156.

Глава 9

1. *Мажид К. И.* Оптимальное проектирование конструкций / Под ред. М. А. Колтунова; Пер. с англ. В. И. Дорофеева.— М. : Высш. шк., 1979.— 237 с.

2. *Мельников Н. П.* Металлические конструкции. Современное состояние и перспективы.— М. : Стройиздат, 1983.— 541 с.

3. *Металлические* конструкции. Общий курс: Учебник для вузов / Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Г. С. Ведеников и др.; Под общ. ред. Е. И. Беленя.— М. : Стройиздат, 1986.— 590 с.

4. *Новые* направления оптимизации в строительном проектировании / Под ред. Э. Атрека и др.; Пер. с англ. К. Г. Бромштейна.— М. : Стройиздат, 1989.— 592 с.

5. *СНиП* 2.01.07—85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР.— М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1987.— 36 с.

6. *СНиП* II-23—81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР.— М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990.— 96 с.

7. *Справочник* конструктора металлических конструкций / В. Т. Васильченко, А. Н. Рутман, Е. П. Лукьяненко.— Киев : Будівельник, 1990.— 312 с.

8. *Справочник* проектировщика. Металлические конструкции. / Под. общ. ред. Н. П. Мельникова.— М. : Стройиздат, 1980.— 776 с.

9. *Трофимович В. В., Пермяков В. А.* Оптимальное проектирование металлических конструкций.— Киев : Будівельник, 1983.— 136 с.

10. *Хог Э., Арора Я.* Прикладное оптимальное проектирование : Металлические системы и конструкции / Под ред. Н. В. Баничука; Пер. с англ. В. М. Картвелишвили и А. А. Меликяна.— М. : Мир, 1983.— 478 с.