

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ СООРУЖЕНИЙ
КОМПЛЕКСА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

А.Е.Любти

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
СООРУЖЕНИЙ КОМПЛЕКСА
ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ЭКСПЛУАТАЦИЯ,
ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ

«Сталь»
Киев 2010

А.Е.Любин

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
СООРУЖЕНИЙ КОМПЛЕКСА
ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ.
ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ**

*Глубокомуважаемому
Вадиму Николаевичу
Гордееву
С наилучшими пожеланиями*

А.Е.Любин

«Сталь»
Киев – 2010

УДК 669.162.213

ББК 30.4+34.32

Л93 Любин А.Е. Металлические конструкции сооружений комплекса доменной печи. Проектирование. Эксплуатация. Диагностика технического состояния. – К.: Изд-во «Сталь», 2010. – 472 с., рис. 197, табл. 69.

ISBN 978-966-1555-46-3

Рассмотрены металлические конструкции сооружений комплекса доменной печи: условия их работы, нагрузки, компоновка, расчет, конструирование и эксплуатация листовых и стержневых конструкций-кожухов металлургических агрегатов, системы промышленных трубопроводов, высотных и других сооружений комплекса.

Систематизированы и формализованы нагрузки и воздействия, обобщен накопленный опыт в области создания конструктивных форм сооружений комплекса доменной печи. Изложены особенности расчетных подходов для специальных конструкций. Приведены примеры компоновки отдельных сооружений и узлов конструкций.

Для инженерно-технических работников проектных и строительно-монтажных организаций, а также студентов высших учебных заведений при изучении курса «Металлические конструкции».

УДК 669.162.213

ББК 30.4+34.32

Л93 Любин О.Є. Металеві конструкції споруд комплексу доменної печі. Проектування. Експлуатація. Діагностика технічного стану. – К.: Вид-во «Сталь», 2010. – 472 с., рис. 197, табл. 69

ISBN 978-966-1555-46-3

Розглянуто металеві конструкції споруд комплексу доменної печі: умови їх роботи, навантаження, компонування, розрахунок, конструювання та експлуатація листових і стрижневих конструкцій-кожухів металургійних агрегатів, системи промислових трубопроводів, висотні та інші споруди комплексу.

Систематизовані та формалізовані навантаження та впливи, узагальнено накопичений досвід у галузі створення конструктивних форм споруд комплексу доменної печі. Викладені особливості розрахункових підходів до спеціальних конструкцій. Наведено приклади компонування окремих споруд та вузлів конструкцій.

Для інженерно-технічних працівників проектних та будівельно-монтажних організацій, а також студентів вищих навчальних закладів при вивченні курсу «Металеві конструкції».

© А.Е. Любин, 2010

© Издательство «Сталь», 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современная промышленная отрасль не может развиваться без надежной, высокоразвитой металлургической базы, основу которой составляет доменное производство. Непрерывный процесс выплавки чугуна в доменных печах обеспечивает производство проката и металлоизделий для всей промышленности.

Выпуск необходимого объема чугуна зависит от стабильной работы сооружений комплекса доменной печи.

Объекты металлургического производства, являясь технологическими агрегатами, рассматриваются как строительные конструкции с различными специфическими условиями их конструктивных схем, возведения и эксплуатации. Для ведения нормального технологического процесса в доменном комплексе используется порядка 6,5 % общего объема металлических конструкций промышленных предприятий [79].

Между тем, в отечественной литературе известно небольшое количество публикаций, в которых системно рассмотрены проблемы проектирования уникальных металлических конструкций сооружений комплекса доменной печи. Наиболее полно они освещены в монографии В.Я. Миллера и др. «Стальные конструкции комплекса доменной печи и газоочистки» [61], ставшей библиографической редкостью, а также в нескольких изданиях «Справочника проектировщика. Металлические конструкции» [82, 83, 84] и в справочнике «Сварные конструкции» [75], который в некоторых аспектах повторяет содержание предыдущих источников.

Достаточно широко рассмотрены проблемы работы собственно доменных печей и воздухонагревателей в работе Ю.П. Байшева «Доменные печи и воздухонагреватели» [3].

В настоящей монографии сделана попытка собрать в едином издании богатый практический опыт отечественного и зарубежного проектирования металлических конструкций различных объектов комплекса доменной печи, накопленный за многие годы развития домностроения, и сделать его доступным для инженеров при проектировании подобных сооружений.

За последние 50 лет на предприятиях бывшего Союза построены десятки доменных печей различных объемов. Впервые были сооружены доменные печи объемом 2300, 2700, 3000 м³. В Украине была введена в эксплуатацию крупнейшая доменная печь объемом 5000 м³, а в России – доменные печи объемом 3200 и 5580 м³.

Систематизация такого огромного опыта позволяет обобщить имеющийся материал по проектированию и эксплуатации металлических конструкций объектов доменного комплекса. Представляется также возможным использование этого материала в смежных областях промышленности, в том числе при проектировании сосудов и емкостей, промышленных трубопроводов, объектов химической промышленности, сооружений, работающих при термическом расширении футеровки, листовых конструкций, находящихся под воздействием внутреннего давления газовой среды и высоких температур и т.п.

В книге использованы разработки и материалы научно-исследовательских и проектных институтов «ЦНИИпроектстальконструкция» (г. Москва, Россия), «Днепрпроектстальконструкция» (г. Днепропетровск, Украина), «Промспецпроект» корпорации «Промстальконструкция» (г. Днепропетровск, Украина), которые накопили богатый опыт проектирования металлических конструкций доменных комплексов, а также опыт совместной многолетней работы с технологическими институтами «Укрگیпромез» (г. Днепропетровск, Украина), «Гипромез» (г. Москва, Россия), «Ленгіпромез» (г. Санкт-Петербург, Россия), ОАО «МетПромПроект» (г. Москва, Россия), «Гипросталь» и «Энергосталь» (г. Харьков, Украина), металлургическими предприятиями, заводами-изготовителями металлических конструкций, монтажными и ремонтными организациями.

Специалистам всех этих предприятий, сотрудничество с которыми длилось многие годы, автор выражает свою глубокую благодарность и признательность за совместное творчество в создании проектов столь сложных и ответственных сооружений.

Автор также признателен своим коллегам – инженерам Е.С. Иосилевич и Г.С. Пушкаревой за полезные советы и замечания при обсуждении рукописи, которые позволили устранить многие неточности, а также инженерам Е.А. Есиповой и Т.Г. Михайленко за помощь в оформлении иллюстраций.

ГЛАВА 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОМПЛЕКСЕ СООРУЖЕНИЙ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ И УСЛОВИЯХ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

§ 1.1. Основы технологического процесса получения чугуна. Состав комплекса доменной печи и назначение его сооружений

В доменной печи происходит переработка загружаемого сырья и выплавка чугуна. Этот сложный технологический процесс осуществляется с помощью комплекса сооружений, входящих в состав доменного, газового, железнодорожного и других цехов металлургического предприятия и совместно обеспечивающих работу доменной печи.

Компоновка этих сооружений связана со многими факторами, зависящими от технологического процесса, общей компоновки цеха и завода, конструктивных решений объектов, перспективы развития предприятия и др.

Производительность современного доменного цеха достигает 10 млн. т чугуна в год и более. Поэтому рациональное размещение сооружений и агрегатов доменного цеха, а также транспортных магистралей имеет серьезное значение.

Чтобы размещение агрегатов и транспортных магистралей было рациональным и экономически выгодным, оно должно удовлетворять следующим требованиям:

1. Компоновка железнодорожных путей должна обеспечивать рациональный грузопоток в цехе и возможность использования в случае необходимости одного и того же пути при перевозке разных грузов.

2. Габаритные размеры цеха и протяженность различных коммуникаций (железнодорожные пути, эстакады, конвейерные галереи, трубопроводные системы, электрические сети и др.) должны быть минимальными.

3. Агрегаты должны размещаться так, чтобы во время строительства или ремонтов соседние агрегаты и коммуникации работали бесперебойно.

4. Габариты приближения строений к железнодорожным путям и автодорогам должны удовлетворять требованиям безопасности.

5. Планировка цеха должна обеспечивать возможность его развития.

Компоновка доменных печей и всех вспомогательных агрегатов на предприятии зависит, прежде всего, от расположения железнодорожных путей для уборки чугуна и шлака. Различают приемные постановочные пути, предназначенные для постановки подвижного состава под погрузку и прием продуктов плавки, и ходовые пути, по которым подвижной состав передвигается к месту назначения.

Доменные цехи по характеру компоновки печей могут быть разделены на два типа [38].

Первый – с блочным расположением печей, когда две соседние печи имеют общий литейный двор с одним мостовым краном (рис.1.1). Воздухонагреватели двух печей также находятся на одной площадке, что позволяет иметь общую дымовую трубу и общий резервный воздухонагреватель. Железнодорожные пути размещаются с обеих сторон печей параллельно их осям. Такое расположение печей дает экономию капитальных затрат до 2–3 % и уменьшает протяженность коммуникаций. Недостатком блочного расположения печей является невозможность переезда с одной группы путей на другую между печами. Переезд возможен только за первой или за последней печью, что затрудняет маневрирование транспорта.

Второй – с островным расположением печей, когда они располагаются изолированно друг от друга и представляют вместе со своими воздухонагревателями как бы острова (рис.1.2). Островной цех, как и блочный, имеет специализацию железнодорожных путей: по одну сторону печи располагаются пути для уборки чугуна, а по другую – для уборки шлака и коксовой мелочи. Между двумя соседними печами имеется возможность переезда железнодорожным транспортом с одной стороны на другую.

Такое расположение печей обеспечивает гораздо большее маневрирование транспорта, однако при этом увеличивается расстояние между ними, что сказывается на размере капитальных затрат. Обе компоновки цеха имеют определенные преимущества и недостатки и во многом зависят от объема печи. Современные доменные цехи строятся преимущественно с островным расположением печей.

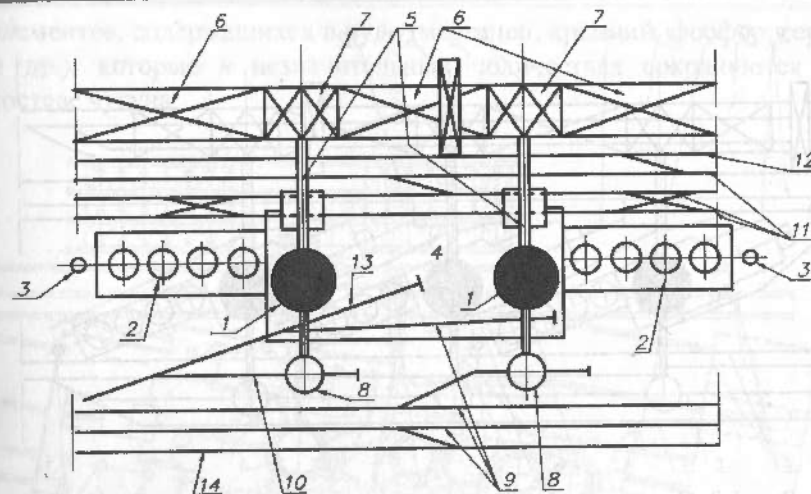


Рис. 1.1. План доменного цеха с блочным расположением печей:
1 – доменные печи; 2 – воздухонагреватели; 3 – дымовые трубы;
4 – литейный двор; 5 – наклонные мосты; 6 – рудные бункера;
7 – коксовые бункера; 8 – пылеуловители; 9, 10, 11, 12 – железнодорожные пути для уборки чугуна, пыли, шлака и коксовой мелочи соответственно; 13 – хозяйственный путь; 14 – проездные пути

Традиционно из комплекса сооружений доменной печи выделяется так называемый центральный узел, включающий:

- собственно доменную печь с опорной системой, вертикальными газопроводами грязного газа и кольцевым воздухопроводом горячего дутья;
- блок воздухонагревателей с прямым воздухопроводом горячего дутья и другими газо-, воздухопроводами;
- пылеуловитель с нисходящими газопроводами грязного газа;
- наклонный мост;
- блок лифта;
- монтажную балку;
- здание литейного двора.

На рис.1.3 приведен схематический план расположения сооружений, характерный для доменной печи островного расположения, а на рис. 1.4 показан общий вид комплекса печи.

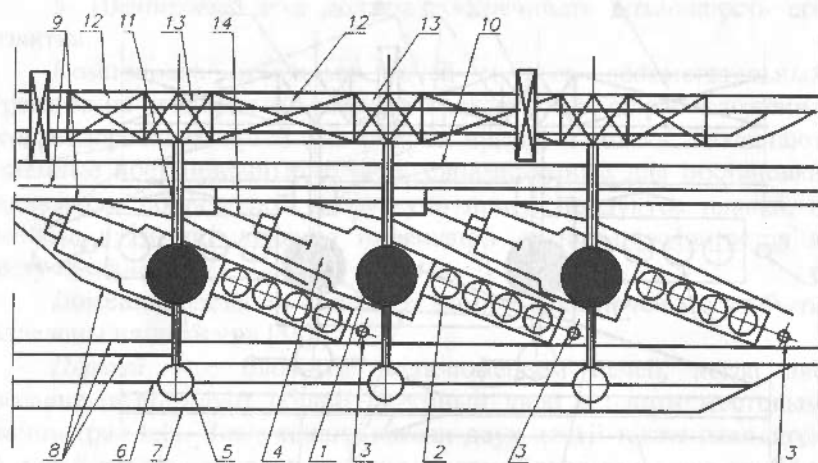


Рис. 1.2. План доменного цеха с островным расположением печей:

- 1 – доменные печи; 2 – воздухонагреватели; 3 – дымовые трубы;
 4 – литейные дворы; 5 – пылеуловители; 6 – железнодорожные пути для
 уборки пыли; 7 – проезды; 8, 9, 10 – железнодорожные пути для
 уборки чугуна, шлака и коксовой мелочи соответственно;
 11 – наклонный мост; 12, 13 – рудные и коксовые бункера соответственно;
 14 – хозяйственный путь

Доменная печь, в которой непосредственно происходит процесс выплавки чугуна, является основным сооружением комплекса.

Доменный процесс – это восстановительный процесс, так как его сущность состоит в восстановлении окислов железа до металла. В печь загружаются сырые железосодержащие материалы, так называемая шихта, состоящая в основном из окислов железа (Fe_3O_4 или Fe_2O_3), кокса и примесей пустой породы. Для восстановления железа из его окислов используется углерод, содержащийся в коксе, и большое количество тепла, образуемое в результате сгорания кокса и природного газа, вдуваемого в доменную печь.

Образующийся при сгорании кокса углекислый газ CO_2 поднимается вверх, соприкасаясь с кусками кокса, в результате чего образуется окись углерода CO . Просачиваясь сквозь шихту, окись углерода отнимает у руды кислород, восстанавливая при этом железо. Одновременно восстанавливаются примеси других

элементов, содержащихся в руде (марганец, кремний, фосфор, сера и др.), которые в незначительных количествах сохраняются в составе чугуна.

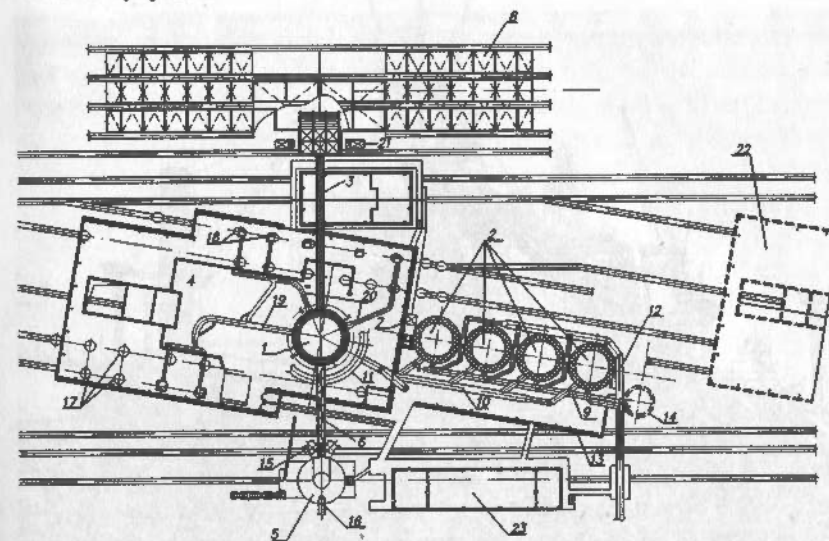


Рис. 1.3. Компоновка сооружений

доменного цеха современной доменной печи:

- 1 – доменная печь; 2 – воздухонагреватели; 3 – наклонный
 мост или галерея для подачи материалов на колошник; 4 – литейный
 двор; 5 – пылеуловитель; 6 – монтажная балка; 7 – лифт; 8 – бункерная
 эстакада; 9 – воздухопровод холодного дутья; 10, 11 – прямой и
 кольцевой воздухопроводы горячего дутья соответственно;
 12 – газопровод чистого газа; 13 – здание воздухонагревателей;
 14 – дымовая труба; 15 – газоотводы; 16 – газопровод получистого газа к
 газоочистке; 17, 18 – чугуновозные и шлаковозные ковши
 соответственно; 19, 20 – желоба для разлива чугуна и шлака
 соответственно; 21 – подъемник коксовой мелочи; 22 – здание
 литейного двора смежной печи; 23 – здание управления печью

Так как железо плавится при температуре $T = 1535^\circ\text{C}$, то процесс его восстановления ускоряется при опускании шихты в зону более высоких температур.

В дальнейшем железо несколько науглероживается, образуя чугун, состоящий из перлита (смеси цементита Fe_3C с ферритом

Fe), цементита и графита (C) с общим содержанием углерода 1,5 – 4 %. Температура плавления чугуна непостоянна, колеблется в диапазоне 1350° – 1400°С и зависит от содержания углерода.

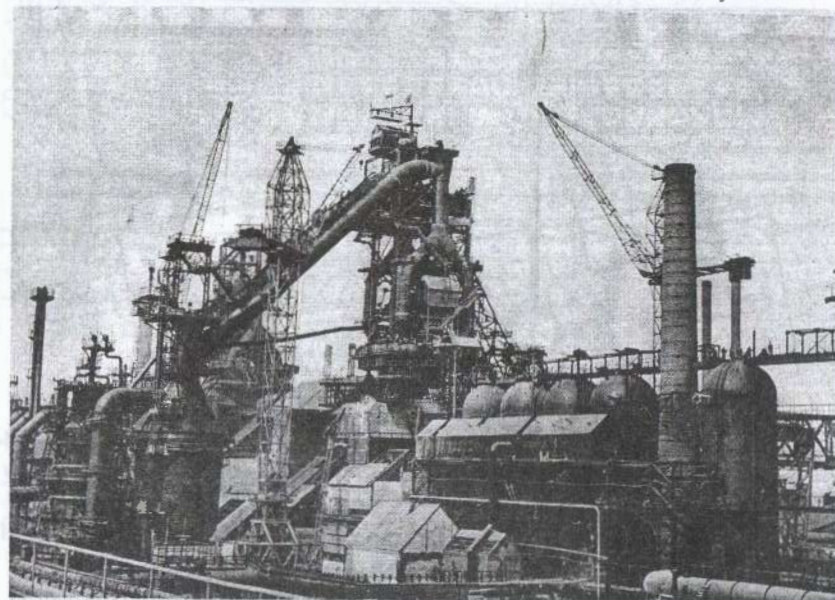


Рис. 1.4. Общий вид сооружений доменной печи

Пустая порода отделяется в результате образования ее расплавленных окислов. Путем ввода в печь добавки так называемых флюсов (в основном, известняки CaCO_3) добиваются образования менее тугоплавких и более мягких окислов и флюсов, которые всплывают на поверхность жидкого чугуна.

Доменная печь (рис. 1.5) является шахтной печью. Внутреннее очертание печи по вертикальному сечению называется профилем, наиболее рациональная форма которого основана на многолетнем мировом опыте эксплуатации доменных печей. В горизонтальном сечении печь круглая.

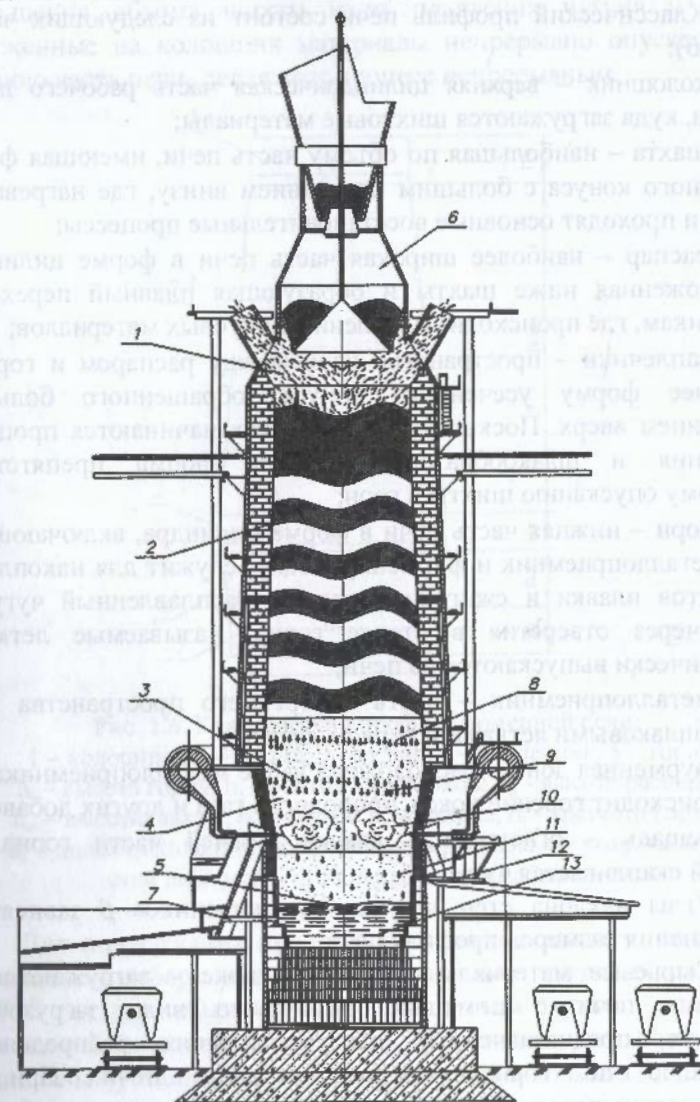


Рис. 1.5. Разрез доменной печи:

1 – колошник; 2 – шахта; 3 – распар; 4 – заплечики; 5 – горн;
6 – загрузочное устройство; 7 – чугунная летка; 8 – горизонт
образования чугуна; 9 – горизонт образования шлака; 10 – зона горения
кокса; 11 – слой шлака; 12 – шлаковая летка; 13 – слой чугуна

Классический профиль печи состоит из следующих частей (рис. 1.6):

- колошник – верхняя цилиндрическая часть рабочего пространства, куда загружаются шихтовые материалы;
- шахта – наибольшая по объему часть печи, имеющая форму усеченного конуса с большим основанием внизу, где нагревается шихта и проходят основные восстановительные процессы;
- распар – наиболее широкая часть печи в форме цилиндра, расположенная ниже шахты и образующая плавный переход к заплечикам, где происходит плавление шихтовых материалов;
- заплечики – пространство печи между распаром и горном, имеющее форму усеченного конуса, обращенного большим основанием вверх. Поскольку в заплечиках начинаются процессы плавления и шлакообразования, такая форма препятствует быстрому опусканию шихты в горн;
- горн – нижняя часть печи в форме цилиндра, включающая в себя металлоприемник и фурменную зону, служит для накопления продуктов плавки и сжигания топлива. Расплавленный чугун и шлак через отверстия в стенке горна, называемые летками, периодически выпускаются из печи;
- металлоприемник – часть внутреннего пространства печи между шлаковыми летками и верхом лещади;
- фурменная зона – расположена выше металлоприемника и в ней происходит горение кокса, природного газа и других добавок;
- лещадь – огнеупорная кладка нижней части горна, на которой скапливается чугун.

Углы наклона стен шахты α и заплечиков β зависят от соотношения размеров профиля печи.

Сырьевые материалы – шихта и кокс – загружаются на колошник печи с помощью различного вида загрузочных устройств, предназначенных для правильного распределения материалов по горизонтальному сечению печи. При их неправильном распределении потоки газа, встречая на своем пути малое количество руды, т.е. не имея сопротивления, будут уходить из печи с высокой температурой и большим содержанием восстановительных компонентов, т.е. их энергия будет использована недостаточно. Вследствие горения кокса в горне и

уменьшения объема шихты из-за плавления чугуна и шлака загруженные на колошник материалы непрерывно опускаются в нижнюю часть печи, делая этот процесс непрерывным.

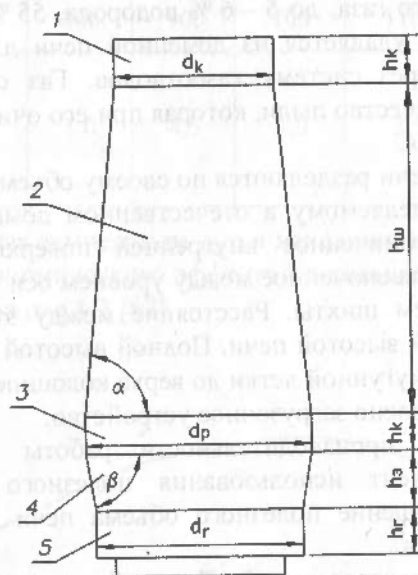


Рис. 1.6. Классический профиль доменной печи:

- 1 – колошник; 2 – шахта; 3 – распар; 4 – заплечик; 5 – горн;
 h_r – высота горна; h_z – высота заплечиков; h_p – высота распара;
 h_w – высота шахты; h_k – высота колошника; d_r – диаметр горна;
 d_k – диаметр колошника; d_p – диаметр распара; α – угол наклона
стен шахты; β – угол наклона стен заплечиков

Для поддержания процесса горения в доменную печь через фурменные приборы подают предварительно нагретый до 1000 – 1400°C воздух. Одновременно с дутьем может подаваться технический кислород, который выделяют из воздуха на специальных установках, а также другие виды топлива.

В результате технологического процесса печь вырабатывает три основных компонента – чугун, шлак и доменный газ.

Чугун представляет собой многокомпонентный сплав на основе железа, который перерабатывается в сталь или используется для отливки готовых изделий.

Шлак представляет собой балластные, т.е. не содержащие железа окислы, вносимые в печь с рудой, коксом, флюсами.

Газ является топливом и содержит до 30 % окиси углерода, до 8 % углекислого газа, до 5 – 6 % водорода, 55 % азота и около 0,5 % метана. Он удаляется из доменной печи для дальнейшего использования через систему газоотводов. Газ содержит также значительное количество пыли, которая при его очистке отделяется и перерабатывается.

Доменные печи разделяются по своему объему, называемому полезным и определяемому в отечественном домностроении как пространство, ограниченное внутренней поверхностью кладки футеровки печи и заключенное между уровнем оси чугунной летки и верхним уровнем шихты. Расстояние между этими уровнями называют полезной высотой печи. Полной высотой печи считается расстояние от оси чугунной летки до верха колошникового фланца, на котором установлено загрузочное устройство.

Показателем производительности работы печи принято считать коэффициент использования полезного объема печи (КИПО), т.е. отношение полезного объема печи к суточной ее производительности.

Блок воздушонагревателей. Для работы доменной печи и поддержания процесса горения необходим большой объем нагретого воздуха, который принудительно вдувается в печь.

Кроме участия в технологическом процессе, увеличение температуры дутья всегда дает возможность снизить удельный расход кокса при выплавке чугуна, так как вдувание холодного или недостаточно нагретого воздуха сопровождается определенной затратой тепла на его нагрев внутри печи до температуры горновых газов.

Экономия кокса по мере увеличения температуры дутья неодинакова и на каждые 100°C она постепенно уменьшается. Сокращение расхода кокса при повышении температуры дутья увеличивает производительность доменной печи.

В таблице 1.1 показан экономический эффект от возрастания температуры дутья на каждые 100°C ее повышения, определенный в результате многолетней практики работы доменных печей с применением высоконагретого дутья.

Таблица 1.1

Интервал температур, °C	700 – 800	800 – 900	900 – 1000	1000 – 1100	1100 – 1200
Экономия топлива и увеличение производительности, %	5,0	4,5	3,0	2,5	2,0

Оптимальная температура дутья находится в пределах 1500°C. Зависимость экономического эффекта от повышения температуры дутья показана на рис. 1.7 [67].

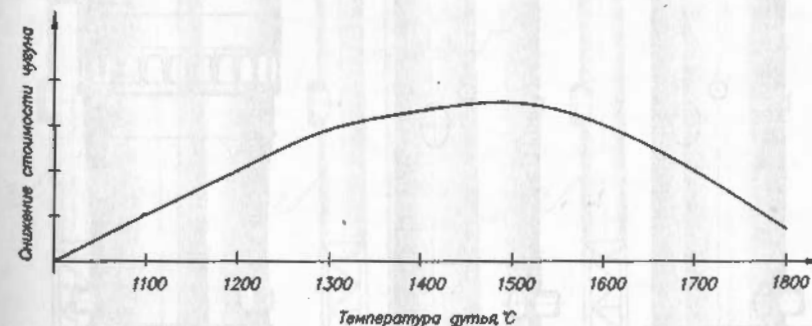


Рис. 1.7. Экономическая эффективность повышения температуры дутья

Для обеспечения доменной печи дутьевым воздухом создается блок из 3-х или 4-х аппаратов – воздушонагревателей, в которых нагревают воздух до 1100 – 1450°C.

Среди многих типов воздушонагревателей наибольшее применение получили воздушонагреватели со встроенной внутрь камерой горения, выполненные в виде одной или нескольких цилиндрических оболочек со сферическим куполом (рис. 1.8, а, б). В последние годы достаточно широко применяются бесшахтные воздушонагреватели (рис. 1.8, в).

В ряде случаев применяются воздушонагреватели в виде двух раздельных цилиндрических оболочек разных диаметров, одна из которых является отдельной вынесенной камерой горения, а вторая – камерой, где размещены блоки насадки (рис. 1.9).

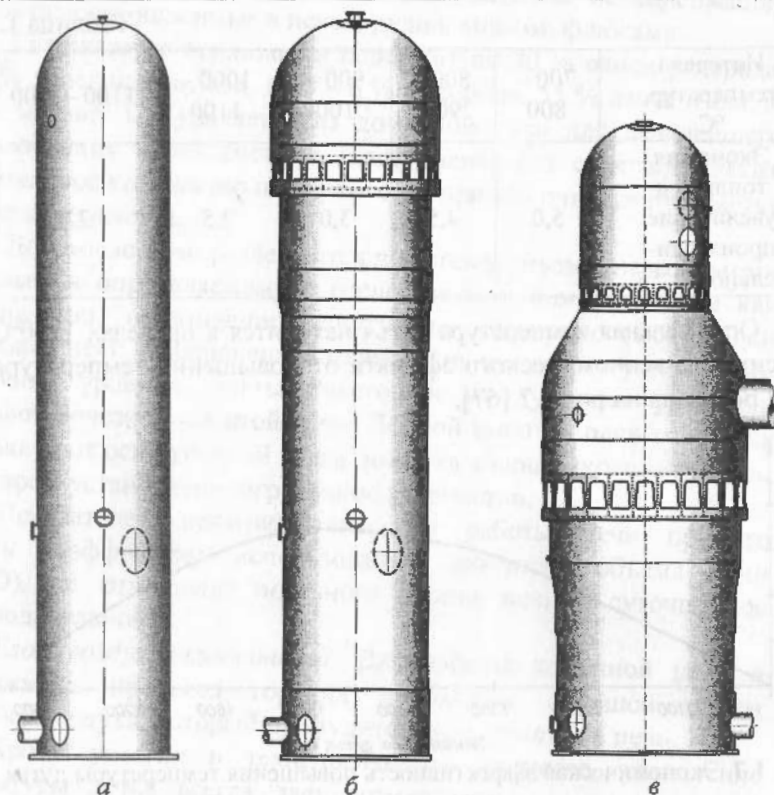


Рис. 1.8. Типы воздухонагревателей с внутренней камерой горения:
а – низкотемпературный; б – высокотемпературный; в – бесшахтный

Воздухонагреватели работают циклично. Цикл работы начинается с нагрева насадки горячими газами. В период нагрева через газовую горелку подается смесь очищенного доменного газа с природным газом и воздух, необходимый для горения. Образующиеся в результате горения горячие продукты поднимаются вверх по камере горения, проходят подкупольное пространство и под действием тяги дымовой трубы движутся вниз по каналам насадки. Проходя по ним, продукты горения отдают тепло блокам насадки, нагревают их, за счет чего аккумулируется большое количество тепла. Продукты горения выходят из воздухонагревателя через дымовые клапаны в дымовой боров или

дымопровод и оттуда – в дымовую трубу. По мере нагрева насадки процесс теплопередачи замедляется, и температура уходящих газов постепенно повышается. При достижении температуры дымовых газов на выходе из насадки 400°C нагрев прекращается. Период нагрева воздухонагревателя продолжается 3 – 4 часа.

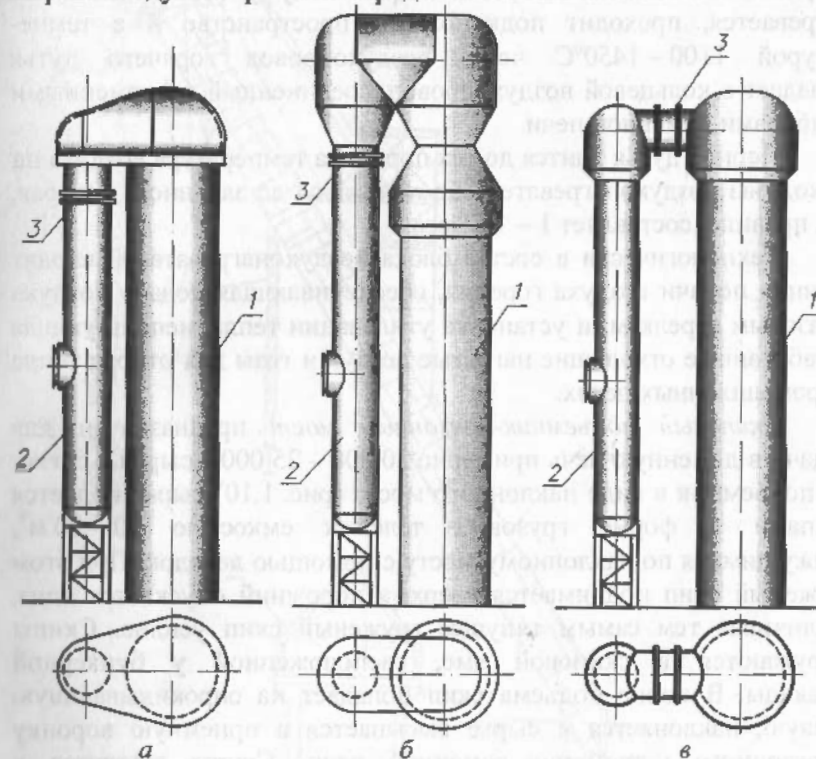


Рис. 1.9. Типы воздухонагревателей с вынесенной камерой горения:
а – фирмы Didier Werke; б – фирмы Koppers; в – фирмы Martin & Pagensstecher; 1, 2 – камеры насадки и горения соответственно;
3 – компенсатор

Как правило, блок воздухонагревателей включает три аппарата. При наличии четырех воздухонагревателей три из них одновременно нагреваются, а четвертый, ранее нагретый, подает горячий воздух в доменную печь.

После достижения заданной температуры купола прекращается нагрев и воздухонагреватель ставится «на дуге». При этом

отключается горелка, закрываются дымовые клапаны. Холодный воздух под давлением $0,3 - 0,4$ МПа, создаваемым воздуходувной машиной, по воздухопроводу холодного дутья подается в поднасадочное устройство и далее в каналы насадки. Поднимаясь вверх по каналам насадки, он отбирает аккумулированное тепло, нагревается, проходит подкупольное пространство и с температурой $1100 - 1450^\circ\text{C}$ через воздухопровод горячего дутья попадает в кольцевой воздухопровод, соединенный с фурменными приборами доменной печи.

Период дутья длится до тех пор, пока температура воздуха на выходе из воздухонагревателя не понизится до заданной, которая, как правило, составляет $1 - 1,5$ часа.

Технологически в состав блока воздухонагревателей входят станция подачи воздуха горения, обеспечивающая подачу воздуха к газовым горелкам, и установка утилизации тепла, использующая отработанные отходящие нагретые воздух и газы для отбора тепла в промышленных целях.

Скиповый подъемник-наклонный мост предназначен для подачи в доменную печь примерно $20\,000 - 25\,000$ т сырья в сутки. На подъемник в виде наклонного моста (рис. 1.10) сырье подается скипами в форме грузовых тележек емкостью $10 - 20\text{ м}^3$, движущимися по наклонному мосту с помощью лебедок. При этом груженный скип поднимается вверх, а порожний опускается вниз, увеличивая тем самым тянущее груженный скип усилие. Скипы загружаются в скиповой яме, расположенной у бункерной эстакады. В конце подъема скип попадает на опрокидывающую кривую, наклоняется и сырье высыпается в приемную воронку загрузочного устройства доменной печи. Скипы движутся в циклическом режиме, попеременно подавая в печь необходимые материалы. Скиповыми подъемниками оборудованы все доменные печи СНГ объемом до 3200 м^3 .

На доменных печах большего объема – № 9 объемом 5000 м^3 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (Украина) и № 5 объемом 5580 м^3 Череповецкого металлургического комбината «Северсталь» (Россия) – подача сырья осуществляется по конвейерной галерее, расположенной между бункерной эстакадой и загрузочным устройством доменной печи (рис. 1.11, а, б).

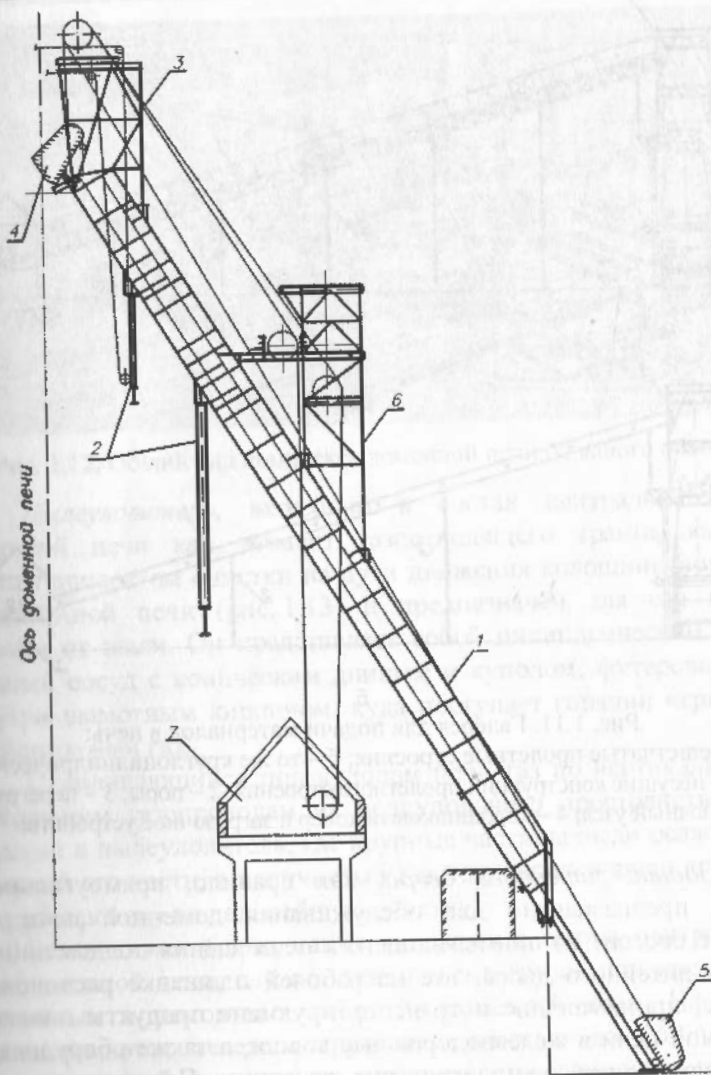


Рис. 1.10. Наклонный мост для подачи материалов в печь:
1 – несущие конструкции пролетного строения; 2 – опорные пилоны;
3 – опрокидывающее устройство; 4 – скип в положении разгрузки;
5 – скип в положении загрузки; 6 – подшивное устройство;
7 – здание управления лебедками

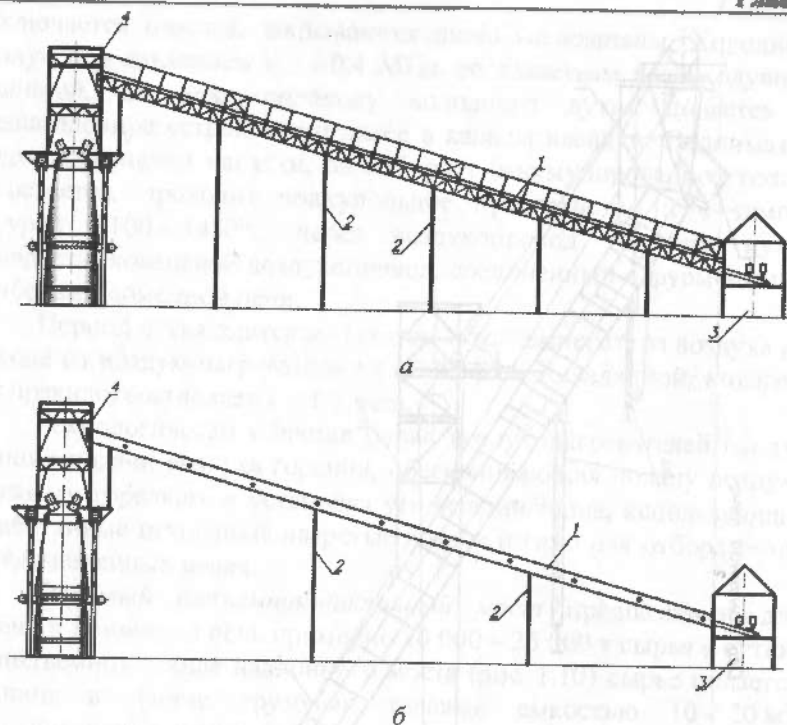


Рис. 1.11. Галерея для подачи материалов в печь:
 а – решетчатые пролетные строения; б – то же круглоцилиндрические;
 1 – несущие конструкции пролетного строения; 2 – поры; 3 – перегрузочный узел; 4 – колошниковый копер и загрузочное устройство

Здание литейного двора, как правило, прямоугольное в плане, предназначено для обслуживания доменной печи. Оно обычно состоит из примыкающего к печи здания поддоменика и здания литейного двора, где на рабочей площадке расположены желоба, принимающие и транспортирующие продукты плавки из доменной печи в железнодорожные ковши, а также оборудование, механизмирующее технологические операции. Помещение колошниковой подъемника с лебедками, управляющими движением скипов на наклонном мосте, располагается в здании поддоменика или выносится в отдельное здание.

На доменных печах большого объема сооружены круглые в плане здания литейных дворов диаметром 80 – 100 м (рис. 1.12).

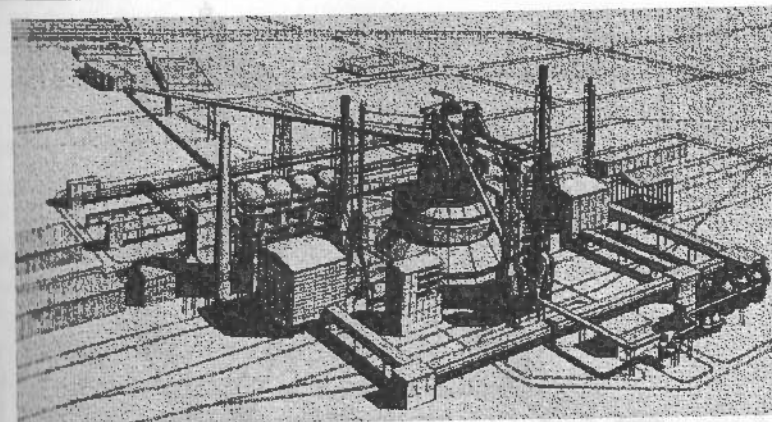


Рис. 1.12. Общий вид комплекса доменной печи большого объема

Пылеуловитель, входящий в состав центрального узла доменной печи как элемент газоотводящего тракта, является первым аппаратом очистки на пути движения колошниковых газов из доменной печи (рис. 1.13) и предназначен для его грубой очистки от пыли. Он представляет собой цилиндрический вертикальный сосуд с коническим днищем и куполом, футерованными изнутри шамотным кирпичом, куда поступает горячий «грязный» колошниковый газ.

Скапливающийся под куполом печи газ по вертикальным и исходящим газопроводам из подкупольного пространства печи попадает в пылеуловитель, где крупные частицы пыли осаждаются в нижней его части, а получистый газ поднимается вверх и уходит по трубопроводу на дальнейшую очистку.

Монтажная балка, также входящая в состав центрального узла доменной печи, служит для подъема грузов при проведении монтажных и ремонтных работ на доменной печи. На балках устанавливаются тележки грузоподъемностью до 150 т. Балка опирается одной стороной на конструкции колошниковой копра или при его отсутствии на вертикальные газоходы, другой – на пылеуловитель через специальную опорную конструкцию банного типа, называемую копром. На ряде печей по условиям компоновки для опирания монтажной балки вместо пылеуловителя применяют специальную опору – пространственную или плоскую.

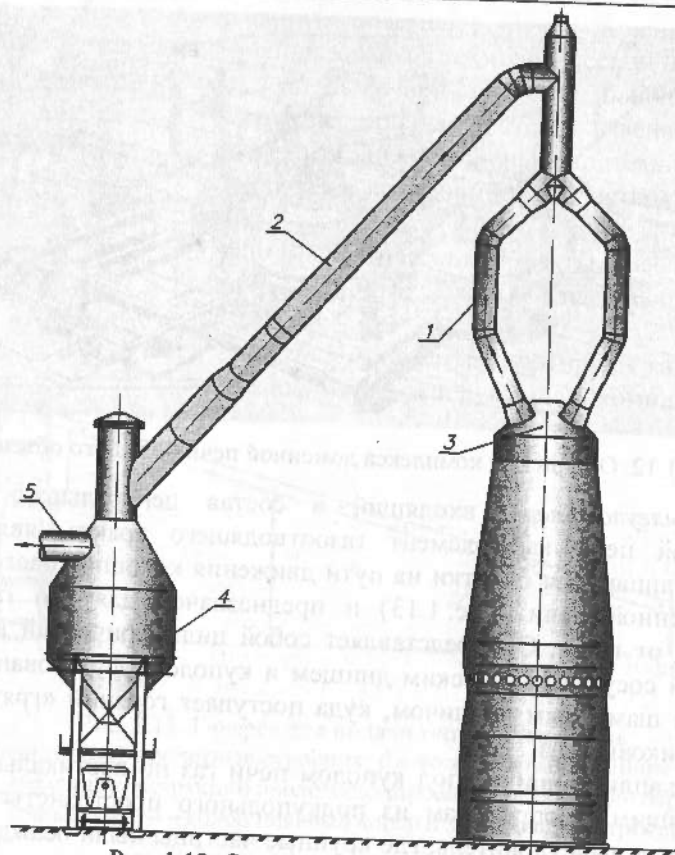


Рис. 1.13. Схема газоотводящего тракта:

1 – вертикальные газопроводы грязного газа; 2 – нисходящий газопровод грязного газа; 3 – подкупольное пространство доменной печи; 4 – пылеуловитель; 5 – патрубок газопровода выхода получистого газа на газоочистку

Лифт и шахта лестниц, соединенные в общий блок как неотъемлемая часть центрального узла доменной печи, предназначены для подъема грузов и людей на все уровни доменной печи и других объектов комплекса. Лифт может быть в прямоугольной шахте (рис. 1.14, а) или в круглоцилиндрической (рис. 1.14, б). Этот блок соединен с объектами печи переходными мостами и площадками, над некоторыми из которых размещены грузовые монорельсы.

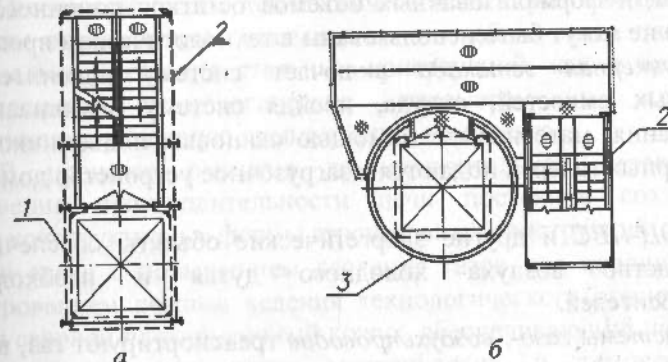


Рис. 1.14. Компоновка блока лифта:

а – с прямоугольной шахтой лифта; б – с круглой шахтой лифта;
1 – прямоугольная шахта лифта; 2 – шахта лестничной клетки;
3 – круглоцилиндрическая шахта лифта

Труба для взятия печи «на тягу» входит в комплекс объектов блока воздухонагревателей. Труба, высота которой, как правило, больше самих воздухонагревателей, служит для быстрого охлаждения доменной печи перед ремонтами. Труба соединена с воздухопроводом горячего дутья через клапан, при открытии которого за счет естественной тяги из печи быстро удаляется горячий воздух, охлаждая тем самым внутреннее пространство печи для ведения ремонтных работ.

Газоочистка доменного газа в виде отдельной установки расположена в стороне от центрального узла доменной печи и предназначена для тонкой очистки получистого колошникового газа после пылеуловителя и передачи его в общезаводской коллектор доменного газа для дальнейшего использования в технологических процессах, в том числе и в качестве топлива. Газоочистка включает в себя группу технологических аппаратов, в которых происходит разной степени очистки газа, соединенных между собой системой газопроводов с технологической арматурой.

Свеча для дожигания избытков доменного газа входит в состав сооружений газоочистки и является «буферным» приемником излишков доменного газа. Она предназначена для сжигания в специальном горелочном устройстве, установленном на высоте

40–60 м, неформализованных объемов остатков доменного газа, которые не могут быть использованы в технологическом процессе.

Бункерная эстакада включает систему накопительных бункерных емкостей, откуда, пройдя систему взвешивания и дозирования, материалы с помощью скиповых подъемников или конвейерных галерей подаются в загрузочное устройство доменной печи.

ТЭЦ-ПВС и другие энергетические объекты обеспечивают производство воздуха холодного дутья и необходимых энергоносителей.

Системы газо-, воздухопроводов транспортируют газ, воздух и другие энергетические носители к сооружениям комплекса и к внешним потребителям.

§ 1.2. Взаимосвязь конструктивных форм стальных конструкций и технологических процессов. Основные рациональные компоновочные решения

Важнейшей особенностью объектов комплекса доменной печи является выполнение стальными строительными конструкциями многих сооружений, особенно специальных (собственно доменной печью, воздухонагревателями, пылеуловителем, наклонным мостом, лифтом, газопроводами, сосудах газоочистки и т.п.), одновременно технологических функций. Вследствие этого создание рациональных доменных конструкций наряду с удовлетворением требований экономичности сооружений (уменьшение расхода стали, снижение общей стоимости, сокращение сроков возведения, повышение уровня ремонтпригодности, обеспечение технологичности изготовления и монтажа конструкций и быстрого ввода в эксплуатацию) дает возможность осуществлять безаварийный длительный технологический процесс.

В свою очередь, решение вопросов технологии без учета возможности их оптимальной конструктивной реализации, обеспечивающих нормальные условия возведения и эксплуатации сооружений, приводит к их удорожанию, может вызвать преждевременный износ конструкций и, в ряде случаев, привести к аварийной ситуации.

Несогласованность технологической и строительной частей проекта отрицательно сказывается на обеих его частях, а рациональные решения стальных конструкций, как и правильно определенные технологические параметры и процессы, обеспечивают успешную эксплуатацию комплекса.

В процессе развития домностроительной отрасли для повышения производительности печи постоянно создавались новые конструктивные формы строительных конструкций:

- в связи с повышением давления газов под колошником и форсированием режима ведения технологического процесса был создан сварной плотнопрочный кожух, обеспечивающий надежную работу в условиях роста механических и температурных воздействий;

- конструкции жестких колошниковых копров стабилизировали работу загрузочных устройств, что позволило обеспечить герметичность объема печи в периоды загрузки и тем самым увеличить ее производительность;

- рационализация конструктивных форм сооружений комплекса и их элементов путем выбора соответствующих марок стали, обеспечения длительной прочности в районах концентрации напряжений, термических воздействий и опасности хрупкого разрушения, создания методики расчета систем «кожух печи – холодильники – компенсационный слой – футеровка» и «кожух воздухонагревателя – компенсационный слой – футеровка» значительно увеличила длительность кампании печи при одновременном росте ее производительности.

Из выше сказанного следует, что сооружения комплекса доменной печи, которые совмещают функции несущих строительных конструкций и технологических агрегатов, при создании их конструктивных форм требуют комплексного подхода, обеспечивающего как длительную прочность конструкций, так и возможность ведения форсированного технологического процесса.

Таким образом, основная задача проектирования сооружений доменного комплекса состоит в создании прочных и надежных строительных металлоконструкций, дающих возможность непрерывного ведения этого процесса при минимальной их стоимости и технологичности изготовления и монтажа, что достигается выполнением следующих основных мероприятий:

- созданием оптимальной схемы сооружений;
- конструированием рациональных элементов и узлов их сопряжений;
- учетом действительных условий работы конструкций, выявлением фактических величин действующих нагрузок и воздействий и вероятности их одновременного действия, формализацией методики расчета;
- применением при экономической целесообразности сталей повышенной и высокой прочности, обеспечивающих необходимую стойкость к различным видам нагрузок и воздействиям в условиях доменного процесса;
- максимально допустимым использованием прочностных характеристик примененных марок сталей;
- созданием конструкций с разумным совмещением строительных и технологических функций;
- применением конструкций с максимальным объемом заводского изготовления, допускающим крупноблочный монтаж;
- внедрением комплексного монтажа стальных несущих и технологических конструкций и оборудования [62, 64, 81].

§ 1.3. Особенности условий эксплуатации металлических конструкций объектов доменного комплекса и предъявляемые к ним требования

В промышленном производстве доменный процесс с точки зрения воздействия его на конструкции и агрегаты является наиболее сложным. Он связан с переработкой различных материалов, расходом и выделением большого количества газа, тепла и др.

Каждый агрегат комплекса доменной печи находится под постоянным воздействием специфических нагрузок и непрогнозируемый период времени может эксплуатироваться в экстремальных условиях «пиковых» воздействий, что в ряде случаев приводит к сокращению срока эксплуатации этих сооружений и возникновению непредсказуемых ситуаций.

Учитывая, что все конструкции комплекса связаны между собой единым технологическим процессом и выход из строя хотя

бы одного сооружения влечет за собой остановку доменной печи, иногда аварийную, становится очевидной необходимость обеспечения высокой надежности всех конструкций.

Конструкции, совмещающие функции сложных инженерных строительных сооружений и технологических агрегатов, подвергаются постоянному воздействию различных во времени высоких температур, циклическому, пульсирующему давлению газовой среды, значительным механическим нагрузкам, коррозионным воздействиям и т.п. При этом сложность и многофакторность ведения технологического процесса не всегда обеспечивает стабильность расчетных эксплуатационных нагрузок.

В связи с этим, при проектировании основных несущих конструкций доменной печи следует учитывать особенности технологии доменного производства, назначение и работу оборудования, а также взаимовлияние всех строительных и технологических факторов, определяющих характер и величину воспринимаемых ими нагрузок и воздействий.

Основной характерной особенностью процесса доменной плавки является его идеализируемая непрерывность, что, при соблюдении условия стабильности, предполагает стационарный характер нагрузок и воздействий, воспринимаемых конструкциями печи в процессе эксплуатации. Однако реальный доменный процесс имеет весьма нестационарный характер, что обусловлено следующими основными причинами:

- основным противоречием доменного процесса, заключающимся в непрерывности доменной плавки и периодичности загрузки печи и выпуска жидких продуктов плавки (см. табл. 1.2), что в значительной степени влияет на газодинамические и тепловые процессы внутри печи;
- остановками печи на ремонт;
- выплавкой различных видов чугуна, что приводит к существенному изменению как теплового, так и газодинамического состояния печи;
- технологическими отклонениями, вызывающими неполадки в работе печи (канальный, периферийный ход газов, ускоренный разгар футеровки и прогар холодильников, насталеобразование и т.п.).

Таблица 1.2

Ориентировочное число выпусков чугуна в сутки

Объем печи, м ³	1000	1000 – 1700	2000	2700	3200	5000
Число выпусков	4 – 5	6 – 7	8 – 12	14 – 16	18 – 20	20 – 24

Сооружения доменного комплекса в процессе эксплуатации подвергаются специфическим нагрузкам и воздействиям. К наиболее важным технологическим воздействиям и состояниям, отличающим эти сооружения от других строительных конструкций и влияющим на выбор конструктивных форм, следует отнести:

- термические воздействия, связанные с ведением технологического процесса, а также с нарушением работы холодильников печи и других систем охлаждения, приводящие к перегреву и, соответственно, снижению прочностных характеристик стали и неравномерным деформациям конструкций;

- значительное давление газовой среды в сосудах и газопроводах и возможность резкого его повышения при нарушениях технологических процессов;

- воздействие футеровки при термическом расширении, учитывая ее постепенное разрушение, и неформализованного изменения давления на оболочки сосудов;

- выделение в процессе производства большого количества пыли, которая заполняет сосуды и газопроводы, а также скапливается на покрытиях зданий, технологических и переходных площадках;

- активную коррозию конструкций под воздействием постоянно действующей агрессивной газовой среды, отложений колошниковой пыли и воды;

- абразивный износ конструкций под воздействием сыпучих материалов и взвешенных в газовом потоке частиц колошниковой пыли;

- высокую вероятность нарушения технологических режимов эксплуатации сооружений, что приводит к резкому увеличению нагрузок – не предусмотренное проектом скопление пыли в пылеуловителе, чрезмерное заполнение газопроводов отложениями и конденсатом, возможность возникновения аварийных ситуаций

при перегревах кожухов доменной печи и воздухонагревателей, прорывы чугуна через кожух доменной печи, образование взрывоопасной газовой смеси в агрегатах, выход из строя приборов автоматического управления и контроля работы оборудования и т.п.;

- нестабильность технологических процессов, связанная с изменением состава шихты, состоянием конструкций, выплавкой чугуна разных марок, что оказывает серьезное влияние на термические и газодинамические воздействия;

- динамические воздействия при осадке шихты в доменной печи, работе скипов наклонного моста, тележки монтажной балки, лебедок открывания конусов загрузочного устройства, грузоподъемных средств, динамических ударов оборудования и т.п. [8];

- неформализованное поведение технологических конструкций-агрегатов в процессе эксплуатации (температурный рост чугунных холодильников доменной печи при их недостаточном охлаждении, разрушение кладки лещади доменной печи и образование в ней затвердевшего чугуна, распор кладки шахты доменной печи под воздействием отложений чугуна в ее швах и порах, особенно при работе на цинкосодержащих рудах, что приводит к увеличению давления на кожух, его деформациям, образованию трещин и т.п.);

- образование в процессе выплавки чугуна побочных продуктов, оказывающих негативное влияние на конструкции, например, паров азотной кислоты, появляющихся в воздухонагревателях при разложении воздуха под воздействием высокой температуры и давления, вызывающих ускоренную коррозию металла;

- обеспечение непрерывности технологического процесса и бесперебойной эксплуатации всех технологических агрегатов и сведение к минимуму остановок, связанных с ремонтами и заменой оборудования.

Кроме кожухов доменной печи, воздухонагревателей, пылеуловителя и других, значительная часть других конструкций доменного цеха испытывает также лучистый, импульсный нагрев от поверхностей жидкого чугуна, шлака, от горячего кокса, агломерата.

Наибольшему нагреву подвергаются участки рабочих площадок здания доменной печи (литейного двора), располо-

женные над путями стоянки и транспортирования горячих продуктов. Поверхность этих конструкций нагревается при отсутствии защитных экранов до 800°C , число теплосмен в сутки составляет 10 – 15 с амплитудой до $200 - 600^{\circ}\text{C}$.

Весьма существенное значение в проблеме долговечности конструкций доменного цеха имеет коррозионное воздействие наружной среды.

В этом районе в воздухе наблюдается наличие сернистого газа, двуокиси углерода, сероводорода, аммиака и др. В значительной мере коррозионное воздействие усиливают отложения пыли на наружных поверхностях конструкций. Для зданий доменного комплекса характерна железосодержащая гематитовая пыль (Fe_2O_3) с наличием графита. Эта пыль слабо растворяется в воде (до 8 %), не смывается с конструкций и практически постоянно находится на них во влажном состоянии.

Такое неблагоприятное воздействие в течение всей кампании печи постепенно снижает пригодность конструкций и, как правило, после окончания кампании они подлежат частичной или полной замене.

Для продления безаварийной эксплуатации стальных конструкций комплекса доменной печи их конструктивные формы и материал должны обеспечивать восприятие «пиковых» нагрузок, обладать достаточными пластическими свойствами и сопротивляемостью «охрупчиванию», в том числе и тепловому, высокой сопротивляемостью усталостным разрушениям, включая воздействия, вызывающие малоцикловую усталость, а также быть коррозиестойчивыми.

Конструкции должны быть доступны для осмотра, обслуживания и проведения быстрых ремонтов. Одним из важнейших условий компоновки конструкций является то, что местные разрушения отдельных элементов не должны приводить к общей аварийной ситуации.

§ 1.4. Основные этапы развития конструктивных форм металлических конструкций сооружений доменного комплекса

Эволюция конструктивных форм сооружений доменного комплекса неразрывно связана с постоянным развитием и совершенствованием технологических процессов выплавки чугуна и интенсификацией их технологических параметров, без которых развитие металлургии невозможно. Чаще всего изменению подвергались размеры доменных печей, которые характеризуются их полезным объемом. Если в начале XX века работали печи с полезным объемом $300 - 400 \text{ м}^3$, то уже в 20-х годах он достиг 1000 м^3 . В 1928 – 1930 гг. в период создания современной металлургической промышленности основой доменного производства были первые печи объемом 930 м^3 , а в 1938 г. в СССР были построены две самые большие в то время печи объемом 1300 м^3 .

За годы послевоенного восстановления и активного строительства доменных печей домностроение прошло большой путь развития.

Началом этого пути можно считать 1948 г., когда была создана первая цельносварная доменная печь взамен ранее сооружавшихся клепаных печей.

Среди основных этапов развития, определяющих эволюцию конструктивных форм сооружений комплекса доменной печи, можно отметить следующие:

1. Переход от клепаных к сварным конструкциям.
2. Рост объемов доменных печей от 1000 до 5580 м^3 .
3. Переход с низкого давления газов под колошником ($0,01 - 0,02 \text{ МПа}$) к повышенному ($0,05 - 0,07 \text{ МПа}$), а затем и к высокому – до $0,15 - 0,25 \text{ МПа}$. В отдельных проектах крупных доменных печей предусмотрена возможность дальнейшего повышения давления под колошником печи до $0,37 \text{ МПа}$.

Согласно ряду источников увеличение давления под колошником на $0,01 \text{ МПа}$ повышает производительность печи примерно на 1 – 3 %.

4. Повышение температуры дутьевого воздуха с $600 - 900^{\circ}\text{C}$ до $1300 - 1400^{\circ}\text{C}$.

5. Значительное увеличение количества и массы оборудования и средств механизации, сопровождающееся ростом различного рода воздействий на конструкции.

6. Применение испарительного охлаждения кожухов доменных печей и клапанов горячего дутья воздуходувателей.

7. Внедрение механизированной разливки чугуна и шлака при помощи качающихся желобов.

8. Использование горячего дутья, комбинированного с природным газом и кислородом, а в последние годы – с вдуванием пылеугольного топлива.

9. Широкое внедрение скоростных методов ремонтов и реконструкций доменных печей.

Указанные конструктивные и технологические факторы значительно изменили условия работы металлических конструкций.

При этом для создания соответствующих им новых конструктивных форм потребовалось глубокое изучение новых технологических процессов, нагрузок и воздействий, их влияния на условия работы и поведение металлических конструкций. Были разработаны принципиально новые компоновочные решения, оригинальные методики расчета конструкций, находящихся под воздействием комплекса трудноформализуемых нагрузок.

Исходя из этих принципов, были созданы новые конструктивные формы стальных конструкций сооружений, обеспечивающие их длительную и надежную работу, возможность непрерывного ведения интенсифицированного процесса и решение необходимых технологических задач.

Процесс создания новых конструктивных форм сооружений доменного комплекса в период их массового строительства по-прежнему был связан с постоянным увеличением объемов доменных печей. Важнейшим аспектом этого направления стало стремление к уменьшению расхода металла и снижению капиталовложений на строительство (табл. 1.3).

По данным «Гипромеца», на каждые 1000 м³ увеличения полезного объема печи капитальные затраты на 1 т годовой выплавки чугуна снижаются на 3 %.

Таблица 1.3

Удельный расход стали на сооружения комплекса доменной печи

Объем доменной печи, м ³	1033	1386	1513	1719	2000	2700
Расход стали на 1 м ³ объема печи, т	2,99	2,72	2,53	2,36	2,23	2,1

На этой основе в СССР была разработана серия типовых проектов доменных печей: в 1954 г. – объемом 1033 и 1386 м³, в 1955 г. – объемом 1513 м³, в 1957 г. – 1719 м³, в 1960 г. – 2000 м³. В 1967 г. была сооружена печь объемом 2700 м³, в 1969 г. – объемом 3200 м³, в 1974 г. – объемом 5000 м³, а в 1976 г. – объемом 5580 м³.

При этом эволюция технических решений, связанная с увеличением объемов доменных печей, рассматривалась не как количественное явление, а как качественный прогресс, который привел к изменению оборудования, состава и качества шихтовых материалов, технологии ведения процесса и т.п.

В таблице 1.4 приведены основные характеристики доменных печей различных объемов, получивших широкое распространение.

Таблица 1.4

Объем, печи, м ³	Год выпуска проекта	Давление газа под колошником, МПа	Выплавка чугуна, т/сут		Количество вырабатываемого газа, млн. м ³ /сут
			абсолютная	на 1 м ³ объема печи	
1033	1954	0,15	1200	1,16	4,30
1386	1954	0,18	1750	1,26	4,55
1513	1955	0,18	1950	1,29	4,74
1719	1957-1958	0,18	2350	1,37	5,13
2000	1960	0,25	3000	1,50	5,90
2700	1965-1966	0,25	5100	1,89	6,80
3200	1969	0,25	6600	2,05	8,60
5000	1972-1973	0,25	11200	2,24	12,5

В Украине металлургия как отрасль промышленности появилась во второй половине XIX века, когда были открыты богатейшие запасы железных руд Криворожского бассейна и началась разработка запасов коксующего угля Донецкого региона.

Наличие сырья необходимого качества и развитие сети железных дорог послужило толчком для строительства многих металлургических предприятий:

– завод Русско-Брянского акционерного общества в Екатеринославе (завод им. Петровского, г. Днепропетровск), 1886 – 1889 гг.;

- завод в Каменке (комбинат им. Дзержинского, г. Днепро-дзержинск), 1889 г.;
- доменный цех Гданцевского завода в г. Кривой Рог, 1892 г.;
- первые доменные печи в городах Енакиеве и Алчевске, 1895 г.;
- доменный цех Никополь-Мариупольского завода, 1896 г.;
- завод в г. Макеевка, 1897 г.;
- доменный цех Керченского завода, 1898 г.;
- доменные цехи Краматорского завода, 1899 г.

ГЛАВА 2 ОСОБЕННОСТИ УСЛОВИЙ РАБОТЫ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

§ 2.1. Влияние температурного режима

Технологические процессы, протекающие в доменной печи, происходят при высоких температурах (рис. 2.1), которые оказывают значительное влияние на прочность и долговечность системы «кожух – компенсирующий слой – холодильники – футеровка». Они создают не только изменяемые во времени термические воздействия, но и приводят к значительным механическим нагрузкам. Проблема воздействия температуры осложняется тем, что ее распределение внутри печи нестабильно и зависит от многих технологических факторов – качества шихтовых материалов, движения газовых потоков, количества и температуры дутья и др.

Футеровка подвергается не только сильному разогреву, но и механическому истиранию опускающейся шихтой. При периферийном ходе газов температура кладки еще более увеличивается.

На рис. 2.2 [39] представлено примерное распределение температур в кладке шахты при наличии холодильников.

Картина температурных полей внутри доменной печи показывает весьма сложное распределение изотерм, которые в процессе эксплуатации печи могут меняться.

Наибольшая температура, до 2300°C , наблюдается в районе фурменной зоны и газы, нагретые до этой температуры, передавая свое тепло кладке, нагревают ее. В район печи ниже этой зоны опускаются раскаленная шихта и продукты плавки, температура которых достигает $1400\text{--}1500^{\circ}\text{C}$, и также нагревают кладку. Этот процесс происходит неравномерно по высоте и в радиальном направлении.

Распар и нижняя часть шахты обычно подвергаются достаточно высоким воздействиям от перепадов температур, а специфическая зона и пик тепловых нагрузок могут значительно колебаться в зависимости от типа печи. Область, в которой отмечаются наиболее высокие нагрузки, тесно связана с особенностями загрузки печи и ведением технологического процесса. Это и вызывает колебания температур, приводящие к термической усталости материалов, что является одной из причин возникновения аварийных ситуаций.

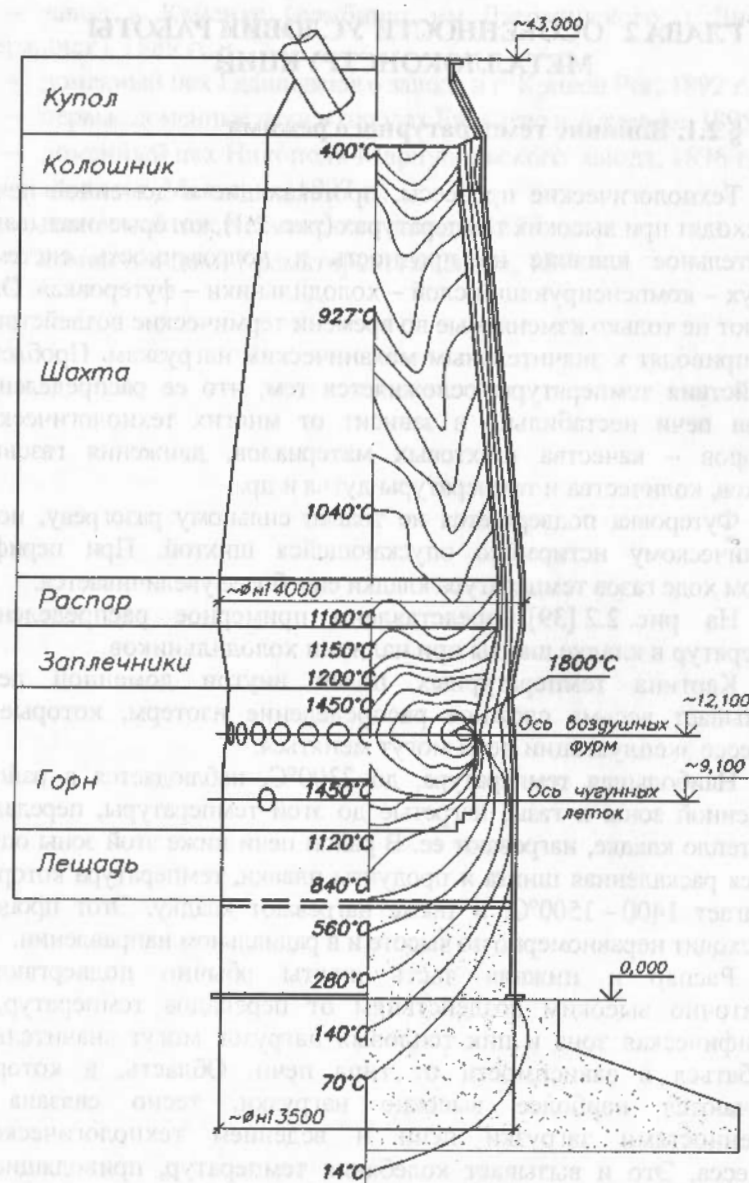


Рис. 2.1. Распределение температур по высоте доменной печи

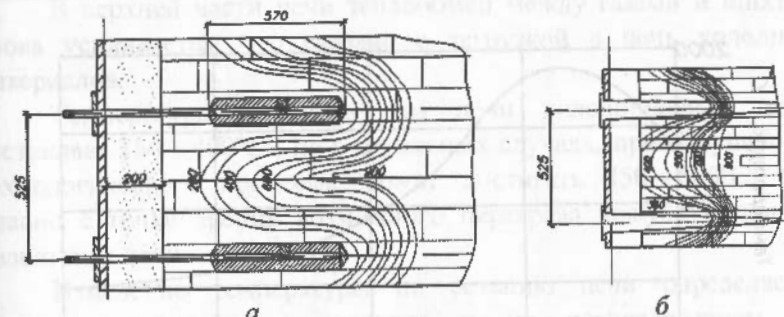


Рис. 2.2. Распределение температур в кладке шахты:
 а – при сплошном расположении горизонтальных холодильников;
 б – при расположении горизонтальных холодильников
 в шахматном порядке

Так, проведенные измерения температуры горячей поверхности футеровки показали ее резкие перепады: только в течение нескольких минут температура изменялась от 150 до 1000°C и более. Максимальные перепады температуры были отмечены в нижней части шахты.

Многолетние исследования этой проблемы позволили также установить средние параметры температурных полей и их распределение по высоте и поперечному сечению печи.

Достаточно высокие температуры в доменной печи развиваются в горне, где происходит горение топлива. На рис. 2.3 показано изменение температуры по радиусу горна на уровне фурм одной из печей. Если температура вблизи торца фурмы составляет 1650–1700°C, то в фокусе горения она повышается до 1850–2300°C [22].

Изменение температуры как материалов, так и газов по высоте печи, вызываемое теплопередачей от движущихся вверх газов к опускающимся вниз материалам, происходит неравномерно (рис. 2.4). В нижней части печи при температуре выше 1400–1500°C теплообмен между газами и материалами наиболее интенсивен. В этой зоне тепло расходуется не только на нагрев материалов, но и на процессы, происходящие с поглощением тепла, но без изменения температуры материалов (расплавление шихты, прямое восстановление элементов). В результате в этой области происходит резкое падение температуры газов и материалов, достигающее 500°C.

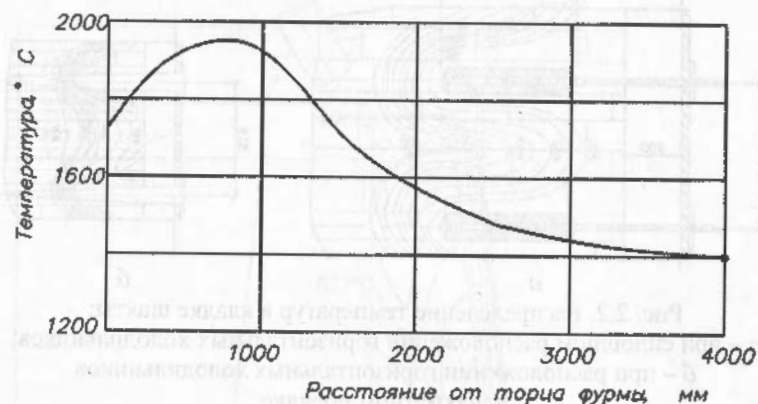


Рис. 2.3. Изменение температуры по радиусу горна на уровне фурм

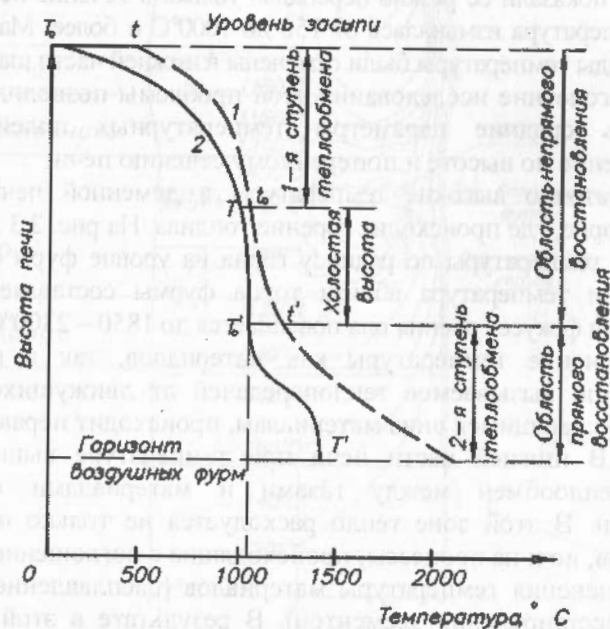


Рис. 2.4. Изменение температуры по высоте доменной печи:
1 — газы; 2 — шихтовых материалов

В верхней части печи теплообмен между газами и шихтой снова усиливается, что связано с загрузкой в печь холодных материалов.

Температура отходящих из печи колошниковых газов составляет $150 - 400^{\circ}\text{C}$, но в отдельных случаях, при нарушениях технологического процесса, может достигать $450 - 600^{\circ}\text{C}$, что опасно с точки зрения возможного перегрева кожуха купола и колошника печи.

Изменение температуры по сечению печи определяется качеством шихтовых материалов и их распределением на колошнике. При нормальной работе печи максимальная температура возникает у оси печи, а у ее стен она несколько ниже и изменение температуры описывается плавной кривой. При нарушениях в распределении материалов и газов изменяется и характер распределения температур по сечению печи. Такая взаимосвязь между параметрами технологического процесса и температурными полями внутри печи затрудняет формализацию их учета при оценке прочности и надежности конструкций.

Распределение температуры внутри воздухонагревателя зависит от того, в каком режиме работает агрегат — дутья или нагрева.

Так, при работе в дутьевом режиме температура купола достигает $1300 - 1450^{\circ}\text{C}$, а отходящих газов в поднасадочном устройстве — 400°C . В конце этого режима температура воздуха под куполом снижается на $200 - 300^{\circ}\text{C}$, а отходящих газов — на 100°C .

Экспериментальные исследования показали, что изменение температуры внутри воздухонагревателя происходит линейно и может быть представлено прямой.

На рис. 2.5 показано расчетное изменение температуры внутри воздухонагревателя, а на рис. 2.6 — распределение температур на поверхности его кожуха по данным натурных замеров.

Следует отметить, что температурные воздействия вызывают и рост кожухов агрегатов по вертикали. Так, исследования [86] показали неравномерный по периметру рост кожуха доменной печи до $4 - 5$ мм, наблюдаемый на $6 - 8$ -е сутки, что свидетельствует о неравномерности его нагрева.

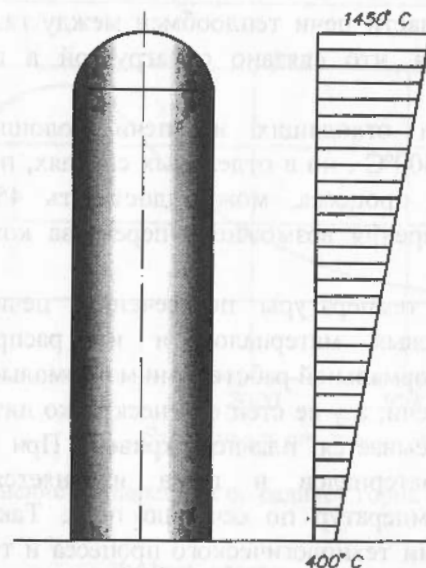


Рис. 2.5. Расчетное изменение температур по высоте внутри воздухонагревателя

Воздействие высоких температур на металлические конструкции оказывает негативное влияние на их надежность и долговечность:

- а) при нагревании сталей наблюдается заметное изменение их физико-механических характеристик;
- б) при локальных внезапных нагревах (тепловых ударах) появляются тепловые пятна, в которых возникают усилия, резко меняющие характер местного и общего напряженного состояния;
- в) нагрев всей конструкции вызывает температурные деформации ее элементов, что приводит к дополнительным усилиям.

Хотя не все стали ведут себя одинаково при повышенных температурах, однако общим для них является заметное снижение механических характеристик при нагревании. На рис. 2.7 [65] приведены графики зависимости «напряжения – деформации» обычной конструкционной стали при нагреве, показывающие, что нагрев до температуры 400°C и далее приводит к уменьшению несущей способности в два раза и более до полной ее потери.

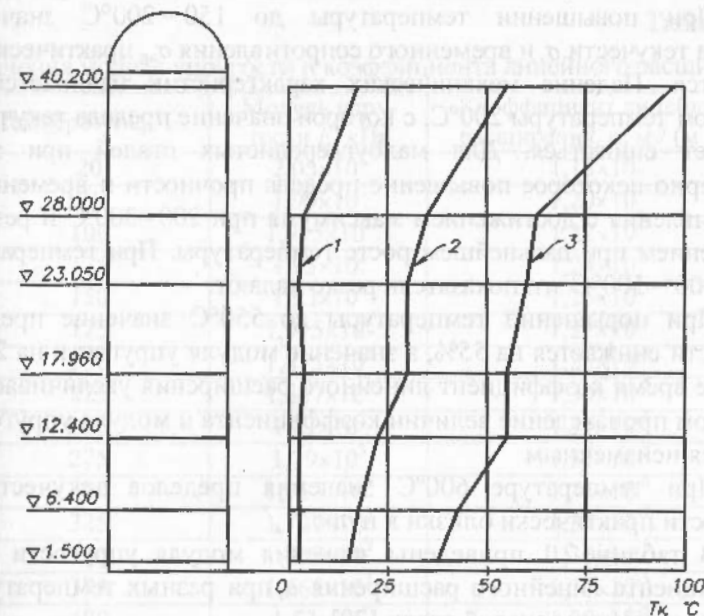


Рис. 2.6. Экспериментальное распределение температур на поверхности кожуха:

1 – в начале разогрева; 2 – в конце разогрева; 3 – при эксплуатации

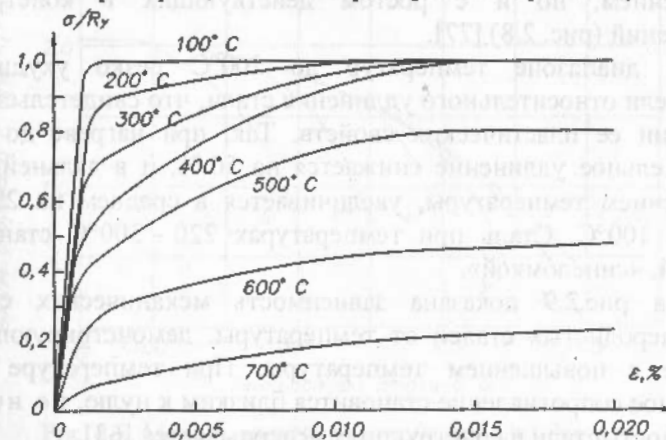


Рис. 2.7. Изменение свойств конструкционной стали при увеличении температуры

При повышении температуры до 150–200°C значения предела текучести σ_t и временного сопротивления $\sigma_{вр}$ практически не меняются. Падение механических характеристик начинается за пределом температуры 200°C, с которой значение предела текучести начинает снижаться. Для малоуглеродистых сталей при этом характерно некоторое повышение предела прочности и временного сопротивления с достижением максимума при 200–300°C и резким понижением при дальнейшем росте температуры. При температуре более 400–500°C эти показатели резко падают.

При повышении температуры до 550°C значение предела текучести снижается на 55%, а значение модуля упругости на 25%. В то же время коэффициент линейного расширения увеличивается. При этом произведение величин коэффициента и модуля упругости остается неизменным.

При температуре 600°C значения пределов текучести и прочности практически близки к нулю.

В таблице 2.1 приведены значения модуля упругости E и коэффициента линейного расширения α при разных температурах нагрева малоуглеродистой стали [70].

Характерно, что величина модуля упругости стали при воздействии высокой температуры меняется не только с ее повышением, но и с ростом действующих в конструкции напряжений (рис. 2.8) [77].

В диапазоне температур до 200°C резко ухудшаются показатели относительного удлинения стали, что свидетельствует о снижении ее пластических свойств. Так, при нагреве до 200°C относительное удлинение снижается на 50 %, и в дальнейшем, с повышением температуры, увеличивается в среднем на 25 % на каждые 100°C. Сталь при температурах 220–300°C становится хрупкой, «синеломкой».

На рис.2.9 показана зависимость механических свойств малоуглеродистых сталей от температуры, демонстрирующая их падение с повышением температуры. При температуре 600°C временное сопротивление становится близким к нулю, т.е. несущая способность стали в конструкциях исчерпывается [63].

Таблица 2.1

Значения модуля упругости и коэффициента линейного расширения

Температура, °C	Модуль упругости E , кПа	Коэффициент линейного расширения, α , м / (м °C)
20	$2,05 \times 10^5$	$1,18 \times 10^{-5}$
75	$1,99 \times 10^5$	$1,20 \times 10^{-5}$
100	$1,975 \times 10^5$	$1,22 \times 10^{-5}$
125	$1,95 \times 10^5$	$1,24 \times 10^{-5}$
150	$1,93 \times 10^5$	$1,25 \times 10^{-5}$
175	$1,915 \times 10^5$	$1,27 \times 10^{-5}$
200	$1,875 \times 10^5$	$1,28 \times 10^{-5}$
225	$1,847 \times 10^5$	$1,30 \times 10^{-5}$
250	$1,82 \times 10^5$	$1,31 \times 10^{-5}$
275	$1,79 \times 10^5$	$1,32 \times 10^{-5}$
300	$1,755 \times 10^5$	$1,34 \times 10^{-5}$
325	$1,727 \times 10^5$	$1,35 \times 10^{-5}$
350	$1,695 \times 10^5$	$1,36 \times 10^{-5}$
375	$1,665 \times 10^5$	$1,37 \times 10^{-5}$
400	$1,63 \times 10^5$	$1,38 \times 10^{-5}$
425	$1,60 \times 10^5$	$1,40 \times 10^{-5}$

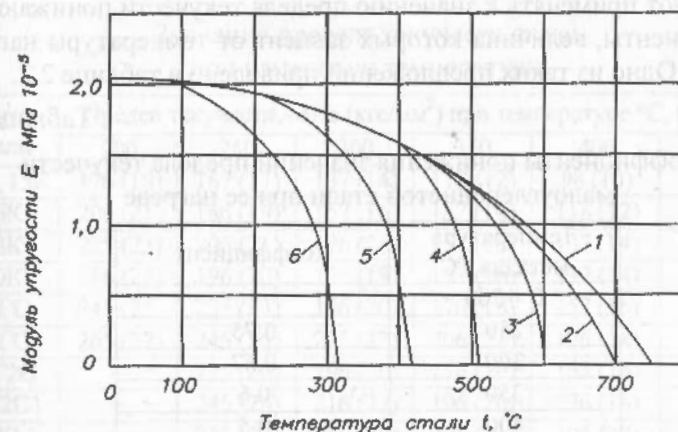


Рис. 2.8. Модуль упругости малоуглеродистой стали при разных температуре и напряжениях:
1 – 6 – модули упругости стали при напряжениях соответственно 0; 50; 100; 150; 200; 250 МПа

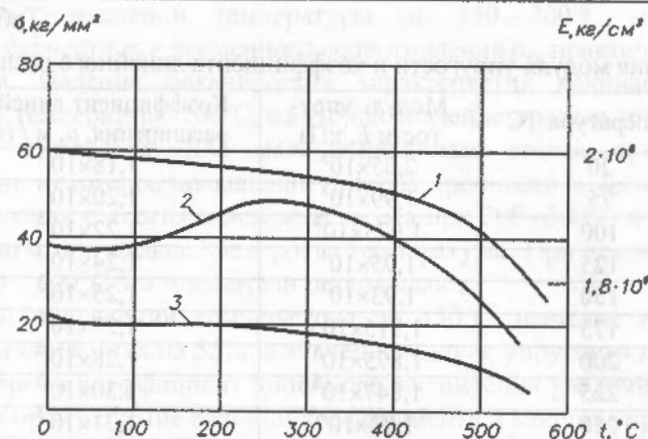


Рис. 2.9. Зависимость механических свойств малоуглеродистых сталей от температуры:

1 — модуль продольной деформации;
2 — предел прочности; 3 — предел текучести

Для численной оценки значений предела текучести при повышении температуры некоторые зарубежные нормы предлагают применять к значению предела текучести понижающие коэффициенты, величина которых зависит от температуры нагрева металла. Одно из таких предложений приведено в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Коэффициенты понижения значений предела текучести малоуглеродистой стали при ее нагреве

Температура металла, °С	Коэффициент
0 – 200	1
250	0,75
300	0,67
350	0,6
400	0,5

Другие источники рекомендуют конкретные показатели прочности стали при повышенных температурах, значения которых для некоторых марок стали приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Значения расчетного сопротивления стали при изменении температуры

№ п/п	Температура, °С	Расчетное сопротивление, МПа (кгс/мм²)			
		Марка стали			
		ВСтЗкп	ВСтЗсп/пс	09Г2С	10Г2С1
1	20	200 (20)	210 (21)	290 (29)	290 (29)
2	200	170 (17)	180 (18)	230 (23)	240 (24)
3	250	150 (15)	150 (15)	220 (22)	230 (23)
4	275	—	150 (15)	210 (21)	220 (22)
5	300	—	140 (14)	200 (20)	210 (21)
6	350	—	—	180 (18)	200 (20)
7	400	—	—	150 (15)	170 (17)
8	450	—	—	100 (10)	110 (11)
9	500	—	—	—	—

Прочность некоторых марок сталей, применяемых также для сосудов, работающих под давлением и при повышенных температурах, регламентируется ГОСТ 5520–79 и приведена в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Значения предела текучести стали при изменении температуры

Марка стали	Предел текучести, МПа (кгс/мм²) при температуре °С, не менее					
	200	250	300	350	400	450
12К, 15К	176 (18)	167 (17)	137 (14)	118 (12)	98 (10)	78 (8)
16К	206 (21)	186 (19)	157 (16)	137 (14)	118 (12)	98 (10)
18К	225 (23)	206 (21)	176 (18)	157 (16)	137 (14)	118 (12)
20К	216 (22)	196 (20)	176 (18)	157 (16)	137 (14)	118 (12)
16ГС	245 (25)	225 (23)	196 (20)	176 (18)	157 (16)	137 (14)
17ГС	265 (27)	245 (25)	225 (23)	206 (21)	176 (18)	176 (18)
09Г2С	—	225 (23)	196 (20)	176 (18)	157 (16)	—
10Г2С1	—	245 (25)	216 (22)	196 (20)	176 (18)	—
12ХМ	—	225 (23)	216 (22)	206 (21)	196 (20)	186 (19)
10Х2М	—	225 (23)	216 (22)	206 (21)	196 (20)	186 (19)
12Х1МФ	—	245 (25)	235 (24)	225 (23)	216 (22)	206 (21)

Как видно из таблицы, для широко применяемой при проектировании конструкций объектов комплекса доменной печи строительной стали марки 09Г2С зависимость величины предела текучести стали от температуры практически совпадает с данными таблицы 2.3.

Большое влияние температура оказывает на показатель ударной вязкости, который начиная со 100°C постепенно снижается (рис.2.10).

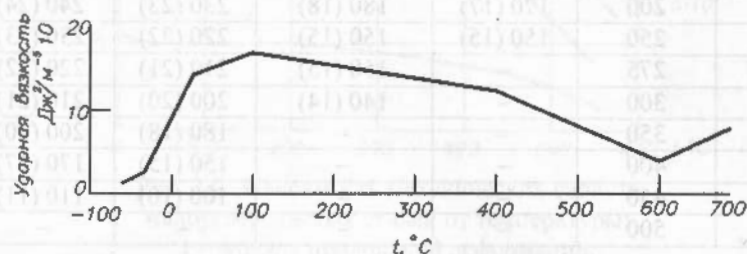


Рис. 2.10. Зависимость ударной вязкости стали ВСтЗ от температуры

Анализируя поведение малоуглеродистых сталей при повышении температуры эксплуатации, можно сделать следующие выводы:

1) предел текучести и временное сопротивление практически сохраняются до температуры примерно 200°C. При большем нагреве наблюдается снижение прочностных свойств с полной их потерей при температуре около 600°C;

2) модуль деформации E уменьшается с повышением температуры;

3) показатели ударной вязкости снижаются при повышении температуры выше 100°C;

3) характеристики пластичности (относительное удлинение ϵ и сужение перед разрывом ψ) вначале немного уменьшаются, а начиная с 200 – 300°C резко увеличиваются.

Несколько иначе ведет себя сталь повышенной прочности марки 15ХСНД, которая наиболее приспособлена для работы при повышенных температурах. Исследования [56] показали, что основной металл и сварные соединения из этой стали при работе в интервале температуры 200 – 400°C достаточно хорошо сохраняют свои прочностные и пластические характеристики и могут надежно

противостоять эксплуатационному режиму при подобных температурах. Работа стали 15ХСНД в интервале температур 400 – 600°C связана с незначительным снижением предела текучести и предела прочности. Что касается относительного удлинения и ударной вязкости, то они под влиянием термического воздействия в интервале температур 400 – 600°C изменяются мало.

В целом сталь 15ХСНД характеризуется стабильностью прочностных и пластических показателей в интервале температур 200 – 400°C (рис. 2.11). Аналогично ведет себя в конструкциях при повышенных температурах и сталь 10ХСНД.

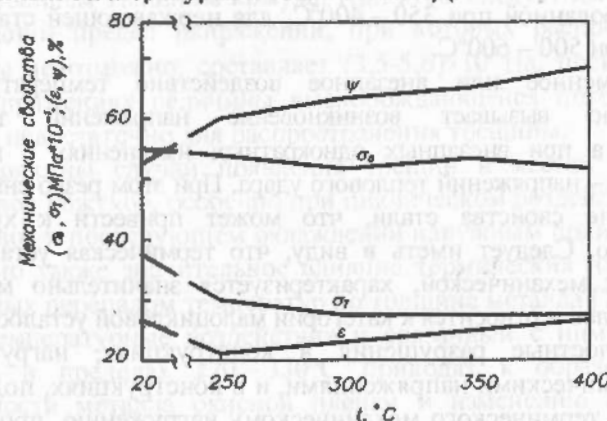


Рис. 2.11. Зависимость механических свойств стали 15ХСНД от температуры

Отмеченные изменения свойств стали являются функцией абсолютных величин температур, воздействующих на конструкцию. Однако существенное влияние оказывает также продолжительность температурного воздействия и особенно его цикличность. При достаточно длительном воздействии температуры возможно появление тепловой ползучести. Оно связано с тем, что в процессе работы металлоконструкций при определенных величинах нагрузки и температуры в них возникают пластические деформации, которые с течением времени оказывают разупрочняющее влияние на сталь.

Проводимые в последние годы исследования показали, что воздействие высоких температур на сталь приводит к изменению ее структуры и повышению предела хладноломкости, вызывая так называемую тепловую хрупкость металла [15].

Нарастание деформаций может ограничить работу конструкций. Такие случаи встречаются при перегревах кожухов шахт доменных печей, после чего часть кожуха, теряя устойчивость, превращается местами в гофрированную оболочку, что приводит к его осадкам, наклону и, соответственно, сбоям в работе оборудования.

В кожухах, находящихся под действием растягивающих усилий, местные перегревы и связанная с ними деформация ползучести вызывают появление трещин и разрывы.

Ползучесть появляется при температуре, характерной для данной марки стали: для малоуглеродистой при 300°C, для низколегированной при 350 – 400°C, для нержавеющей стали типа X18H9T при 500 – 600°C.

Переменное или внезапное воздействие температуры на конструкцию вызывает возникновение напряжений тепловой усталости, а при внезапных однократных изменениях с высоким градиентом – напряжений теплового удара. При этом резко снижаются пластические свойства стали, что может привести к хрупкому разрушению. Следует иметь в виду, что термическая усталость, в отличие от механической, характеризуется значительно меньшим числом циклов и относится к категории малоциклового усталости.

Усталостные разрушения в конструкциях, нагруженных только термическими напряжениями, и в конструкциях, подвергаемых кроме термического механическому нагружению, происходят по-разному. Чем выше прочностные характеристики материала, тем меньшее влияние на число циклов изменения температур, приводящих к появлению трещин, оказывает механическая нагрузка.

Исследования [54] показали, что также опасен локальный перегрев кожуха, вызывающий появление сжимающих радиальных добавок к фоновым напряжениям, затухающим по мере удаления от центра теплового пятна. В зоне пятна добавки сжимающие, но за его пределами имеет место смена знака усилий.

Анализ зависимости максимальных добавок к фоновому напряженному состоянию от радиуса горячего пятна показал, что с увеличением этого радиуса указанные добавки монотонно возрастают. При постоянных условиях теплообмена более высоким фоновым температурам соответствует меньший уровень добавок к фоновым напряжениям.

Уровень температурных добавок и добавок к напряжениям значительно падает с увеличением толщины кожуха. Этот результат отражает особенности локального перегрева, а именно: увеличение толщины приводит к росту потерь тепловой энергии на теплопередачу в тангенциальном направлении. При этом, начиная с некоторой толщины, интенсивность роста становится малой, а добавки к температурам и напряжениям стабилизируются.

Таким образом, опасность образования хрупких трещин в перегретой зоне возрастает с увеличением радиуса горячего пятна и уменьшением толщины кожуха. При этом следует иметь в виду, что нижний предел напряжений, при которых распространение трещины невозможно, составляет $(3,5-5,6) \times 10^7$ Па, поскольку при этих напряжениях величины высвобождающейся потенциальной энергии недостаточно для распространения трещины.

Известны случаи появления трещин в местах локальных перегревов кожухов, особенно при циклическом воздействии таких перегревов и последующем охлаждении наружным поливом водой. Отмечено также значительное влияние термических напряжений, вызванных перепадом температур по толщине металла [75].

Температурные воздействия и связанный с ними перегрев металла в пределах 220 – 330°C приводят к образованию на поверхности металла окисной пленки и изменению ее цвета – появлению так называемых цветов «побежалости». По этим цветам можно ориентировочно определить места перегрева и уровень температуры нагрева металла.

§ 2.2. Влияние агрессивной среды

Коррозионное разрушение металлов является одним из основных постоянных повреждений строительных и технологических металлоконструкций и существенной причиной снижения их долговечности. Около 50 % металлоконструкций промышленных сооружений эксплуатируются в условиях средне- и сильноагрессивных сред. По экспертным оценкам, в Украине потери от коррозии составляют 10 – 15 % всего переработанного металла.

Коррозия – это необратимый процесс и его зависимость от времени имеет нарастающий характер без максимумов и минимумов. Величина коррозии зависит от материала конструкций, конкретного места их расположения, поперечного сечения элементов, состояния защитного покрытия и влажности среды и т.п.

Для металлоконструкций доменной печи характерно воздействие как наружной, так и внутренней агрессивных сред. Воздействие наружной среды связано с присутствием в атмосфере доменного цеха сернистого и углекислого газов, образующихся при сгорании топлива.

Коррозионные повреждения, уменьшая площадь поперечного сечения элементов, снижают несущую способность конструкции в целом, а при динамических воздействиях могут привести к коррозионным усталостным трещинам.

Скорость коррозии зависит от многих причин, среди которых:

- способ защиты металла от коррозии;
- агрессивность окружающего воздуха и внутренней среды, их влажность и температура;
- химический состав металла.

В первую очередь коррозия поражает плохо окрашенные элементы, места скопления воды, пыли и т.п.

В среднем коррозионный износ наружной поверхности открытых конструкций доменных цехов составляет 0,2–0,3 мм/год. Положение усугубляется относительно высокой влажностью среды в зонах наружного полива кожуха печи, в районе установок придоменной грануляции шлака и т.п. Дополнительное коррозионное воздействие оказывает наличие на конструкциях гематитовой пыли во влажном состоянии. В связи с тем, что срок службы лакокрасочных покрытий находится в пределах 3–5 лет, а периодичность капитальных ремонтов составляет в среднем 10–15 лет, значительную часть времени конструкции эксплуатируются в незащищенном состоянии и подвергаются усиленному коррозионному износу.

На рис. 2.12 показана скорость коррозии для различных металлов [65], на рис. 2.13 – сравнительная диаграмма скоростей коррозии в различных профилях, а на рис. 2.14 – график роста глубины коррозии в условиях доменного цеха [35].

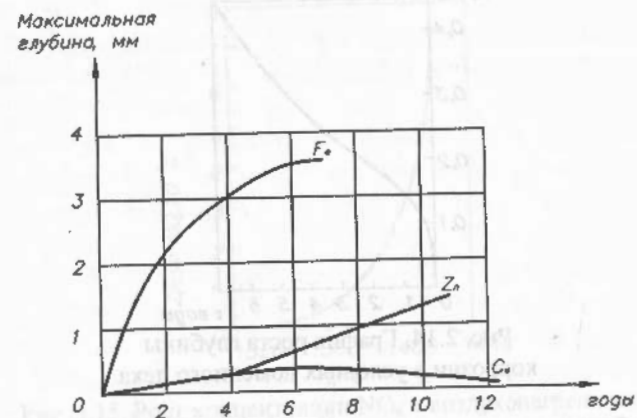


Рис. 2.12. Скорость развития коррозии для различных металлов

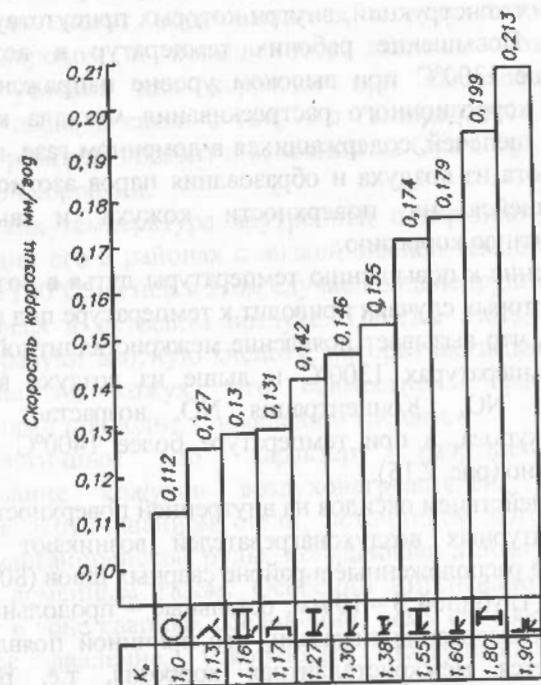


Рис. 2.13. Сравнительная диаграмма скоростей коррозии в различных профилях

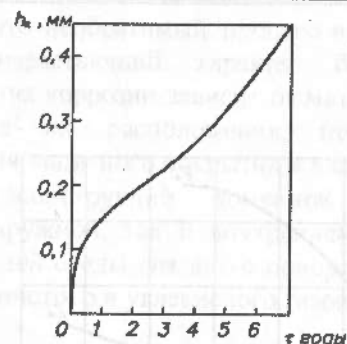


Рис. 2.14. График роста глубины коррозии в условиях доменного цеха

Особенно опасна коррозия внутренних поверхностей кожухов воздухонагревателей, компенсаторов, воздухопроводов горячего дутья и других конструкций, внутри которых присутствует высокая температура. Повышение рабочих температур в воздухонагревателях свыше 1300°C при высоком уровне напряжений создает условия для коррозионного растрескивания металла кожуха под воздействием щелочей, содержащихся в доменном газе, а также для выделения азота из воздуха и образования паров азотной кислоты, конденсирующейся на поверхности кожуха и вызывающей межкристаллитную коррозию.

Стремление к повышению температуры дутья в воздухонагревателях в некоторых случаях приводит к температуре под куполом до $1400 - 1450^{\circ}\text{C}$, что вызывает появление межкристаллитной коррозии, когда при температурах 1300°C и выше из воздуха выделяются оксиды азота NO_x . Концентрация NO_x возрастает с ростом температуры купола, а при температуре более 1400°C она растет экспоненциально (рис. 2.15).

Под воздействием оксидов на внутренней поверхности кожухов высокотемпературных воздухонагревателей возникают волосные трещины, чаще расположенные в районе сварных швов (80 % трещин – поперечные, глубиной 3 – 10 мм, остальные – продольные длиной до 450 мм). Исследования показали, что причиной появления этих трещин является межкристаллитная коррозия, т.е. разрушение металла по границам зерен, при одновременном воздействии на него растягивающих напряжений и агрессивной среды.

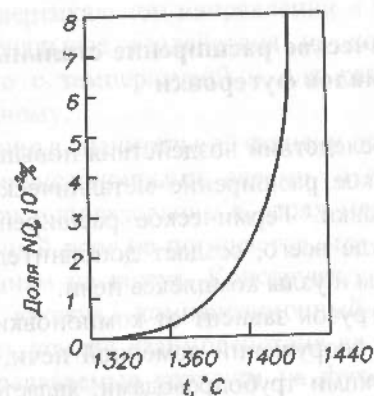


Рис. 2.15. Рост концентрации NO_x в воздухонагревателе в зависимости от температуры купола

Оксиды могут образовываться в результате обогащения дутья кислородом и повышенного давления воздуха. Благоприятные условия для коррозии при высокой температуре создаются также в связи с тем, что газовая смесь под куполом воздухонагревателя состоит в основном из O_2 и CO_2 , что способствует газовой коррозии.

Так как температура внутренней поверхности кожуха при эксплуатации его в районах с низкой зимней температурой может быть ниже 100°C , на ней в этом случае конденсируются пары воды, содержащиеся в дутьевом воздухе. Окислы азота, соединяясь с влагой, образуют азотную кислоту, которая оказывает агрессивное воздействие на кожух, что совместно с растягивающими напряжениями приводит к появлению трещин.

Аналогичным по характеру разрушения является растрескивание кожухов воздухонагревателей, связанное со щелочным охрупчиванием стали, источником которого является пыль от марганцовистой руды, попадающая в воздухонагреватель вместе с доменным газом. Особенно интенсивно этот процесс протекает в зоне сварных соединений, чему способствует высокое внутреннее давление, ускоряющее поступление содержащей щелочь пыли к кожуху.

§ 2.3. Термическое расширение стальных конструкций и материалов футеровки

Одним из последствий воздействия повышенных температур является термическое расширение металлических конструкций и материалов футеровки. Термическое расширение металлических конструкций, прежде всего, создает дополнительные нагрузки на отдельные элементы и узлы комплекса печи.

Величина нагрузок зависит от компоновки сооружений. Как правило, комплекс сооружений доменной печи, связанных между собой технологическими трубопроводами, является весьма жесткой системой, способной лишь в незначительной степени компенсировать температурные деформации отдельных ее элементов. Это приводит к расстройству узлов сопряжения и в ряде случаев к их разрушению. Чаще всего это явление имеет место в узлах присоединения штуцеров воздухопровода горячего дутья к воздухонагревателям, сопряжения прямого воздухопровода горячего дутья с отводами на воздухонагреватели и практически во всех узлах сопряжения газозоопроводов с кожухами технологических агрегатов.

Как показывает анализ, усилия в этих местах достигают весьма значительных величин и растут в связи с наметившейся в последнее время тенденцией к увеличению толщины кожухов, что приводит к снижению деформативности узлов. Компоновка комплекса сооружений доменной печи, определяемая технологическим процессом и генеральным планом, практически не дает возможности изменить характеристику системы в сторону повышения ее гибкости и снижения тем самым возникающих дополнительных усилий. Определенное повышение гибкости системы можно получить установкой компенсаторов перемещений. Это решение влечет за собой устройство дополнительных конструкций и, соответственно, капитальных затрат, однако весьма благоприятно сказывается на работе всей системы.

Огнеупорная футеровка под воздействием высоких температур меняет свои геометрические размеры и оказывает горизонтальное (радиальное) давление на кожухи футерованных конструкций. Кроме того, стены из огнеупорных материалов в этих

условиях растут в вертикальном направлении и за счет сил трения передают меридиональные воздействия на кожух. Расширение огнеупоров связано с температурой и для различных их видов проявляется по-разному.

Это расширение в значительной степени должно поглощаться специальными компенсационными слоями, входящими в состав кладки. Однако при использовании в слоях малодеформируемого материала радиальный рост не погашается, что приводит к значительным воздействиям на кожух. Конструктивные формы многослойной оболочки «кожух – компенсационный слой – футеровка» должны обеспечить усилия взаимодействия слоев таким образом, чтобы усилия, передаваемые кожухом на футеровку, исключили возможность появления в ней растягивающих усилий и появления трещин.

Рост усилий вызывает прогрессирующий разгар кладки и требует увеличения толщины кожуха, что в свою очередь снижает качество металла кожуха и его трещиностойкость. Правильно подобранная толщина компенсационного слоя и выбор материала с необходимыми упругими свойствами позволяет регулировать эти усилия.

Именно такое снижение надежности кожухов агрегатов наблюдалось при заполнении компенсационных слоев разными засыпками, которые под действием температуры твердели и теряли свои компенсационные свойства. Применение в дальнейшем упругодеформированных матов на каолиновой основе и других материалов для компенсационных слоев позволило в значительной степени увеличить компенсацию термических радиальных деформаций футеровки воздухонагревателей и доменных печей и общую прочность.

Следует отметить, что в целом уровень напряжений в кожухе в большей степени связан с воздействиями футеровки, чем внутреннего давления. Так при максимальном рабочем давлении воздуха в агрегатах до 0,3 – 0,4 МПа давление футеровки на кожух составляет 1,0 – 2,0 МПа.

Испытания воздухонагревателей, находящихся в эксплуатации, показали, что циклические нагрузки приводят к исчерпанию деформативных свойств материала компенсационных зазоров.

Поэтому в летнее время при нагреве кожуха наружным воздухом он не всегда испытывает давление кладки, а воспринимает только давление дутья. Зимой, с понижением температуры, в кожухе возникают дополнительные напряжения, так как кладка и компенсационный слой исчерпывают свою деформативность.

Таким образом, от правильно скомпонованной системы огнеупорной футеровки, обеспечивающей необходимое расчетное сжатие всех ее слоев, в большой степени зависит прочность и надежность всего сооружения. При этом необходимо иметь в виду, что кожух также оказывает реактивное воздействие на футеровку, что при определенных обстоятельствах может вызвать ее разрушение. Это приводит к нарушению тепловой изоляции кожуха и меняет картину силового взаимодействия.

Большое влияние на напряженное состояние оказывают остановки агрегатов, связанные с полным или частичным остыванием огнеупоров. В некоторых огнеупорах первоначальный нагрев вызывает необратимые процессы, и при остывании в кладке периферийных стен могут появляться трещины с раскрытием до 60–70 мм.

Таким образом, огнеупорная футеровка агрегатов и трубопроводов комплекса доменной печи, обеспечивая тепловую защиту металла кожухов, одновременно создает на них основные силовые воздействия, вызванные ее термическим расширением.

Величины этого расширения и, соответственно, напряжения в кожухе зависят от физических свойств огнеупоров, работающих в столь сложных условиях.

Учитывая большой разброс физико-механических характеристик огнеупоров, вопрос оптимальной компоновки системы «кожух – компенсационный слой – футеровка» является одним из основных, определяющих общую прочность конструкций.

§ 2.4. Охлаждение доменных печей

Для замедления процесса износа огнеупорной кладки, предохранения кожуха доменной печи от перегрева, исключения их разрушения при воздействии высоких температур и обеспечения

длительной и надежной работы конструкций применяется система охлаждения доменной печи. Она обеспечивает поддержание допускаемой температуры кожуха печи, охлаждение кладки, а также предохраняет кожух от перегрева при полном или значительном разрушении защитной футеровки и образовании гарнисажа. Надежность работы и долговечность кожуха печи во многом определяются состоянием системы охлаждения.

Как правило, разрушению кожуха шахты доменной печи предшествуют во времени следующие этапы [3]:

- выгорание кладки футеровки (в основном, на уровне 1–3 рядов холодильников) – 0,5–1,5 года;
- выход из строя холодильников (в основном, на 1–3 рядах) – 2–4 года;
- появление необратимых пластических деформаций кожуха, трещин в кожухе шахты – 2,5–5 лет.

Очевидно, что надежность кожуха в большой степени связана со сроком службы системы охлаждения. После выхода из строя холодильников растут термические напряжения в кожухе доменной печи, и при выходе из строя группы близлежащих холодильников через 0,5–2,5 месяца возникают повреждения кожуха – выпучины, трещины и т.п.

Простейшим способом охлаждения был наружный полив кожуха водой. Однако по многим причинам, в том числе и в связи с большим расходом воды, он не получил распространения, за исключением случаев выхода из строя системы охлаждения и необходимости предотвращения аварийных ситуаций.

В настоящее время доменные печи охлаждаются холодильниками различной конструкции, расположенными между кожухом и футеровкой или внутри последней. По залитым в них трубам пропускается охлаждающий элемент, отбирающий поступающее из печи тепло.

В качестве охлаждающего элемента может использоваться холодная техническая или химически очищенная вода – система водяного охлаждения, или та же вода, доведенная до кипения – система испарительного охлаждения [2].

Сущность первого способа заключается в том, что охлаждающая вода, проходя через змеевики холодильных плит, отбирает от их стенок тепло и нагревается до температуры 35–50°C.

При втором способе используется скрытая теплота парообразования для отвода тепла от охлаждаемых конструкций. Применяемую обычно холодную охлаждающую воду заменяют кипящей химически очищенной водой, при этом отвод тепла осуществляется за счет образования пара. При испарительном охлаждении 1 кг охлаждающей воды отводит 600 ккал вместо 10 ккал при водяном охлаждении, что позволяет значительно сократить расход воды и делает испарительное охлаждение весьма эффективным. К недостаткам такого вида охлаждения следует отнести, в первую очередь, высокую стоимость химически очищенной воды и определенные трудности выявления неисправного холодильника.

Поэтому, чаще всего применяют комбинированное охлаждение, когда часть элементов охлаждается водяными холодильниками, а часть элементов печи имеют испарительную систему охлаждения.

Достаточно широко применяется испарительное охлаждение для клапанов горячего дутья воздухонагревателей. При этом исключается образование накипи в охлаждающих трубах и их засорение, что увеличивает стойкость шиберов и в десятки раз уменьшает расход воды.

На доменных печах используются различные типы холодильников, которые в основном классифицируются как вертикальные и горизонтальные.

Одним из наиболее распространенных типов холодильников являются чугунные плиты, прикрепленные к кожуху болтами. Такие холодильники охлаждают кладку на достаточно большую глубину, но не обеспечивают равномерного охлаждения по всей поверхности, в связи с чем происходит неравномерный износ кладки. Это приводит к ее быстрому разрушению и, как следствие, к сгоранию и выходу из строя холодильников. Зафиксированные в кладке и жестко связанные с кожухом холодильники при вертикальном росте кладки деформируются (выворачиваются) и создают концентрацию местных напряжений в кожухе.

Для снижения жесткости крепления плит холодильников к кожуху были разработаны крепления их на одном болте, расположенном выше центра тяжести плиты. В это одно центральное отверстие пытались вывести и водопроводные трубы с

целью сокращения количества отверстий. Однако распространения эти решения не получили.

Особое внимание уделяется охлаждению в районах чугунных и шлаковых леток. Циклические, высокие локальные температуры требуют решения вопроса компенсации температурных деформаций, недостаточность которой приводит к разрывам кожуха.

Для охлаждения толстостенной кладки шахты печи применяли горизонтальные холодильники коробчатого типа. Эти холодильники требуют специальных вырезов, значительно ослабляющих кожух.

Использовали также горизонтальные плитовые холодильники, которые вставлялись в узкие амбразуры и оставались в кладке, а через кожух пропускались лишь водопроводные трубы. Такие «плавающие» холодильники улучшают условия работы кожуха, но быстро выходят из строя при разрушении трубок, вызванном их срезом или изгибом.

Увеличение стойкости и срока службы холодильников является основной проблемой продления срока кампании печи.

К основным причинам разрушения холодильников печи можно отнести:

- физико-химические процессы, происходящие при высоких температурах в материале холодильников;
- термические напряжения, связанные с неравномерным температурным полем в холодильниках и жестким креплением их к кожуху печи;
- литейные напряжения, возникающие в холодильниках при их отливке.

Холодильник при работе в печи разогревается. В плитовых холодильниках постепенно снижается температура плиты в направлении от обогреваемой поверхности к фронту охлаждающих труб. В результате такого нагрева плитовой холодильник удлиняется и деформируется – коробится. Так как он жестко прикреплен к кожуху с помощью болтов, в нем возникают значительные термические напряжения, которые теоретически могут привести к разрушению плиты, однако, это происходит достаточно редко. Надо полагать, что термические деформации компенсируются зазорами в отверстиях под болты.

Достичь надежной работы холодильников можно при хорошем охлаждении, нежестком креплении к кожуху и правильной технологии отливки.

Одним из основных критериев эффективности работы системы охлаждения печи является образование по мере разрушения кладки устойчивого гарнисажа на поверхности охлаждающего элемента. Гарнисаж представляет собой смесь затвердевших всплесков и капель шлака и металла толщиной от нескольких миллиметров до 10–20 см и обладает относительно хорошими изоляционными свойствами. Стабильность образования гарнисажа зависит в основном от охлаждающей способности и степени механического «прилипания» к охлаждающему элементу.

Под действием высоких температур гарнисаж может отрываться, но затем образуется снова. Процесс нарастания гарнисажа и его отрыва вызывает значительные колебания в термической нагрузке на кожух и футеровку и чтобы избежать ее разрушения конструкция системы охлаждения должна выдерживать такие циклические перепады. Чем больше эффективность охлаждающего элемента, тем более стабилен и дольше остается на поверхности гарнисаж, сохраняя свои изоляционные и защитные свойства.

В конце 80-х годов прошлого века были разработаны так называемые крупноблочные охлаждаемые панели кожуха, из которых собирали шахту печи, обеспечивая скоростной монтаж. Панель представляла собой элемент кожуха размером 1/8 часть периметра высотой 10–12 м, на который заранее была установлена система водопроводных труб, залитых в бетон (рис. 2.16). Элемент крупноблочной панели приведен на рис. 2.17.

По своему силовому взаимодействию между элементами такая система существенно отличается от системы с чугунными холодильниками. Особенностью этой конструкции является:

- жесткая связь между бетоном и кожухом в виде стальных труб, препятствующая свободному термическому деформированию бетона и создающая дискретные значительные воздействия на кожух и на бетон при своем деформировании;
- наличие двух разномодульных материалов – бетона и огнеупорной футеровки;
- отсутствие кольцевых компенсационных зазоров.

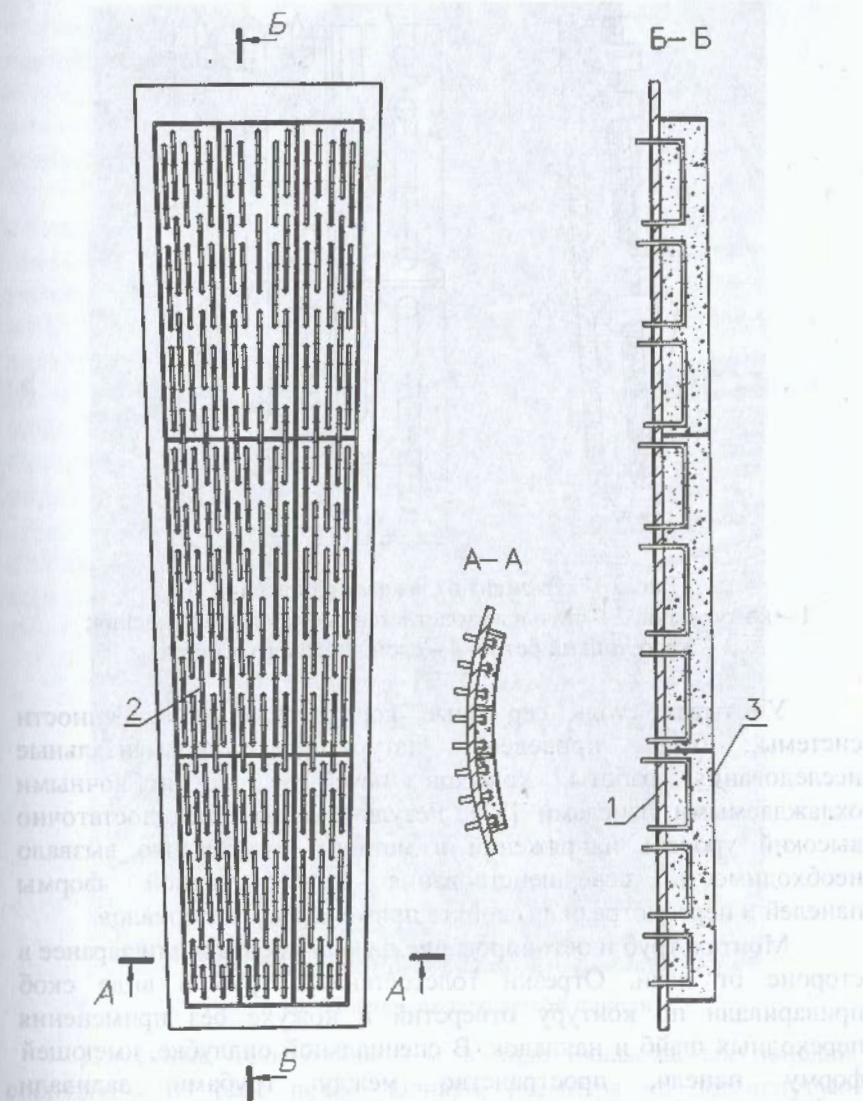


Рис. 2.16. Общий вид охлаждаемой панели:

- 1 – кожух печи; 2 – стальные толстостенные трубы охлаждения;
3 – жаростойкий бетон

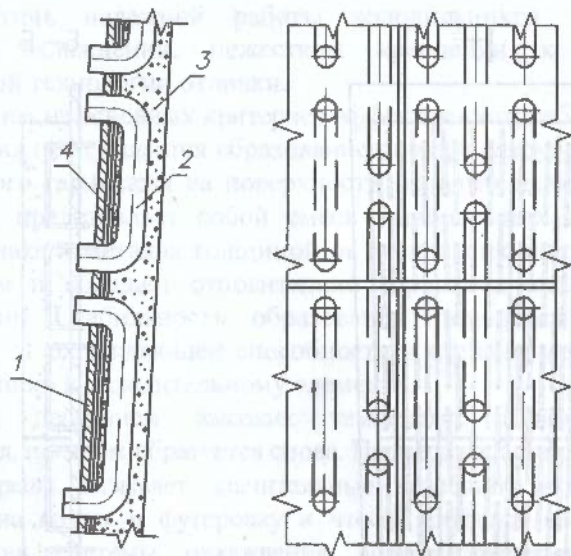


Рис. 2.17. Элемент охлаждаемой панели:

- 1 – кожух печи; 2 – стальные толстостенные трубы охлаждения;
3 – жаростойкий бетон; 4 – слой листового асбеста

Учитывая столь серьезные конструктивные особенности системы, были проведены натурные экспериментальные исследования работы кожухов печей с крупноблочными охлаждаемыми панелями [31]. Результаты показали достаточно высокий уровень напряжений в металле кожуха, что вызвало необходимость совершенствования конструктивной формы панелей и пересмотра ряда свойств применяемых материалов.

Монтаж труб и бетонирование панели производили заранее в стороне от печи. Отрезки толстостенных труб в виде скоб приваривали по контуру отверстий в кожухе без применения переходных шайб и накладок. В специальной опалубке, имеющей форму панели, пространство между трубами заливали огнеупорным бетоном. Для компенсации термического расширения бетона между ним и кожухом укладывали слой асбеста. Такая водоохлаждаемая панель позволила совместить монтаж шахты печи и охлаждаемых элементов (рис. 2.18).

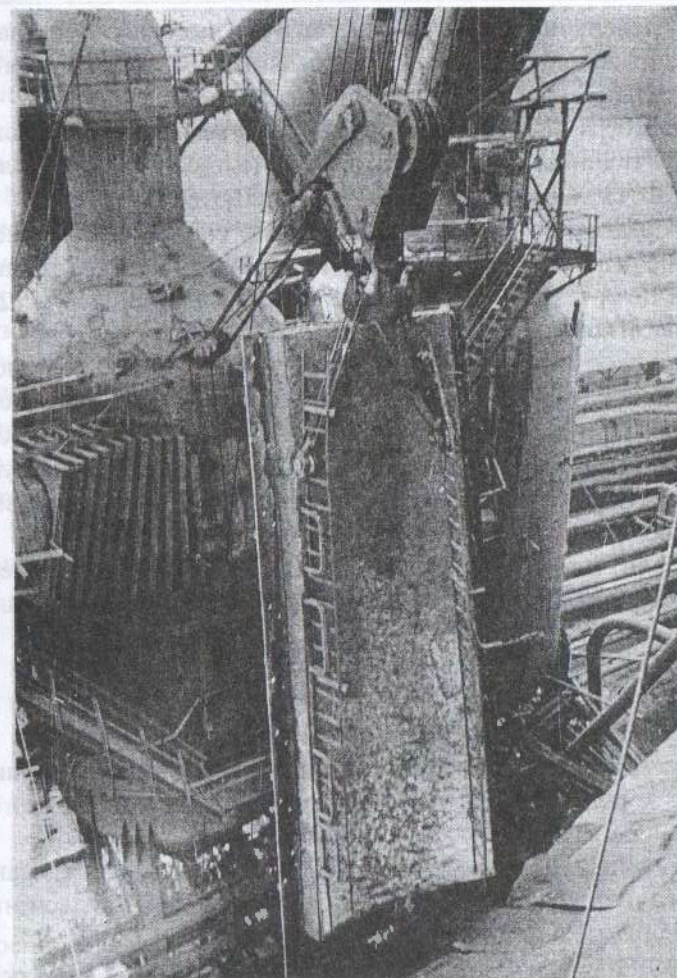


Рис. 2.18. Монтаж охлаждаемой панели

Доменные печи с кожухом в виде охлаждаемых панелей сооружены на ряде печей. Однако, несмотря на достигнутую достаточно высокую стойкость кожухов, такие панели не нашли широкого применения на доменных печах предприятий бывшего Союза. Причин здесь несколько, но основные состоят в необходимости тщательно контролировать состав бетона, соблюдать технологию его укладки и выполнения стыков между панелями и

т.д. Определенную роль играет достаточно высокая интенсивность роста напряжений в кожухе в первый период эксплуатации при незначительном дальнейшем его снижении.

Несмотря на это, такие панели при тщательном выполнении работ и технической поддержке отечественных специалистов используются на ряде зарубежных предприятий.

В развитие более эффективных систем охлаждения в последние годы были разработаны медные плитовые холодильники для стен печи в зонах высокого нагрева, в которых был исключен ряд недостатков, присущих чугунным холодильникам.

Для продления кампании печи при выходе из строя системы охлаждения или возникновении локальных перегревов (в случае частичных разрушений кладки или плит в неохлаждаемой зоне) и предотвращения аварийных ситуаций применяется наружный полив кожуха водой, для сбора и отвода которой устраиваются кольцевые козырьки и желоба. Вода подается на верхнюю часть кожуха или в зону перегрева и, стекая сплошным слоем по поверхности, собирается на нижних горизонтах в специальные желоба и отводится от печи.

§ 2.5. Влияние технологических факторов, нагрузок и силовых воздействий на напряженно-деформированное состояние кожухов агрегатов

Из многих технологических факторов, оказывающих существенное влияние на надежность и долговечность конструкций, можно выделить следующие:

- нестабильность технологического процесса, возможность нарушения рабочих параметров внутреннего давления воздушно-газовой среды и температуры, приводящих к колебаниям величины воздействий на конструкции;
- термическое расширение футеровки и несущих конструкций;
- абразивное воздействие шихтовых материалов, а также пыли, содержащейся в доменном газе;
- нарушения в работе отдельных элементов комплексных систем (разрушение футеровки, отказ в работе охлаждения печи и т.п.);

– отклонения от нормального режима эксплуатации, приводящие к увеличению температуры, нагрузок от отложений пыли, конденсата и др.;

– возможность возникновения аварийных ситуаций в результате взрыва газа, осадки шихты, прорыва чугуна и т.п.

Металлические конструкции комплекса доменной печи должны отвечать многим требованиям, не предъявляемым в большинстве случаев к другим промышленным строительным конструкциям. Основные из них – это способность восприятия нагрузок, возникающих при нарушении режимов эксплуатации, достаточная степень приспособляемости к экстремальным воздействиям, высокая сопротивляемость хрупким разрушениям и малоциклового усталости, а также наличие общего запаса надежности в аварийных ситуациях. При проектировании учитываются все действующие нагрузки и воздействия.

К основным из них, определяющим прочность и долговечность сооружений, относятся:

- нагрузки от массы сыпучих и жидких материалов в доменной печи;
- нагрузки от всевозможных отложений внутри конструкций и на их поверхности;
- внутреннее давление газовой среды;
- термические воздействия и связанное с ними расширение огнеупорных материалов и конструкций;
- атмосферные воздействия;
- статические и динамические нагрузки от оборудования.

Кожух доменной печи находится под воздействием внутреннего давления газовой среды, термического расширения футеровки и холодильников, давления массы сырых материалов и продуктов плавки, термического расширения системы «доменная печь – пылеуловитель», массы оборудования, ветровых и климатических воздействий.

Как отмечалось, внутреннее давление газовой среды под колошником печи в современных печах доходит до 0,2 – 0,25 МПа. Характер его воздействия не постоянный, статический, изменяющийся по величине во времени и зависящий от объема и давления воздуха, подаваемого через фурменные приборы в

доменную печь. Давление уменьшается или сбрасывается совсем при переводе печи на «тихий» ход, остановке на ремонт или по другим причинам.

Термическое расширение футеровки и холодильников при повышении температуры создает значительные нагрузки на кожух, величины которых достигают 1,5 – 2,0 МПа. Особенно велики они в наиболее горячей зоне печи в районе фурменных приборов, где происходит горение кокса. Здесь температура внутри печи достигает 1850 – 2300°C и более, а кладка нагревается до 1000 – 1300°C.

Температура кожуха печи при нормальной работе системы охлаждения не должна превышать 80 – 120°C. Однако в эксплуатации доменных печей известны случаи нестабильной работы холодильников, вследствие чего резко возрастают тепловые нагрузки, они выходят из строя, приводя к местным перегревам кожуха. В ряде случаев положение усугубляется нарушением хода печи, когда газовый поток идет вдоль ее стен («периферийный ход») и дополнительно нагревает кладку и холодильные плиты.

Учитывая это, правилами безопасности в доменном производстве [68] предусмотрено, что при нагреве кожуха до температуры 150°C и выше необходимо принимать меры по ее снижению.

Механическое давление на кожух сырых материалов и продуктов плавки действует на протяжении всего периода эксплуатации печи и практически постоянно по своей величине.

Характер его воздействия статический, изменяющийся в зависимости от технологического процесса – загрузки печи или выпуска продуктов плавки. При некоторых эксплуатационных ситуациях, например при осадке шихтовых материалов после их «подвешивания» (т.е. обрушения столба материалов), может иметь место динамическое приложение нагрузки с высоким коэффициентом динамики.

Характер и величина нагрузок и воздействий зависят от длительности эксплуатации печи, этапа технологического процесса и режима его ведения, а при резком нарушении технологического процесса эти факторы могут радикально изменяться как по величине, так и месту возникновения.

За время кампании печи (исчисляемое от ее задувки до капитального ремонта I разряда и составляющее, как правило, 15 – 20 лет) происходит существенное разрушение огнеупорной кладки, просыпание набойки, выход из строя значительного числа холодильников. Возникают ситуации, вызванные нарушением технологического процесса доменной плавки и приводящие к возникновению дополнительных нагрузок на кожух печи. К таким ситуациям можно отнести перекося уровня шихты в печи, приводящий к неравномерному одностороннему нагреву кладки, подвисание шихтовых материалов с дальнейшим их обрушением, настылеобразование, локальный перегрев с образованием тепловых пятен, приводящий к появлению зон двухосного сжатия, изменение направления движения газов внутри печи и др.

Отмеченные виды воздействий создают, в основном, расчетный уровень напряжений. Однако весьма тяжелый режим эксплуатации и конструктивные особенности печи приводят к появлению ряда неформализованных по величине и характеру воздействий, в значительной степени влияющих на напряженное состояние кожуха. В частности возникают дополнительные напряжения в зоне ослабления кожуха отверстиями [7], в местах устройства кладки впрыток к кожуху, в местах переломов профиля кожуха. Особую опасность создают местные перегревы, связанные с разрушением футеровки или выходом из строя холодильников, дополнительные усилия в местах соприкосновения плитовых холодильников с кожухом за счет их взаимного поворота и т.п. [6].

При местных перегревах деформации расширяющегося перегретого участка стесняются окружающей холодной зоной, вызывая напряжения, значительно превосходящие предел текучести. При поливе таких мест наружной охлаждающей водой в металле возникают напряжения обратного знака. Кроме того, перепад температур ухудшает свойства стали.

К дополнительным воздействиям следует отнести также вертикальный рост кладки от термического расширения, создающий высокие меридиональные напряжения в кожухе. Наличие в кожухе большого количества вырезов и отверстий под холодильники, выводных трубок и болтов их крепления и др. нарушает прочность и герметичность кожуха и создает условия для

концентрации напряжений. В этих местах уровень напряжений особенно высок и в большинстве случаев именно здесь зарождаются трещины.

Сложное напряженное состояние лещади, в основном, зависит от состояния углеродистых блоков и кладки. В начале кампании печи, когда кладка цела, наиболее высокие напряжения в металле кожуха лещади отмечаются в верхней самой нагретой ее зоне. Однако, по мере разрушения кладки лещади, всплытия ее верхних рядов и образования ямы разгара зона высоких температур опускается ниже в сохранившиеся слои массива. При этом температурный распор в верхней зоне уменьшается с одновременным его ростом в нижней зоне кожуха лещади.

В очень тяжелых условиях работает кожух горна, состоящий из двух оболочек – опрокинутой конической в фурменной зоне и цилиндрической – в зоне металлоприемника. Коническая форма оболочки весьма неблагоприятна для работы в условиях радиального давления, т.к. приводит к появлению дополнительного вертикального распора. Кроме того, здесь сконцентрировано большое число вырезов для фурменных приборов, чугунных и шлаковых леток. Кладка в районах леток расположена вплотную к кожуху. Это вызывает особенно высокую концентрацию напряжений.

Кожух воздухонагревателя работает в двухосном напряженном состоянии под воздействием внутреннего давления газовой среды и термического расширения футеровки. Наиболее напряженная часть кожуха расположена в районе верхней высоко-температурной зоны, где футеровка подвергается интенсивному термическому воздействию.

Внутреннее давление газовой среды действует циклически, что связано с работой воздухонагревателя в режиме «нагрев – дутье». Исходя из того, что длительность цикла составляет примерно 3 – 4 часа, число циклов изменения нагрузки достигает в течение года 2 – 3 тысячи. Циклическая нагрузка вызывает упруго-пластические деформации, снижающие прочность и долговечность кожуха, ресурс выносливости которого при использовании малоуглеродистой стали определяется числом циклов $n \leq 10^5$.

Отмеченными двумя видами воздействий характеризуется обычный уровень напряженного состояния кожуха воздухо-

нагревателя. Однако, в период эксплуатации возможно появление других воздействий, иногда радикально меняющих картину напряженно-деформированного состояния.

Одним из основных факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние кожуха воздухонагревателя, является перепад температуры его поверхности. Измерения, проведенные на ряде воздухонагревателей, показали, что температура купола одного и того же воздухонагревателя колеблется в разных точках в пределах 70 – 100°C. Кроме того, во время нагрева – дутья перепад температур достигает 50 – 100°C, а в районе штуцеров горячего дутья до 150°C [25, 27]. При таких перепадах температур в условиях стесненных деформаций металла кожуха в нем периодически могут возникать напряжения, превышающие предел текучести металла, что может стать причиной его термической усталости.

В результате пульсирующего воздействия горения газа в горелках с критическим значением режима возможно обрушение футеровки камеры горения. По этой или иной причине целостность футеровки может нарушаться, при этом кожух перегревается и работает в условиях тепловых ударов.

Несимметричность в горизонтальном сечении воздухонагревателя со встроенной камерой горения является причиной возникновения значительных термических напряжений в огнеупорной кладке и кожухе. Известное явление наклона камеры горения на величину до 400 мм в сторону насадки приводит к разрушению верхней части насадки и дополнительному воздействию на кожух.

Днище воздухонагревателя при неудачной компоновке футеровки и определенном соотношении жесткостей нижней части кожуха и днища во время эксплуатации испытывает дополнительные циклические воздействия, связанные с работой в циклах «нагрев – дутье».

Особо следует отметить воздействие на воздухонагреватели воздухопроводов горячего дутья. Довольно жесткая компоновка системы при отсутствии компенсаторов приводит к высоким нагрузкам в месте примыкания штуцеров, где зачастую появляются перегревы, повреждения футеровки, трещины в кожухе.

Также искажается картина напряженного состояния и в местах примыкания воздухопроводов холодного дутья, дымовых штуцеров, газопроводов и газовых горелок. Концентрация напряжений, обусловленная наличием больших вырезов и усилия, вызванных термическим расширением трубопроводов, в значительной степени повышает уровень местных напряжений.

Газо- воздухопроводы, соединяющие агрегаты печи в единый технологический цикл, также подвергаются сложным воздействиям. Внутреннее, в ряде случаев пульсирующее, давление газовой среды и термическое расширение футеровки создают основной уровень напряженного состояния. Кроме того, серьезное влияние на него оказывают усилия, связанные с термической деформацией всей системы газо- воздухопроводов. Как правило, такие системы в районе центрального узла печи весьма жесткие и не способны компенсировать возникающие перемещения, в связи с чем в трубопроводах возникают значительные усилия сжатия, способствующие разрушению опорных узлов. Местные разрушения футеровки, вызванные ее чрезмерным обжатием, приводят к продувам газа и перегревам оболочки трубопроводов.

Нарушение прочности характерно для узлов примыкания газопроводов к кожуху пылеуловителя и его опорных узлов, особенно пылеуловителей с торообразным переходом от цилиндрической части к конической. Известны случаи разрушения пылеуловителя от возникновения вакуума, вызванного пропаркой, что является нарушением технологического режима его эксплуатации.

Описанные факторы и нештатные ситуации способствуют росту уровня напряженно-деформированного состояния кожухов доменной печи, воздухонагревателей и кожухов других агрегатов.

В то же время, долговечность и увеличение межремонтного периода этих сооружений прямо связаны со снижением в них среднего уровня напряжений.

ГЛАВА 3 СОБСТВЕННО ДОМЕННАЯ ПЕЧЬ

§ 3.1. Эволюция конструктивных решений доменных печей

Первые доменные печи со сплошным листовым кожухом появились в начале XIX века.

В отличие от печи, состоящей из кирпичной кладки, стянутой металлическими обручами, сплошной кожух принципиально изменил технологический процесс, что привело к повышению давления газовой среды и увеличению производительности печи.

Устройство сплошного кожуха повысило надежность работы печи в целом, обеспечило полную герметичность внутреннего пространства, равнопрочность соединений основного металла. Листы кожуха соединялись с помощью заклепок, что повышало деформативность швов и способствовало восприятию действующих усилий. Однако в процессе интенсификации технологических процессов увеличивалась возможность сдвига и среза заклепок в заклепочных соединениях, стыки не обеспечивали восприятие возросших усилий и воздействий, возникающих в современных доменных печах.

Наличие головок заклепок с внутренней стороны кожуха препятствовало скольжению кладки по кожуху и увеличивало коэффициент трения. Большое количество отверстий под заклепки значительно ослабляло кожух, приводя к концентрации напряжений.

В 1948 г. в СССР была введена в эксплуатацию первая цельносварная доменная печь, что явилось результатом исследований, проведенных институтами «Проектстальконструкция» и «Гипромет» (г. Москва, Россия) и Институтом электросварки им. Е.О. Патона (г. Киев, Украина).

Применение сварки позволило ликвидировать большое количество отверстий под заклепки и, как результат, убрать очаги концентрации напряжений, а отсутствие самих заклепок – получить гладкую внутреннюю поверхность кожуха и снизить трение кладки о кожух, возникающее при ее термических перемещениях. Меньшая податливость сварных соединений компенсировалась увеличением деформативности компенсирующих слоев.

В результате применения сварки в домностроении значительно повысилась технологичность изготовления кожуха печи и сократились сроки строительства, появился новый импульс в развитии конструктивных форм и технологических процессов. В сочетании с этим форсированное развитие черной металлургии и постоянная интенсификация режимов работы печей способствовали совершенствованию и созданию новых конструктивных форм кожухов.

Основными факторами формообразования конструкций кожуха доменной печи, профиль которой выработан на основе многолетней практики проектирования и эксплуатации, являются требования технологического процесса. Важнейшие из них – герметичность, стойкость к высоким температурам, прочность, малая деформативность. Применение для кожуха печи оболочек различной конфигурации привело к появлению краевых эффектов в зонах их сопряжения, что в значительной степени усложнило общее напряженно-деформированное состояние кожуха.

Все разработанные и построенные доменные печи как строительные сооружения отличались по конструктивным признакам в зависимости от функций кожуха. К основным направлениям совершенствования конструкций доменной печи следует отнести стремление максимально разгрузить кожух от внешних нагрузок и четко распределить их между конструкциями комплекса.

Так, передача нагрузок от колошниковоу устройства непосредственно на оболочку кожуха шахты печи создавала опасность выхода печи из строя при потере кожухом способности воспринимать эксплуатационные нагрузки. Принятое в процессе развития его опирание на специально созданную опорную систему из колонн печи сняло эту проблему.

В дальнейшем было ликвидировано опирание наклонного моста на копер колошниковоу устройства и, тем самым, были исключены динамические воздействия моста на копер. С этой же целью были сняты с колошниковоу копра головные шквы наклонного моста и размещены на специальном подшивном устройстве, что уменьшило горизонтальные нагрузки на копер.

Эволюция конструктивных форм доменных печей [57, 59], кроме основной задачи – повышения прочности и надежности, была направлена также на постепенное исключение передачи на кожух нагрузок от оборудования и создание независимых опорных конструкций. Одной из главных задач такого подхода было улучшение условий работы кожуха печи и уменьшение или исключение вероятности перегрева загрузочного устройства, связанного с возможным перегревом кожуха. Кроме того, при капитальных ремонтах печи с заменой части или всего кожуха шахты было достаточно сложно выполнять демонтаж всех конструкций, опирающихся на кожух, что требовало создания специальных опорных систем и значительно удлиняло сроки ремонта.

Были созданы различные виды опорных конструкций в виде колонн горна и шахты, компоновка которых также претерпела за годы развития домностроения многочисленные изменения. Достаточно отметить, что одна из первых схем доменной печи, так называемая американская, включала в опорную систему только колонны горна, а все конструкции, оборудование и площадки размещались на кожухе печи.

В последующих схемах появились колонны шахты, которые на первом этапе развития включались в работу только после перегрева и осадок кожуха шахты печи или при ремонтах. Затем было предложено принципиально новое решение – нагрузка от купола печи с опирающимися на него газопроводами грязного газа и колошниковым устройством передавалась непосредственно на колонны шахты, которые являлись продолжением колонн горна.

Разгрузка кожуха от всех, расположенных выше, устройств теоретически представляла собой наиболее последовательное решение, так как в этом случае решалась основная задача – загрузочное устройство полностью предохранялось от перегревов и максимально разгружался кожух шахты печи.

Дальнейшее развитие этого направления привело к использованию колонн шахты для постоянного опирания на них колошниковоу устройства и всего вышележащего оборудования. Затем для улучшения условий обслуживания шахты печи были исключены связи между колоннами шахты, а их общая устойчивость обеспечивалась созданием рамного каркаса с заземлением в колоннах шахты несущих балок кольцевых площадок.

В 1954 – 1957 гг. институтами «Гипромет» и «Проектсталь-конструкция» (г. Москва, Россия) были разработаны типовые проекты доменных печей объемом 1033 – 1719 м³, где доменная печь с колошниковым устройством размещалась на колоннах горна, которые вместе с колоннами шахты представляли собой общую опорную систему доменной печи. Колонны колошниковой копра непосредственно опирались на колонны шахты, по верху которых устанавливалась опорная пространственная конструкция, на которой размещалась колошниковая площадка.

Купол печи не был отделен от кожуха шахты, что несколько ухудшало условия его работы, однако не приводило к значительным негативным результатам. Мораторное кольцо разделяло верх печи с толстостенной кладкой и ее низ и позволяло улучшить передачу веса конструкций футеровки шахты и частично веса шихты в первый период работы печи на фундамент через колонны, а частью через другие конструкции горна. Кроме того, кольцо воспринимало распор от составляющей, связанной с наклонным положением колонн горна.

Поскольку условия эксплуатации, температурный режим и связанные с этим вертикальные перемещения конструкций печи, примыкающих к мораторному кольцу, разные, то мораторное кольцо не прикреплялось жестко болтами к колоннам горна. При различной величине вертикальных перемещений кожуха нижней части печи и колонн горна в мораторном кольце возникали изгибные усилия, что могло привести к возможному отрыву болтов. Поэтому болты не затягивались, они имели только установочное значение и обеспечивали работу лишь на срез от горизонтальных нагрузок.

Кольцевая балка швеллерного сечения, состоящая из мораторного кольца, горизонтального кольцевого ребра жесткости и участка нижнего пояса шахты кожуха печи, позволяла опирать на нее колонны шахты в любом месте, независимо от количества и взаимного расположения колонн горна.

Увеличение количества фурменных приборов, чугунных и шлаковых леток, вызванное форсированием работы доменных печей и ростом их объемов, ограничило возможность установки колонн горна, которые стесняли рабочее пространство вокруг печи

и затрудняли ее обслуживание, а также ухудшило работу средств механизации трудоемких работ у горна печи.

С учетом фактической работы колонн горна от усилий термического расширения футеровки и внутреннего давления газовой среды только на растяжение, передающегося на колонны горна через болты крепления оголовков колонн к мораторному кольцу, количество колонн горна было уменьшено до четырех. Они были совмещены с колоннами шахты и предназначались только для опирания на них колошниковой конструкции и обслуживающих площадок.

Здесь удалось осуществить непосредственное опирание колонн шахты на колонны горна, чему ранее препятствовало несовпадение в плане расположения колонн колошниковой копра с колоннами шахты, зависящими от размещения колонн колошниковой копра. Установленная на колоннах шахты в уровне колошниковой площадки кольцевая балка замкнутого сечения служила опорной конструкцией для колонн копра. Так как эта балка воспринимала как изгибные, так и крутящие усилия стало возможным размещение колонн копра независимо от расположения колонн шахты.

Достаточно широкое распространение получила доменная печь с опорной системой из четырех колонн, удаленных от печи и воспринимающих нагрузку от кожуха шахты и колошниковой конструкции, что освободило пространство вокруг шахты печи и облегчило доступ к ней.

Основным недостатком такой схемы является сложность создания колонн необходимой прочности с учетом расположения и габаритов смежных конструкций. Увеличение размеров колонн и опорных балок затрудняет доступ к кожуху по всей высоте и не всегда может быть реализовано по условию компоновки конструкций и их стесненности.

Одновременно, в связи с исключением опирания печи на колонны горна возникла проблема обеспечения прочности мораторного кольца, ширина которого в этом случае связана с возможностью восприятия усилий от внутреннего давления газовой среды. По этому критерию для обеспечения прочности ширина мораторного кольца ограничена размерами не более 400 – 450 мм.

Учитывая этот фактор, была разработана безмораторная самонесущая доменная печь, состоящая из отдельных, сопряженных между собой, оболочек, хорошо воспринимающих внутреннее давление. Масса загрузочного устройства была передана на кожух печи, а колошниковый копер, ремонтные и обслуживающие площадки опирались на отдельные колонны.

Результатом дальнейшего развития этой схемы стала доменная печь объемом 5000 и 5580 м³, в которой полностью отсутствуют колонны, а загрузочное устройство и колошниковая площадка опираются на кожух печи. Монтажная балка, ремонтные и обслуживающие загрузочное устройство площадки опираются на вертикальные газопроводы грязного газа. Отсутствие колонн в значительной степени затрудняет проведение ремонтов, требует создания специальных временных опорных систем и отдельных конструкций для опирания кольцевого воздухопровода горячего дутья, кольцевых и радиальных площадок печи и др.

В последнее время нашли применение самонесущие доменные печи, вокруг которых установлены четыре колонны от фундамента печи до опорной кольцевой балки колошниковой площадки. Загрузочное устройство опирается на кожух печи через опорный фланец, колошниковая площадка, колошниковый копер и монтажная балка — на колонны, а ремонтные и обслуживающие загрузочное устройство площадки — на колошниковый копер.

Бесконусные загрузочные устройства фирмы Paul Wurth и другие, получившие в последние годы широкое применение, имеют свою опорную систему, расположенную на куполе печи и не требуют устройства колошниковой копра. В этом случае колошниковая площадка опирается на колонны печи, а монтажная балка, ремонтные и обслуживающие загрузочное устройство площадки — на вертикальные газопроводы грязного газа.

К наиболее перспективным решениям конструктивных форм доменной печи, значительно улучшающим общее напряженно-деформированное состояние кожуха доменной печи, можно отнести следующие [52]:

1. Применение самонесущего кожуха без мораторного кольца, снижающего его несущую способность, что позволяет увеличивать объем печи и повышать внутреннее давление газа под колошником.

2. Переход на цилиндрическую форму кожуха горна (вместо традиционной конической формы), что устраняет распорное воздействие вертикального температурного расширения холодильников и огнеупорной кладки, а также зону концентрации локальных напряжений в месте соединения конического горна и цилиндрического кожуха лещади.

3. Выполнение отверстий для чугунных леток не прямоугольной, а круглой или овальной формы, что снижает опасность трещинообразования в районе отверстий.

4. Установку специальных ребер жесткости в местах крепления к кожуху захватов пушек чугунных леток с целью уменьшения локальных напряжений в кожухе печи за счет распределения нагрузки по поверхности оболочки.

5. Выполнение вырезов в кожухе шахты, предназначенных для крепления горизонтальных холодильников, в шахматном порядке, с полукруглыми торцами — для плитовых сменяемых холодильников и с закруглениями в углах отверстий — для кронштейновых холодильников, что позволяет уменьшить концентрацию напряжений в зоне отверстий.

6. Снижение уровня напряжений в кожухе купола, ослабленном большим количеством отверстий, одним из следующих способов или их комбинацией:

- устройством на куполе доменной печи системы охлаждения;
- увеличением толщины кожуха купола для доменных печей большого объема до 50 – 60 мм;
- усилением мест примыкания к кожуху купола вертикальных газопроводов грязного газа, передающих на него значительные усилия, листовыми накладками толщиной до 30 мм и путем установки в местах их примыкания вертикальных листовых ребер, воспринимающих как вертикальные усилия, так и изгибающие моменты в защемлении газопроводов в оболочке купола;
- изменением геометрии купола путем устройства дополнительного перелома в образующей конуса, что позволяет «сгладить» явление краевого эффекта;
- устройством системы связей по низу газопроводов грязного газа либо использованием балок площадок колошниковой конструкции, опирающихся в случае отсутствия копра на газопроводы,

одновременно в качестве затяжек с целью уменьшения моментов и усилий от распора на купол печи.

§ 3.2. Конструкции, входящие в состав собственно доменной печи

В состав собственно доменной печи входят следующие основные конструкции:

- кожух доменной печи, который выполняет такие технологические и строительные функции: обеспечивает герметичность печи, воспринимает нагрузки и усилия от внутреннего давления газов и футеровки, одновременно создавая в ней сжимающие усилия, препятствующие преждевременному ее растрескиванию. Он также служит опорой для холодильников и другого оборудования, является основной несущей конструкцией, обеспечивающей общую пространственную устойчивость всей системы;
- опорная система доменной печи в составе колонн, радиальных и кольцевых технологических и обслуживающих площадок;
- колошниковый копер, служащий для опирания оборудования загрузочного устройства, монтажной балки, обслуживающих площадок и т.п.;
- колошниковая площадка, опирающаяся на опорную кольцевую или полигональную балку и предназначенная для размещения большого количества технологического оборудования и помещений, системы испарительного охлаждения и т.п.;
- вертикальные газопроводы грязного газа, обеспечивающие отвод доменного газа из печи, а в доменных печах, где отсутствует колошниковый копер, они служат и для опирания монтажной балки, обслуживающих площадок, грузоподъемных механизмов и т.п.;
- кольцевой воздухопровод горячего дутья, который предназначен для подачи горячего воздуха в печь через встроенные в него фурменные приборы;
- площадки для размещения оборудования и обслуживания печи, расположенные на различных уровнях, и шахты лестниц.

§ 3.3. Технические решения кожуха доменной печи

Кожух доменной печи выполняет целый ряд технологических, строительных и конструктивных функций и представляет собой часть единой комплексной системы «кожух – компенсирующий слой – холодильники – футеровка».

Основная технологическая функция кожуха – обеспечение герметичности доменной печи при воздействии всех внутренних нагрузок.

Основная строительная функция кожуха – восприятие внутреннего давления футеровки, газовой среды, давления шихтовых материалов и жидких продуктов плавки, создание условий для ведения процесса плавки.

Основная конструктивная функция кожуха – опирание холодильных плит, оборудования и механизмов, а также обеспечение общей пространственной устойчивости всей системы.

Выполнение технологической функции кожуха в первую очередь зависит от ведения технологического процесса, эксплуатационных параметров работы печи, качества шихтовых материалов и стабильности работы оборудования. Создание надежной конструктивной формы кожуха печи осложняется многими факторами, связанными прежде всего с нестабильностью и неформализованностью нагрузок и воздействий на него, основными из которых являются следующие:

- отсутствие постоянных величин силовых воздействий, связанных с параметрами работы печи;
- изменение конструктивной формы системы «футеровка – холодильники» в ходе кампании печи;
- изменение характера силовых воздействий и температурного режима по высоте печи и по ее периметру;
- различный характер напряженно-деформированного состояния в пределах отдельных зон кожуха, что связано, в основном, с типом и работой системы охлаждения, наличием ослабляющих кожух отверстий различной формы и размеров и др.

Проведенные натурные экспериментальные исследования показали весьма сложное напряженно-деформированное состояние кожуха, в ряде случаев неувязываемое с параметрами работы печи.

В частности, наряду с естественным характерным для тонкостенных оболочек плоским двухосным растягивающим напряженным состоянием кожуха, были обнаружены участки с двухсторонним сжатием, что можно объяснить нестабильностью интенсивности воздействия футеровки на кожух в отдельных его зонах. Кроме того, на ряде печей при средних измеренных напряжениях в кожухе лещади и горна, обычно составляющих 200 – 250 МПа, в районе чугунной летки были отмечены местные деформации, соответствующие условным растягивающим напряжениям на уровне 450 МПа [77].

Наличие общего довольно сложного напряженного состояния подтверждает действие нагрузок разных по величине мест их возникновения. Так, если внутреннее давление газовой среды действует на кожух равномерно и напряжения в нем связаны с известной зависимостью, то все остальные виды нагрузок и воздействий неформализованы и в каждом конкретном случае зависят от конструктивных решений, параметров и технологии ведения процесса.

Прочность и герметичность кожуха нарушается примыкающими конструкциями системы охлаждения – отверстиями для подводящих и отводящих воду или пар трубок и болтов крепления холодильных плит.

Поэтому, наряду с равномерным воздействием на кожух внутреннего давления газовой среды и температурного расширения футеровки, приходится учитывать дополнительные напряжения, возникающие в зоне ослабления отверстиями, а также в местах устройства кладки впритык к кожуху, в местах переломов профиля. Существует также угроза местных перегревов, связанных с разрушением футеровки или выходом из строя холодильников, с организацией при этом наружного полива, возникновением сосредоточенных усилий в местах соприкосновения плитовых холодильников за счет их взаимного поворота и пр.

Местный перегрев кожуха является одним из наиболее опасных факторов, так как при этом происходит деформирование (расширение) металла, а поскольку он окружен холодной недеформируемой зоной, в нем возникают напряжения, превосходящие предел текучести.

В кожухе печи могут появиться трещины, начинающиеся обычно в местах концентрации напряжений [7, 11]. Заварка их не всегда дает положительный результат, трещины могут появляться вновь, вплоть до устранения причин, вызвавших трещинообразование. В случае невозможности их устранения требуется замена целого участка кожуха, что требует остановки печи.

Создание надежного, прочного кожуха в первую очередь связано с работоспособностью системы «кожух – холодильники – компенсирующий слой – футеровка», системы охлаждения, необходимостью применения огнеупорных материалов кладки, физико-механические свойства которых отвечают условиям эксплуатации, материалов компенсирующих слоев с неизменяющимися во времени свойствами и проведением ряда конструктивных мероприятий.

Увеличение усилий вызывает прогрессирующий разгар кладки и требует увеличения толщины кожуха, что, в свою очередь, снижает качество металла кожуха и его трещиностойкость. Выбор толщины компенсационного слоя и материала с необходимыми упругими свойствами позволяет регулировать эти усилия.

Особое значение для обеспечения прочности кожуха имеет качество и физико-механические характеристики применяемого металла. Для кожуха печи следует использовать металл повышенной вязкости и пластичности, достаточно стойкий к возникновению трещин и их распространению.

Что касается толщины листов кожуха, то с одной стороны увеличение толщины металла при сохранении его свойств приводит к повышению общей прочности, но в то же время для ряда применяемых марок сталей – к ухудшению их механических характеристик и возникновению дополнительных объемных напряжений и усадочных напряжений при сварке.

Поставка металлопроката большой толщины (более 60 мм) с гарантированными механическими характеристиками вызывает значительные затруднения, а применение его проблематично при вальцовке листов в процессе изготовления и при односторонней сварке листов кожуха во время ремонтов.

Так, известны случаи повреждения кромок листов с образованием трещин, связанных с нарушением технологии вальцовки [14]. При вальцовке листов толщиной 60 мм из стали

марки 09Г2С кожуха одной из доменных печей объемом 2700 м³ под воздействием направляющего ролика вальцовочной машины возникли зоны интенсивной пластической деформации, в которых появились трещины сдвигового типа протяженностью до 480 мм. При этом на прикромочной поверхности карт (на поверхности листового проката) все случаи появления трещин отмечаются в пределах полосы шириной 30 мм, примыкающей к кромке торца, а более 60 % трещин расположено в пределах полосы шириной 5 мм.

Это явление было обнаружено при монтаже кожуха во время контроля физическими методами качества сварных стыковых швов, после чего кожух был полностью заменен.

За рубежом на некоторых предприятиях имеются доменные печи, где для кожуха применены листы толщиной до 120 мм. Однако существует мнение, что при увеличении толщины листов снижается эффективность охлаждения, а при толщине более 60 мм применяемый при необходимости наружный полив не решает проблемы охлаждения. Кроме того, возрастает уровень термических напряжений, вызванных перепадом температур по толщине металла, а также остаточных напряжений от сварки, что увеличивает вероятность появления трещин.

Следует также заметить, что увеличение толщины кожуха приводит к росту его жесткости, снижению деформативности узлов сопряжения с трубопроводами, постепенному их расстройству и трещинообразованию.

Таким образом, с целью уменьшения толщины листов применение сталей повышенной и высокой прочности с необходимыми характеристиками пластичности и вязкости является предпочтительным и эффективным для повышения прочности и надежности кожуха печи.

Общими требованиями для конструктивных решений всех зон кожуха печи являются:

- его полная герметичность, доступность для наружных осмотров и ремонтов, сведение к минимуму возникновения участков с местными напряжениями;
- достаточная прочность при весьма высоких величинах давления газовой среды, термического распирающего воздействия футеровки, гидростатического давления столба жидкого чугуна и

шихтовых материалов (суммарная величина этих воздействий достигает 1,5 – 2,0 МПа).

Кожух доменной печи, обеспечивающий общую устойчивость сооружений центрального узла, ослаблен многими технологическими факторами – большим количеством отверстий под выводные трубки и болты крепления холодильных плит, отверстиями для контрольно-измерительной аппаратуры, фурменных приборов, чугунных и шлаковых леток, люков и др.

Размеры отверстий под выводные трубки и болты крепления холодильных плит сравнительно невелики и принимаются равными в 1,6 раза больше диаметров болтов и трубок соответственно с допускаемым отклонением +2 мм; –0 мм. Однако большое их количество существенно влияет на компоновку листов и прочность кожуха, особенно при применении испарительного охлаждения.

С целью уменьшения количества вырезов при благоприятном расположении трубок их в ряде случаев размещают группами по 2 – 3 трубки в общем вырезе и закрывают одной накладкой. Все вырезы делают с закругленными краями радиусом 50 – 100 мм.

Для компенсации ослабления кожуха и обеспечения его газоплотности в местах отверстий устанавливаются усилительные накладки. Накладка, как правило, повторяет форму выреза и имеет толщину 12 – 20 мм. На рис. 3.1 наведены примеры геометрической формы вырезов и накладок.

Снижение уровня напряженно-деформированного состояния путем установки накладок в зоне отверстий и проемов является качественным интегральным подходом и не позволяет достаточно точно учитывать действительные величины местных напряжений в наиболее опасных зонах.

В кожухе печи к таким зонам относятся фурменная зона, охлаждаемая часть шахты и купол печи.

До настоящего времени нет обоснованной методики расчета кожуха фурменной зоны с учетом ослабления ее отверстиями для фурменных приборов. Что касается количества и диаметра отверстий в кожухе под фурменные приборы, то расчет допускаемого ослабления кожуха также не разработан. Однако опыт проектирования кожухов позволяет считать возможным такое ослабление не превышающим 65 %.

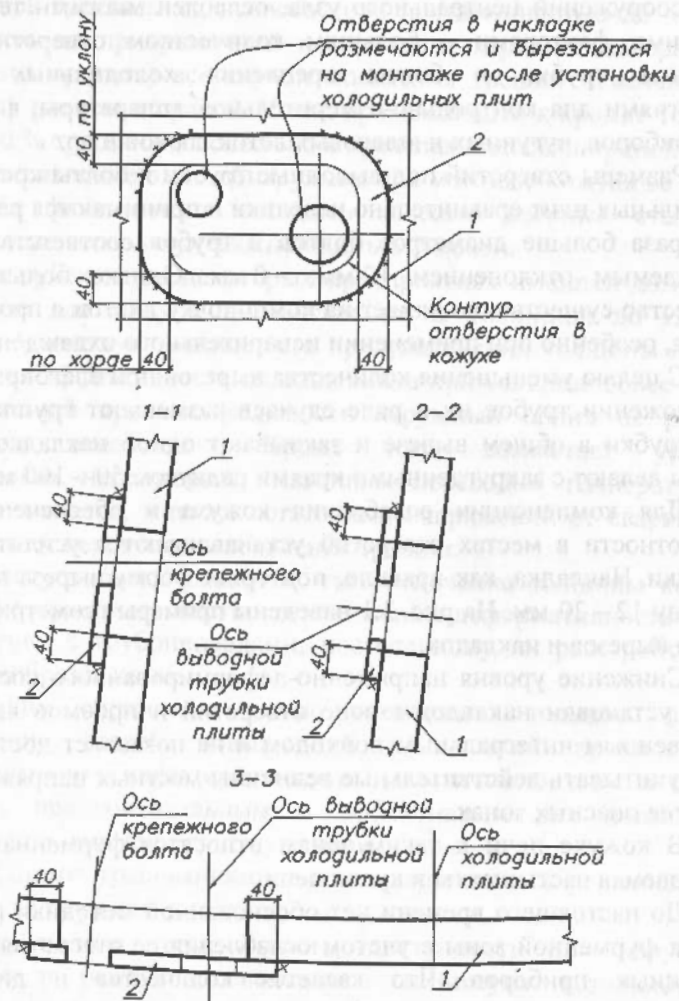


Рис. 3.1. Накладки на отверстия в кожухе печи:
1 – кожух печи; 2 – накладка

В связи с увеличением габаритов и количества фурменных приборов для соблюдения этого требования в ряде случаев возникает необходимость учета в расчетной площади кожуха, в качестве усиления отверстий, амбразур фурменных приборов, выполненных из стали марки, равнопрочной марке стали кожуха, обеспечивая равнопрочное соединение их с кожухом.

Достаточно острой является проблема определения местных напряжений в куполе печи, который представляет собой коническую оболочку, ослабленную вырезами с приложенными по контуру воздействиями в виде сил и моментов, в том числе от температурного расширения системы «кожух печи – пылеуловитель». Кроме того оболочка нагружена усилиями от краевого эффекта в районе перехода конической оболочки купола к цилиндрической оболочке кожуха колошника.

При использовании загрузочного устройства конструкции фирмы Paul Wurth, широко применяемого в последние годы, проблема усугубляется необходимостью устройства в куполе большого прямоугольного проема для смены его лотка.

Согласно известным рекомендациям [73] толщина купола в зоне отверстий должна в 1,5 – 2 раза превышать толщину оболочки вне этой зоны, что обычно достигается постановкой специальных накладок. Это приводит к увеличению местных напряжений в зонах краевого эффекта, которые в совокупности с имеющимися здесь весьма значительными усадочными напряжениями от сварки снижают общую надежность конструкции, что вызывает появление трещин в этом районе. Естественно, что достаточно точное определение местных напряжений привело бы к меньшим толщинам оболочки, снижению уровня усадочных напряжений и уменьшению вероятности появления трещин. Поэтому, создание методики уточненного расчета кожуха доменной печи, ослабленного отверстиями, позволяющей более точно учитывать концентрацию напряжений вокруг отверстий, является весьма актуальной задачей.

В соответствии с требованиями нормативных документов при общей сборке кожуха на заводе-изготовителе производится вырезка с учетом нормируемых допусков всех отверстий для крепежных болтов и выводных трубок холодильных плит, амбразур для горизонтальных плитовых холодильников, крепеж-

ных болтов футеровочных плит, а также для леток и фуэрменных приборов. Отверстия под выводные трубки холодильных плит выполняются параллельно холодильной плите, а под крепежные болты – по радиусу кожуха печи.

Для обеспечения геометрических размеров и проектного расположения отверстий вырезка их должна выполняться после вальцовки листов кожуха.

Применение огневой резки для образования отверстий не допускается. Их выполнение на заводе и при монтаже возможно только механическим способом или с помощью плазменно-воздушной резки плазматроном. Внутренняя поверхность отверстий после плазменно-воздушной резки не требует специальной дополнительной обработки. Однако, в узлах приварки конструктивных элементов непосредственно к кромкам отверстий, в которых проектом не предусмотрено выполнение разделки (снятие фаски), следует на выходе плазменной струи снять грат и механическим путем выполнить фаску 1×1 мм по контуру отверстия для удаления азотированного слоя.

При проектировании кожух разбивается на отдельные листы, размеры которых зависят от количества холодильников, расположения отверстий и проемов, а также от необходимости расположения вертикальных стыков монтажных элементов вразбежку и обеспечения их смещения друг относительно друга на половину длины, но не менее 300 мм. Крестообразные пересечения монтажных горизонтальных и вертикальных сварных швов не допускаются.

При разбивке листов также учитывается возможность их поставки, так как прокат листов большой толщины производится на металлургическом предприятии по отдельному заказу и с учетом возможностей листогибочных вальцов завода-изготовителя кожуха. При вальцовке листов толщиной 50–60 мм и более и определении усилий на гибочные валы необходимо принять меры по исключению пережимов кромок вальцуемых листов и образованию в них трещин.

На заводе-изготовителе листы укрупняются в скорлупы, габаритные для транспортных перевозок, с учетом возможности грузоподъемных средств для их монтажа. Особое внимание

уделяется расположению отверстий и приближению их к кромке листов. При этом учитываются следующие критерии:

- с целью предотвращения деформирования кромки при сварке стыка минимальное расстояние от края отправочного элемента до образуемого на заводе-изготовителе отверстия, как правило, не должно быть менее 200 мм;

- для исключения наложения смежных зон концентрации напряжений и обеспечения прочности расстояние от отверстия в кожухе до края листа, т.е. до сварного шва, и между краями отверстий должно быть не менее $5t$, где t – толщина листа;

- отверстия, расположенные в зоне стыкового сварного шва листов, где основной металл подвергается значительному температурному воздействию и изменяет свою структуру, должны выполняться при монтаже после выполнения стыкового сварного шва.

В основном металле, нагреваемом до температуры 500°C , значительных структурных изменений не происходит. Однако следует иметь в виду, что у стали в интервале температур $200 - 300^\circ\text{C}$ возникает явление синеломкости, т.е. повышенной хрупкости, что может стать причиной развития трещин при сварке.

В сварном стыковом соединении различают три зоны [36]:

- металл шва (МШ);
- зону термического влияния (ЗТВ);
- основной металл (ОМ).

Под зоной термического влияния (ЗТВ) понимают участок основного металла, примыкающий к сварному шву и претерпевший в процессе нагрева и остывания различные структурные и фазовые превращения. В ЗТВ различают несколько участков.

№1. Участок сплавления с основным металлом. Длина участка – несколько зерен.

№2. Участок перегрева ($1100 - 1300^\circ\text{C}$), где происходит рост зерен, снижается пластичность и повышается твердость.

№3. Участок полной перекристаллизации, где происходит нагрев выше точки A_{c3} (910°C), наблюдается измельчение зерен. Пластичность и ударная вязкость понижена по сравнению с основным металлом за счет старения, связанного с температурой и сварочными напряжениями.

№4. Участок неполной перекристаллизации, где происходит нагрев от A_{c1} (727°C) до точки A_{c3} .

Длины участков ЗТВ приведены в таблице 3.1

Несмотря на неоднородность свойств в диапазоне от металла шва к основному металлу, заметного влияния этих факторов на усталостную прочность сварного соединения, как при значительном количестве циклов, так и в малоцикловой области (менее 50 000 циклов) не выявлено.

Таблица 3.1

Способ сварки	Длина участка ЗТВ, мм		
	№2	№3	№4
Ручная дуговая	0,1 – 0,3	0,3 – 1,0	3 – 8
Под флюсом	0,1 – 0,5	0,3 – 2,0	3 – 15

Учитывая отмеченные изменения качества стали в районе сварных швов и в ЗТВ, ширина которой зависит от скорости сварки и силы тока и при реальном проектировании принимается 5 – 6 мм, размещение отверстий здесь, как правило, не допускается. В исключительных случаях при невозможности смещения отверстия с этого участка отверстия, расположенные у края листа, должны выполняться при сборке кожуха после укрупнения листов в скорлупы и сварки стыков при соблюдении соответствующей технологии.

При образовании отверстий под горизонтальные холодильники, расположенные вблизи краев отправочного элемента кожуха, сохраняется участок кожуха внутри отверстия – перемычка, который вырезается после сборки кожуха и выполнения стыкового шва (рис. 3.2).

Отверстия под фурменные приборы, как правило, выполняются на заводе-изготовителе кожуха.

Большое влияние на разбивку листов кожуха и на его прочность оказывают принятые типы сварных соединений и технология производства сварочных работ. В современных доменных кожухах для вертикальных или близких к вертикальным (до 30° от вертикали) монтажных стыков листов кожуха на достаточно протяженных участках, как правило, применяется автоматическая электрошлаковая сварка, при которой минимизируется перегрев металла в околошовной зоне и значительно уменьшаются остаточные напряжения [85].

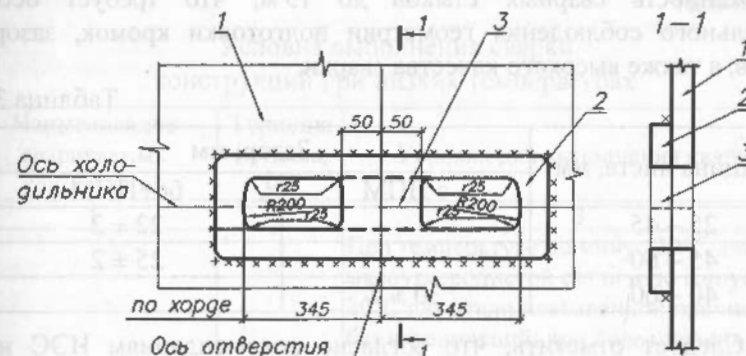


Рис. 3.2. Отверстие под горизонтальную холодильную плиту:

1 – кожух печи; 2 – накладка;

3 – участок кожуха, вырезаемый при монтаже

Исследования [3] показали, что при этом виде сварки область локализации растягивающих остаточных напряжений максимальной величины достигает зоны размером не менее трех толщин свариваемых листов.

Длина совмещенного под электрошлаковую сварку стыка ограничивается величиной 8 – 10 м. В зоне движения сварочного механизма (ползуна) по обе стороны от стыка не должно быть заранее образованных отверстий. Ширина такой полосы, свободной от имеющихся отверстий, зависит от типа применяемого сварочного механизма. Как правило, она составляет по 100 мм с обеих сторон стыка.

При разбивке листов под электрошлаковую сварку также необходима информация о технологии сварки, от которой зависит величина зазоров между стыкуемыми листами. В таблице 3.2 приведены данные относительно рекомендуемой величины зазоров в зависимости от толщины листов и применения дополнительной присадки (ППМ).

При применении другого типа сварного соединения длина совмещенного вертикального стыка, как правило, ограничена 4 – 6 м.

Особое значение это имеет при сборке кожуха из крупноблочных охлаждаемых панелей, когда необходимо увеличить

протяженность сварных стыков до 15 м, что требует особо тщательного соблюдения геометрии подготовки кромок, зазоров листов, а также высокого качества сварки.

Таблица 3.2

Толщина листа, мм	Зазор, мм	
	с ППМ	без ППМ
25 – 45		22 ± 2
45 – 60		25 ± 2
40 – 60	30 ± 2	

Следует отметить, что согласно рекомендациям ИЭС им. Е.О. Патона, которые более жесткие, чем указания СНиП III-18-75, сварные стыки протяженностью больше 10 м должны подвергаться двойному 100 % контролю ультразвуковой дефектоскопией разными операторами. Участки швов с признаками дефектов, обнаруженные ультразвуковой дефектоскопией, должны пройти контроль просвечиванием проникающими излучениями в количестве 3% от общей протяженности стыков.

Сваривать стыки протяженностью более 10 м предпочтительнее дуговой сваркой с принудительным формированием шва, обеспечивающей меньшее тепловложение в свариваемый металл и, следовательно, более высокие механические свойства, в том числе и ударную вязкость соединений.

Для горизонтальных и вертикальных стыков листов кожуха на коротких участках, а также на куполе печи применяется автоматическая сварка под слоем флюса или полуавтоматическая (в ряде случаев ручная) сварка.

В зимний период сварка должна выполняться по специальной технологии, учитывающей температуру окружающего воздуха во время производства работ. Некоторые ее основные положения приведены в таблице 3.3.

Одним из критериев надежности сварных швов являются условия их остывания, так как скорость остывания в значительной степени влияет на структуру металла ЗТВ, ресурс усталостной прочности и на долговечность конструкций [3]. Наибольшие деформации при остывании происходят на участке перегрева и полной и неполной перекристаллизации, где были отмечены наиболее высокие температуры [4, 5].

Таблица 3.3

Условия выполнения сварки
конструкций при низких температурах

Наименование свариваемых конструкций	Толщина металла, мм	Условия для выполнения сварки
1	2	3
Кожухи доменных печей, воздухонагревателей, пылеуловителей и других агрегатов	До 16	При температуре до минус 30°C для малоуглеродистой стали и до минус 20°C для стали повышенной прочности – без ограничений; при более низких температурах – с предварительным подогревом металла до 120 – 160°C на ширину 100 – 150 мм по обе стороны от шва. Допускается сварка стали повышенной прочности без предварительного подогрева до минус 30°C при соблюдении примечаний Б, В, Е, Ж.
	Свыше 16 до 30	При температуре до минус 20°C для малоуглеродистой стали и до 0°C для стали повышенной прочности – без ограничений; при более низких температурах – с предварительным подогревом металла. Допускается сварка стали повышенной прочности без предварительного подогрева до минус 20°C при соблюдении примечаний Б, В, Е, Ж.
	Свыше 30 до 40	При температуре до минус 10°C для малоуглеродистой стали и до плюс 5°C для стали повышенной прочности – без ограничений; при более низких температурах – с предварительным подогревом металла до 120 – 220°C. Допускается сварка для стали повышенной прочности без предварительного подогрева до минус 10°C при соблюдении примечаний Б, В, Е, Ж.

Окончание таблицы 3.3

1	2	3
	Свыше 40	При температуре до 0°C (для малоуглеродистой стали) и до плюс 10°C (для стали повышенной прочности) – без ограничений; при более низких температурах – с предварительным подогревом металла до 120–220°C. Допускается сварка для стали повышенной прочности без предварительного подогрева до 0°C при соблюдении примечаний Б, В, Е, Ж.
Трубопроводы из малоуглеродистой стали и стали повышенной прочности, работающие при температуре до минус 40°C	До 30	При температуре до минус 30°C – без предварительного подогрева при соблюдении примечаний Г, А (для сварки корневого слоя) и Б, В, Е, Ж.
Решетчатые конструкции	До 30	При температуре до минус 30°C – без ограничений
	Более 30	При температуре ниже минус 10°C – предварительный подогрев металла. Допускается сварка при температуре до минус 20°C без предварительного подогрева при соблюдении примечания А.

Примечания.

А. Сварка малоуглеродистой стали электродами не ниже Э42А–УОНИ 13/45-2 и стали повышенной прочности – Э50А – УОНИ 13/55-2.

Б. Сварка электродами с основным покрытием марок УОНИ-13, УП-2, СМ-11 и др.

В. Автоматическая сварка под флюсом за несколько проходов с применением проволоки марки СВ-08Г для малоуглеродистой стали и СВ-08Г2 – для стали повышенной прочности.

Г. Полуавтоматическая сварка в среде углекислого газа.

Д. Автоматическая сварка под флюсами АН-22 электродной проволокой.

Е. Повышение режимов сварки (погонной энергии) на 4–5% на каждые 10°C понижения температуры окружающего воздуха. Погонная энергия сварки при положительной температуре принимается за 100%.

Ж. Увеличение выборочного контроля сварных швов физическими методами с доведением его объема в особо ответственных случаях до 100%.

При многопроходной сварке пластические деформации достигают значений 5–6%. Ширина зоны пластических деформаций сопоставима с шириной ЗТВ, материал в которой находится в наклепанном состоянии.

Во время проведения сварочных работ в условиях низких климатических температур следует исключить прямое воздействие на швы ветрового потока как в процессе сварки, так и в процессе остывания шва, осуществляя мероприятия, исключающие или снижающие влияние этого воздействия и обеспечивающие медленное остывание шва и околошовной зоны.

Автоматическую сварку конструкций из углеродистых сталей и сталей повышенной прочности при отрицательной климатической температуре разрешается выполнять в соответствии с технологическим процессом, установленным для сварки при положительной температуре:

а) швов листов толщиной до 30 мм – при температуре до минус 30°C;

б) швов листов толщиной более 30 мм – при температуре до минус 20°C.

При более низких температурах металла автоматическая сварка может производиться согласно специально разработанному технологическому процессу, предусматривающему увеличение тепловложений и снижение скорости охлаждения.

Электрошлаковая сварка конструкций из углеродистых сталей и сталей повышенной прочности может выполняться без ограничений температуры окружающего воздуха.

Сварные швы кожуха подлежат контролю ультразвуковой дефектоскопией и проникающими излучениями. СНиП III-18-75 определяет следующие нормы контроля:

- ультразвуковой дефектоскопией – 100% длины швов;
- проникающими излучениями – 8% длины швов, выполненных ручной и полуавтоматической сваркой, и 1,5% длины швов, выполненных автоматической и электрошлаковой сваркой.

К местам обязательного просвечивания отнесены участки швов с признаками дефектов, обнаруженные ультразвуковой дефектоскопией.

В соответствии с делением доменной печи на зоны с различными технологическими процессами кожух доменной печи также можно разделить на соответствующие участки.

Кожух лещади – нижний участок кожуха печи, внутри которого находится жесткий массив из огнеупорных блоков и кладки, расположенный на фундаменте, эксплуатируемый в чрезвычайно сложных условиях (рис. 3.3). Кладка лещади постоянно омывается жидким чугуном, испытывает большое гидростатическое давление и термические напряжения. При эксплуатации печи по мере разгара футеровки в яме лещади накапливается жидкий чугун, так называемый «козел». Для его выпуска и, тем самым, сокращения простоя печи при ремонтах в кожухе лещади предусматриваются специальные «козловые» летки.

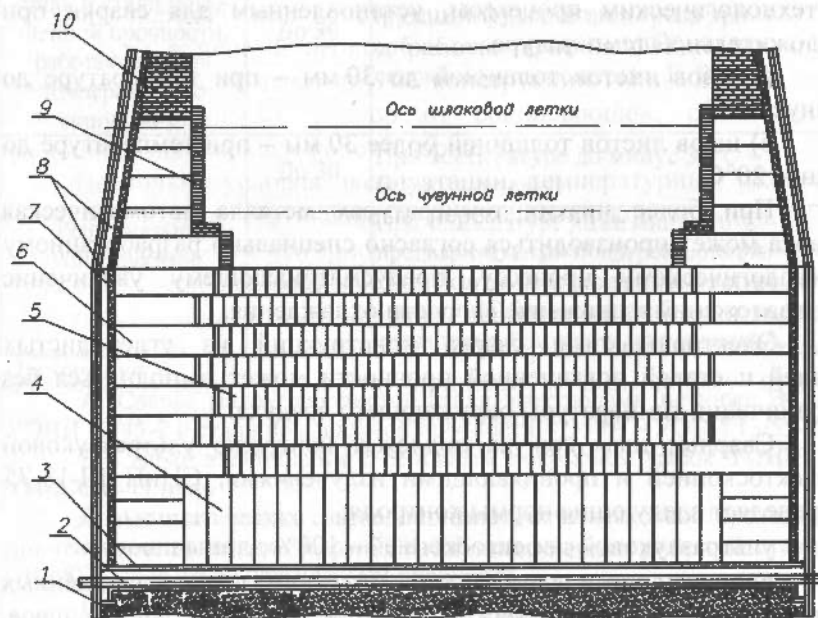


Рис. 3.3. Компонировка лещади доменной печи:

- 1 – фундамент; 2 – охлаждение лещади; 3 – днище печи;
4 – графитированные блоки; 5 – высокоглиноземистый кирпич;
6 – углеродистые блоки; 7 – углеродистая масса; 8 – холодильники;
9, 10 – шамотный кирпич

Нижняя часть кожуха лещади опускается в массив фундамента ниже системы охлаждения лещади и служит анкером, закрепляющим кожух от подъема при воздействии внутреннего давления. Для увеличения необходимого сцепления с бетоном, играющего роль жесткого днища, на этой части кожуха иногда располагают дополнительные кольцевые ребра. Надежность кожуха в большой степени зависит от состояния кладки лещади, механизм разрушения которой можно представить следующим образом.

В процессе работы печи кладка лещади разрушается и вследствие недостаточной компенсации радиальных деформаций растрескивается по периферии в радиальном направлении. Углеродистые блоки, защемляющие верхний ряд кладки центрального массива, также растрескиваются, из-за чего чугун попадает в зону раскрытия радиальных швов. За счет радиальных сил происходит обжатие и выпучивание верхнего ряда кладки, чугун проходит под подошву верхнего ряда углеродистых блоков.

Проникая в швы кладки, при неустойчивом режиме печи, связанном с колебаниями температуры, жидкий чугун может застывать. Поскольку изотерма 1150°C, соответствующая его затвердению, расположена ниже, чугун может вновь расплавиться и оставаться жидким. Высокое содержание фосфора в металле делает его высокоподвижным. При проникновении чугуна под подошву верхнего ряда углеродистых блоков поперечная нагрузка стабилизируется и образуется подъемная сила, действующая на верхний ряд [37, 51, 66].

При затвердевании ускоряется графитизация чугуна при высоких температурах, что приводит к значительному увеличению его объема. Обычно линейные размеры отливки увеличиваются на 0,2 – 0,9%.

Этот процесс сопровождается образованием отдельных очагов разрушения в периферийной части центрального массива кладки вследствие неодинакового термического роста материалов, а также эрозии растрескивающейся кладки. Накопление повреждений и уменьшение радиального обжатия верхнего слоя приводят к всплыванию основной части углеродистых блоков верхнего ряда. Далее процесс повторяется до тех пор, пока затвердевший чугун будет проникать под новые ряды кладки.

Проникновение чугуна в периферию лещади опасно и тем, что, заполняя раскрытые швы в непосредственной близости к кожуху, он, остывая, расклинивает блоки, ускоряет разрушение кладки, приводит к возникновению чрезмерных нагрузок на кожух, местным перегревам, образованию трещин, а при их развитии – прорывам в кожухе.

Противодействие кожуха свободному расширению лещади в радиальном направлении вызывает в кладке радиальные силы сжатия кирпичей, в результате чего происходит их поперечное расширение. При этом зазоры в кладке уменьшаются, а в центральной части закрываются полностью. Это приводит к двустороннему сжатию центральной части слоя.

Здесь возникает известное противоречие: чем больше толщина кожуха и, соответственно, его жесткость, тем кожух прочнее, но одновременно тем большее радиальное давление он оказывает на кладку лещади. Чем больше радиальное давление кожуха и чем податливее материал лещади, тем большая часть слоя лещади подвергается уплотнению и тем меньше ширина раскрытия швов.

Каждый слой в целом дополнительно деформируется от неравномерного нагрева по толщине лещади. Так как верхние грани кирпича удлиняются больше нижних, то происходит вспучивание первоначально плоского слоя кирпича. В результате появляются центральная уплотненная и периферийная зоны, где радиальные швы расходятся. Кладка лещади расстраивается, в ней появляются трещины, т.е. кожух не выполняет своего назначения – обжимать кладку до состояния нормальной эксплуатации настолько, чтобы в ней не возникали растягивающие усилия и не появлялись трещины.

Вследствие коробления слоев кладки между ними образуются пустоты, куда и проникает жидкий чугун, а верхний слой углеродистых блоков под действием подъемной силы стремится всплыть.

Особенно опасна такая ситуация при вводе печи в эксплуатацию после капитального ремонта II разряда, при котором, как правило, не предусмотрен предварительный выпуск жидкого чугуна (так называемого «козла»), накопившегося в лещади при ее разгаре во время предшествующей эксплуатации. Оставшийся чугун остывает и при разогреве печи после ремонта продолжает свое активное воздействие на кладку и кожух, что в ряде случаев

приводит к аварийным ситуациям – разрушению кожуха лещади и прорыву жидкого чугуна.

На некоторых печах в кожухе лещади предусматриваются специальные отверстия – «козловые» летки для выпуска при капитальных ремонтах скопившегося в яме лещади чугуна. Его выпуск перед капитальным ремонтом II разряда через эти летки способствует надежной и долговечной работе кожуха лещади.

Приведенные особенности процессов, возникающих в лещади нагрузок и воздействий, требуют особенного внимания к прочности кожуха в различные периоды эксплуатации печи.

Кожух лещади имеет цилиндрическую форму и состоит из стальных листов повышенной или высокой прочности толщиной 40 – 60 мм. Собственно лещадь обычно выполняется из кирпича – шамотного или глиноземистого и углеродистых блоков. С внутренней стороны кожуха расположены сплошные вертикальные плитовые холодильники, отделенные от футеровки зазором, заполненным компенсационным материалом.

Различают два периода работы этой комбинированной конструкции. Первый, в начале эксплуатации печи, когда кладка цела. В этот период ее термическое расширение компенсируется упругими свойствами набойки, а кольцевые напряжения в кожухе в районе верхней, наиболее нагретой, зоны лещади значительно выше напряжений в нижнем районе. Однако, в соответствии с описанным выше механизмом происходит разрушение верхних слоев лещади, вследствие чего нагрузка от термического распора здесь снижается. В то же время, нижние слои прогреваются, увеличивается их распорное воздействие и растут напряжения в этой зоне кожуха. Поэтому толщина листов кожуха принимается одинаковой по всей высоте лещади.

Учитывая большое влияние температурного поля на состояние кладки лещади, следует отметить значительную роль системы ее охлаждения, в том числе подлещадного, для которого применяют воду, воздух и масло. Из соображений безопасности в отечественных печах чаще всего устраивается воздушное охлаждение, а в последнее время – водяное. Масло для этих систем применяется лишь на некоторых зарубежных печах.

Для охлаждения под лещадью сквозь доменную печь прокладывается система труб, в которые подается воздух или вода.

печи является фурменная, расположенная в верхней части горна, где параметры технологического процесса достигают своего максимума.

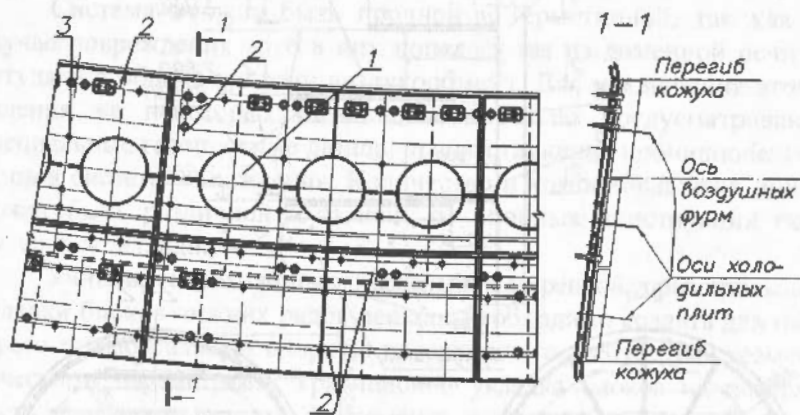


Рис. 3.5. Участок кожуха горна и фурменной зоны:
1, 2, 3 – отверстия для фурменных приборов, выводных трубкок
холодильных плит и штуцеров заправки раствора соответственно

Кожух горна, особенно фурменной зоны, подвержен чрезвычайно сложным воздействиям и нагрузкам в силу ряда причин:

- наличия перелома очертания кожуха, вызывающего дополнительные напряжения в нем вследствие краевого эффекта;
- возникновения дополнительного распора, вызванного вертикальным температурным расширением кладки вследствие конической формы горна в фурменной зоне;
- наличия большого числа отверстий (16 – 42 шт) для фурменных приборов, чугунных и шлаковых леток, системы охлаждения;
- выполнения в ряде случаев прямоугольных вырезов для рам чугунных леток, что повышает вероятность возникновения трещин;
- сложного переменного характера температурного режима околелеточной зоны, связанного с интенсивным нагреванием кожуха в период выпуска чугуна, когда металл околелеточной зоны стремится расшириться, чему препятствует прилегающая более охлажденная часть кожуха, приводящего к возникновению напряжений, в ряде случаев значительно превосходящих предел текучести;

– прикрепления к кожуху элементов оборудования (захват электропушки чугунной летки, шлаковый стопор и т.п.), передающих кожуху значительные (до 250 – 300 кН) переменные усилия, что может привести к появлению трещин, грозящих вытеканием чугуна из печи.

Эти воздействия и нагрузки создают сложное напряженное состояние, вызывают появление трещины, чаще всего в зоне чугунной летки, где к плоскому напряженному состоянию добавляются напряжения изгиба, действующие в плоскости, перпендикулярной поверхности кожуха, в так называемом Z-направлении. Трещины, как правило, появляются между двумя, ослабляющими кожух, отверстиями или в других местах концентрации напряжений и являются следствием термического воздействия и расширения футеровки.

Кожух горна и фурменной зоны, как правило, выполняется из листов такой же толщины, что и кожух лещади. Особое значение здесь имеет учет ослабления кожуха вырезами для леток и отверстиями для фурменных приборов. Оно компенсируется местным увеличением расчетной толщины кожуха фурменной зоны. Ширина усиленной зоны должна составлять не менее 2-х диаметров отверстий для фурм и быть симметричной относительно осей этих отверстий. При необходимости допускается смещение зоны на величину, меньшую 20% диаметра отверстий.

Количество чугунных леток определяется производительностью доменной печи и, соответственно, ее объемом. Печи объемом до 2000 м³ оборудуются одной чугунной леткой, 2000 – 3000 м³ – двумя, 3200 м³ – тремя, свыше – четырьмя. При наличии двух чугунных леток они располагаются под углом 160° друг к другу, четырех – попарно под углом 80° и 100° между парами. Выпуск чугуна производится поочередно через каждую из леток в определенной последовательности.

Леточное отверстие в горне ослабляет кожух печи, поэтому в этом месте устанавливается металлическая литая или сварная рама, прикрепленная к кожуху печи. Для улучшения работы кожуха в околелеточных зонах с целью надежного, бесперебойного охлаждения устанавливаются усовершенствованные холодильные плиты, например, медные, которыми обрамляется летка.

Кроме того, для компенсации ослабления в кожухе в районе расположения вырезов под летки применяются листы большей толщины.

Шлаковая летка представляет собой отверстие (канал) в стенке горна, расположенное на высоте 1400–1900 мм от уровня чугунной летки и предназначенное для периодического выпуска шлака из доменной печи. Летки смещены друг относительно друга в горизонтальной плоскости. В отверстие для шлаковой летки устанавливается арматура, которая называется шлаковым прибором.

Требования технологического процесса по увеличению количества фурменных приборов и их диаметров, при одновременном наблюдаемом росте толщины листов кожуха, предполагают выполнение дальнейшей уточненной количественной оценки допустимого ослабления кожуха в этом районе.

Кожух заплечиков имеет вид обратного конуса (рис. 3.6), расширяющегося кверху и препятствующего быстрому опусканию шихты в горн, поскольку в заплечиках начинаются процессы плавления и шлакообразования. Своей окружностью малого диаметра он сопрягается с кожухом фурменной зоны, горна, окружностью большого диаметра – с распаром. Кожух охлаждается сплошными плитовыми холодильниками. При этом толщина футеровки относительно невелика, что снижает ее воздействие на кожух.

На напряженное состояние кожуха заплечиков влияет близкое расположение зоны отверстий для фурменных приборов, вызванное этим ослабление и краевой эффект в районах переломов оболочек.

Мораторное кольцо устанавливается на печах с несамонесущим кожухом на месте перелома геометрии кожуха после нижнего пояса кожуха шахты. Кольцо одновременно входит в состав условной кольцевой балки швеллерного сечения как нижняя его полка, служащая для опирания колонн шахты при их несовпадении с колоннами горна. К кольцу прикрепляются колонны горна с помощью незатягиваемых болтов, что допускает автономный подъем мораторного кольца над колоннами горна при нагреве кожуха.

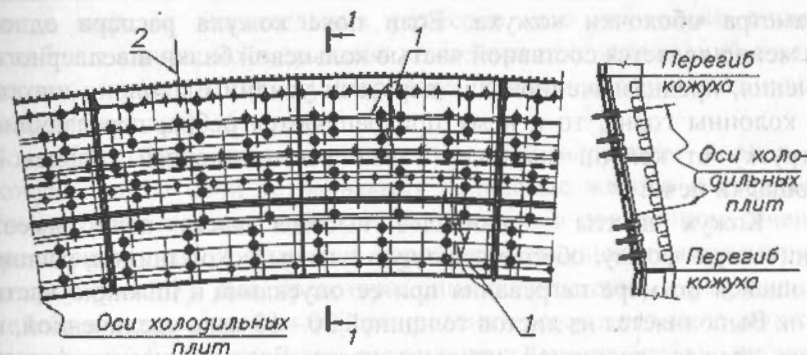


Рис. 3.6. Участок кожуха заплечиков:

1, 2 – отверстия для выводных трубок холодильных плит и штуцеров закачки раствора соответственно

Охлаждение мораторного кольца осуществляется горизонтальными плитовыми холодильниками, располагаемыми по его плоскости.

Одним из факторов, определяющих возможную ширину кольца, как отмечалось, является его прочность при работе на внутреннее давление воздуха в печи. Расчеты показывают, что при рабочем давлении воздуха под колошником печи до 0,2 МПа ширина кольца не может превышать 450 мм. Толщина мораторного кольца должна быть не меньше толщины более тонкого из примыкающих к нему участков кожуха.

Кожух распара и шахты представляет собой единую неделимую конструкцию, отличающуюся лишь толщиной футеровки в зоне распара.

Кожух распара имеет цилиндрическую форму и является наиболее широкой частью печи, соединяющей заплечики с шахтой.

В так называемом тонкостенном распаре вертикальные плитовые холодильники защищаются слоем кладки небольшой толщины, а мораторное кольцо размещается в уровне верха распара. В широко применяемом толстостенном распаре футеровка и система охлаждения идентичны решениям, используемым в шахтах.

При опирании кожуха распара на колонны горна устанавливают ребра жесткости высотой не менее 0,15–0,20

диаметра оболочки кожуха. Если пояс кожуха распара одновременно является составной частью кольцевой балки швеллерного сечения, предназначенной для передачи усилий от колонн шахты на колонны горна, то к нему прикрепляются ребра, передающие нагрузку от колонн шахты, а также настил нижней кольцевой площадки печи.

Кожух шахты — наиболее высокая часть печи, имеет коническую форму, обеспечивающую плавный сход шихты, расширяющейся по мере нагревания при ее опускании в нижнюю часть печи. Выполняется из листов толщиной 30–60 мм с увеличенной, в ряде случаев, толщиной нижнего пояса. Его коническая форма переходит в цилиндрическую оболочку колошника. Угол наклона образующей зависит от качества сырьевых материалов и в большинстве случаев составляет 84° – 86° . Охлаждение кожуха осуществляется плитовыми холодильниками различной конструкции, как правило, расположенными примерно на $2/3$ высоты шахты. Остальная часть кожуха не имеет холодильных плит и называется неохлаждаемой зоной. Верхняя зона кожуха, примыкающая к куполу печи, и собственно купол также не имеют охлаждения и защищены чугунными плитами от ударной нагрузки, возникающей при падении с загрузочного устройства шихтовых материалов. Они крепятся к кожуху с помощью болтов, а в случае применения раздельных плит соединяются между собой болтами.

Известна также конструкция с установкой плитовых холодильников по всей высоте печи, включая купол, что с точки зрения его долговечности более предпочтительно.

В шахте происходят важнейшие этапы технологического процесса — прием и накопление шихтовых материалов, их разогрев, окисление, выделение шлака и т.д. Условия работы кожуха шахты достаточно сложные и не всегда формализованы. Он воспринимает нелинейно распределенные по высоте и в поперечном сечении термические воздействия, внутреннее давление газовой среды и футеровки, изменяющей в процессе эксплуатации свои свойства и силовые воздействия, связанные с геометрическими параметрами.

Следует заметить, что конструкция применяемых холодильников в значительной степени влияет на прочностные качества кожуха и его герметичность. Так, применение весьма эффективных горизонтальных холодильников предполагает устройство большого

числа вырезов значительных размеров, что не только сильно ослабляет кожух, но и, вызывая концентрацию напряжений в этих местах, приводит к суммарному коэффициенту увеличения напряжений до 4–6.

Для сбора охлаждающей воды при наружном поливе на кожухе шахты печи устраиваются кольцевые желоба и козырьки. Конструкция желобов достаточно проста и в поперечном сечении представляет собой открытый короб, приваренный по периметру к кожуху (рис.3.7). Для предотвращения повреждений и разрушения желоба при термическом деформировании кожуха его выполняют из отдельных 4–6 участков, соединенных между собой гибкими вставками. Во избежание протечек воды, особенно в район чутунных леток, зазоры между вставками и кожухом заполняют асбестовым шнуром или иным плотным материалом. Козырьки представляют собой приваренные под наклоном к кожуху плоские листы и служат для направления потока падающей воды и распределения ее по поверхности кожуха. Козырьки имеют щели в местах, примыкающих к кожуху, через которые и проходит поток воды.

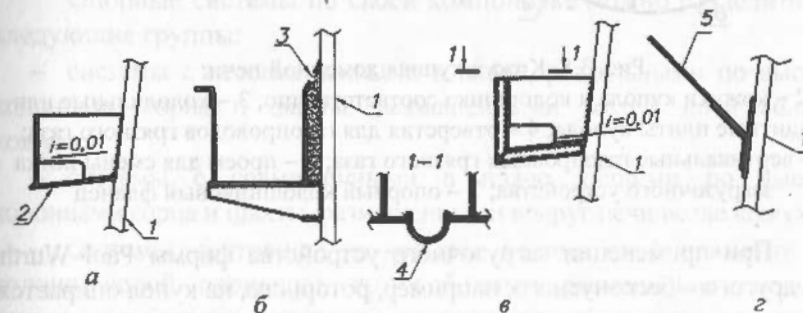


Рис. 3.7. Кольцевые желоба и козырьки для сбора охлаждающей воды:

- а — рядовой желоб; б — желоб у фундамента печи;
- в — желоб с компенсатором; г — козырек; 1 — кожух доменной печи;
- 2 — отверстия в желобе для пропуска воды; 3 — отверстия для заливки огнеупорного бетона; 4 — компенсатор; 5 — козырек

Кожух колошника печи имеет форму цилиндра и является верхней частью кожуха шахты. Если эта часть кожуха не охлаждается, то устраивается защита от ударов падающей при загрузке печи шихты чугунными литыми плитами.

Кожух купола печи имеет форму конуса (рис.3.8) и выполняет ряд важных технологических и строительных функций. Нижним основанием он сопрягается с кожухом колошника, а к верхнему его основанию крепится колошниковый фланец, на котором устанавливается загрузочное устройство. В ранее применяемых конструкциях печей купол служит также опорной конструкцией для кронштейнов колошниковой площадки, колонн копра и др.

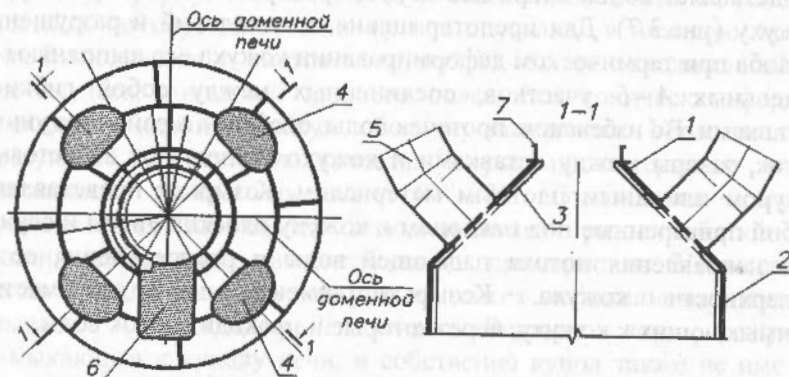


Рис. 3.8. Кожух купола доменной печи:

1, 2 – кожухи купола и колошника соответственно; 3 – холодильные или защитные плиты купола; 4 – отверстия для газопроводов грязного газа; 5 – вертикальные газопроводы грязного газа; 6 – проем для смены лотка загрузочного устройства; 7 – опорный колошниковый фланец

При применении загрузочного устройства фирмы Paul Wurth или другого – бесконусного, например, роторного, на купол опирается специальная опорная система.

В куполе печи размещены четыре (или восемь для печей объемом 5000 и 5500 м³) отверстия для вертикальных газопроводов грязного газа, проем для смены лотка при бесконусном загрузочном устройстве типа фирмы Paul Wurth и другие отверстия. Из-за значительного ослабления, в ряде случаев, купол усиливается накладками.

При нарушениях технологического процесса нередко случаются перегревы купола колошника и верхней части кожуха шахты. Это приводит к потере устойчивости перегретой оболочки,

к полному образованию и перекосу опирающихся на него конструкций, а соответственно – к нарушениям в работе загрузочного устройства.

Учитывая возможность возникновения таких ситуаций, целесообразно принимать меры по максимальному снижению нагрузок на купол печи в период эксплуатации и при возникновении нештатных ситуаций.

§ 3.4. Опорные системы доменной печи

Опорные системы доменной печи предназначены для снятия или значительного уменьшения вертикальных и горизонтальных нагрузок на ее кожух от оборудования, монтажных и эксплуатационных грузоподъемных механизмов, ветровых и других воздействий. В этих случаях кожух в основном выполняет функции агрегата, в котором происходит технологический процесс выплавки чугуна, и жесткого ядра, обеспечивающего общую устойчивость системы.

Опорные системы по своей компоновке можно разделить на следующие группы:

- системы с несовмещенными в плане, отдельными по высоте колоннами горна и шахты, размещенными вокруг печи вблизи кожуха;
- системы с совмещенными в плане, общими по высоте колоннами горна и шахты, размещенными вокруг печи возле кожуха;
- системы, состоящие из четырех колонн от фундамента до колошниковой площадки, со свободным размещением колонн вокруг кожуха печи, так называемые четырехколонники.

До последнего времени наибольшее распространение имели печи с опорной системой, состоящей из колонн горна, расположенных между фундаментом и мораторным кольцом, и колонн шахты, несовмещенных в плане с колоннами горна и расположенных между мораторным кольцом и колошниковой площадкой (рис. 3.9). Это решение связано с разделением кожуха печи мораторным кольцом и предполагает его опирание на колонны горна в период монтажа и в первый период эксплуатации.

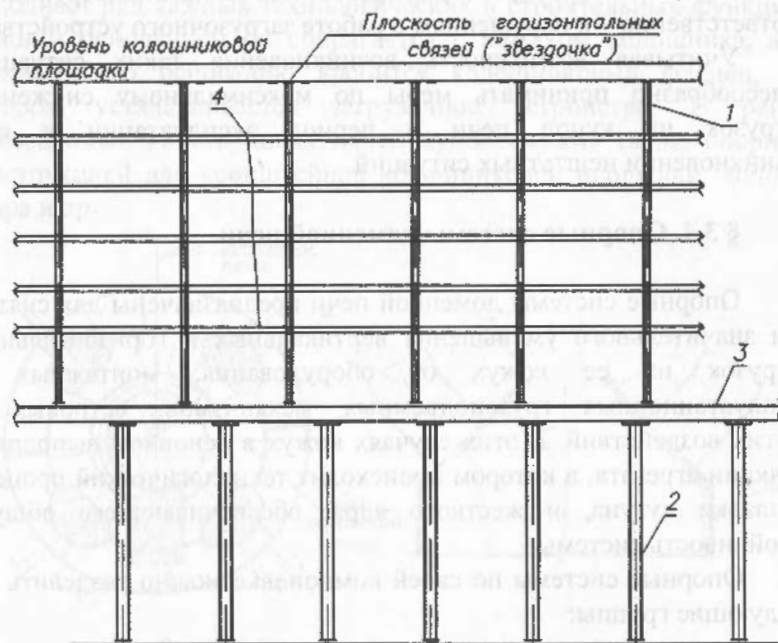


Рис. 3.9. Схема постоянной опорной системы доменной печи с несовпадающими в плане колоннами горна и шахты:

- 1, 2 – колонны шахты и горна соответственно; 3 – кольцевая балка;
4 – уровни кольцевых площадок печи

В таких случаях узел опирания колонн шахты решается следующим образом (рис.3.10). Колонны шахты опираются на балку швеллерного типа, опирающуюся на колонны горна. В качестве верхнего пояса балки используется настил нижней кольцевой площадки шахты, для чего он выполняется из листа толщиной 10–12 мм, приваренного к кожуху сплошным швом. Нижний пояс образовывается мораторным кольцом, а стенкой балки является нижний участок кожуха шахты. Ребра жесткости, расположенные в местах опирания колонн шахты, воспринимают нагрузку от колошниковой конструкции и площадок, расположенных на колоннах шахты. Скомпонованная таким образом балка хорошо воспринимает одновременное действие изгиба и кручения. Такое

решение делает универсальной возможную компоновку колонн шахты, независимой от расположения колонн горна.

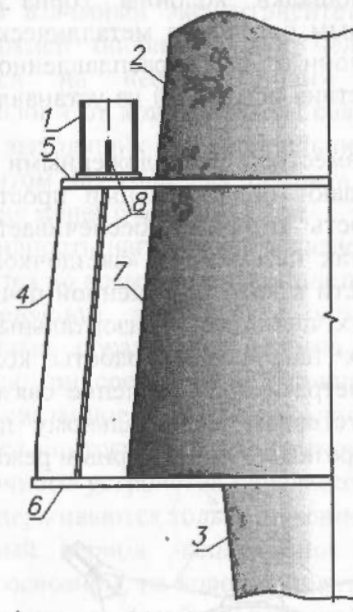


Рис. 3.10. Узел опирания колонны шахты на несовпадающую с ней в плане колонну горна:

- 1 – колонна шахты; 2, 3 – кожухи шахты и горна соответственно;
4 – опорная кольцевая балка швеллерного сечения; 5 – сплошной лист кольцевой площадки – верхний пояс балки; 6 – мораторное кольцо – нижний пояс балки; 7 – часть нижнего пояса кожуха шахты – вертикальная стенка балки; 8 – местные опорные ребра

Колонны горна воспринимают нагрузки от колонн шахты и кожуха печи с футеровкой, расположенной на мораторном кольце, а также от опирающегося на них кольцевого воздухопровода горячего дутья и части рабочей площадки.

Количество, расположение, а, в ряде случаев, и габариты колонн зависят от числа фурм. Для возможности смены фурм колонны размещают посередине между ними, причем ширина ближайшей к кожуху полки колонны, как правило, ограничена ввиду необходимости выноса фурменного прибора при его замене. Расстояние между кожухом и колоннами горна должно быть не

менее 500 мм, что связано с необходимостью обеспечения доступа к кожуху во время ремонта.

Ниже рабочей площадки колонны горна изолируются кирпичом или жароупорным бетоном в металлическом кожухе с целью предохранения колонн от брызг расплавленного металла и шлака, а также от воздействия испарений из устанавливаемых под площадкой ковшей.

Колонны шахты совместно с расположенными на них кольцевыми площадками создают полигональный пространственный каркас, общая устойчивость которого обеспечивается системой горизонтальных связей, так называемой «звездочкой», прикрепляющих его в верхней части к кожуху доменной печи (рис. 3.11). Связи передают на кожух печи все горизонтальные усилия от колонн, воспринимающих нагрузки от работы колошниковой конструкции, воздействия ветра и др. Крепление связей конструктивно не должно препятствовать вертикальному перемещению конструкций, вызванному разным температурным режимом.

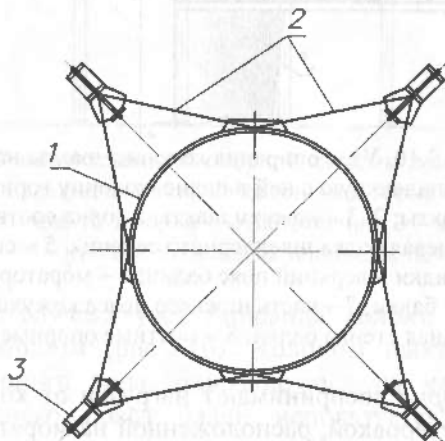


Рис. 3.11. Горизонтальные связи крепления колонн шахты к кожуху печи:
1 — кожух шахты печи; 2 — горизонтальные связи; 3 — колонны шахты

При соосном расположении колонн горна и шахты последние непосредственно опираются на колонны горна. В ряде случаев, в зависимости от компоновки конструкции здания доменной печи, называемого литейным двором, колонны шахты могут входить в состав этого здания и служить опорами для его элементов.

Расположение колонн шахты в плане определяется, в основном, узлом их опирания на колонны горна, предполагающим минимальный взаимный эксцентриситет, а также необходимым радиусом верхней опорной балки колошниковой площадки с опирающимися на нее колоннами колошниковой копра. Расстояние колонн от кожуха шахты связано с размещением труб охлаждения, выходящих из холодильников, и другого оборудования, габаритом прохода для ремонта кожуха и, как правило, принимается не менее 600 мм.

Интенсивность нагрузок, передаваемых на колонны горна и шахты, меняется во время эксплуатации печи.

При конусном загрузочном устройстве эти изменения зависят, главным образом, от режима работы балансиров, где отслеживаются три состояния — нормальная нагрузка, резкое ее повышение, связанное с динамическим воздействием быстро опускающегося контргруза, и монтажное состояние, при котором масса загрузочного устройства передается на монтажную балку, а контргрузы удерживаются только тяжением тросов.

В первый период эксплуатации масса всего сооружения передается, в основном, на колонны шахты, а после разогрева печи горн расширяется в вертикальном направлении, приподнимает шахту, отделяя ее от верха колонн горна. Во избежание повреждения конструкций, как уже отмечалось, болты между верхом колонн горна и мораторным кольцом устанавливаются с зазором и не затягиваются. Учитывая появление изгибающих моментов, для крепления применяют болты повышенной прочности и большого диаметра (80–100 мм), которые способны воспринять горизонтальные силы, передаваемые на них колонной. Возможно также закрепление колонн к конструкциям рабочей площадки или установка ниже ее уровня системы связей, закрепляющих колонны к кожуху печи. Однако такое решение приводит к дополнительным изгибающим моментам в колоннах, увеличению их сечений и нежелательно с точки зрения обслуживания печи.

Внедрение печей с самонесущим кожухом позволило отказаться от опирания шахты и, тем самым, от колонн горна. Стремление освободить пространство вокруг печи для создания условий при обслуживании печи и для механизации работ у горна

способствовало сокращению числа колонн. Были разработаны опорные системы в виде совмещенных по высоте четырех колонн, расположенных вокруг кожуха печи (рис. 3.12) и служащих опорами для верхней опорной кольцевой балки колошниковой площадки. Совместно с кольцевыми площадками колонны образуют также пространственную систему, общая устойчивость которой обеспечивается системой горизонтальных связей, прикрепляющих ее в верхней части к кожуху доменной печи. Такие системы получили рабочее название – четырехколонник.

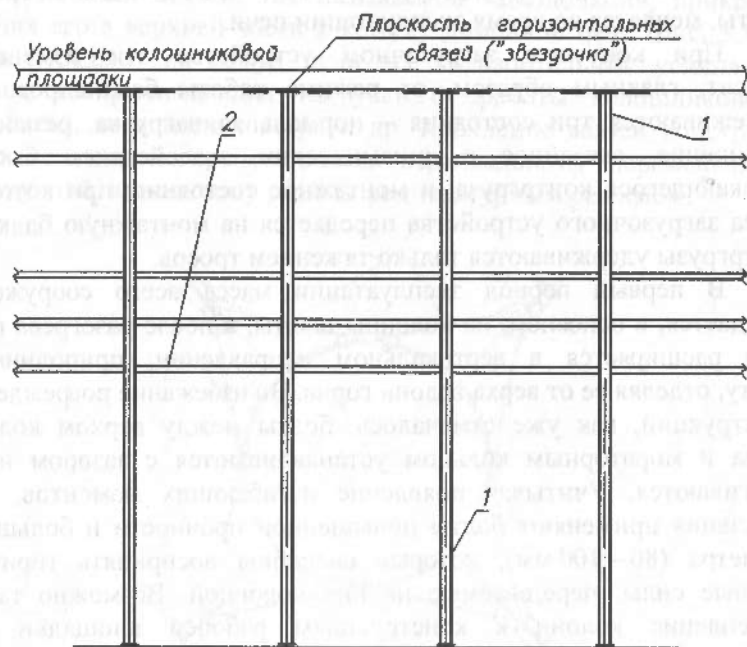


Рис. 3.12. Постоянная опорная система доменной печи с совпадающими в плане колоннами горна и шахты:

1 – колонны системы; 2 – уровни кольцевых площадок печи

При расположении колонн близко к печи не всегда возможно изыскать место для размещения расчетного габарита их поперечного сечения, что требует применения для колонн неординарных поперечных сечений и стали повышенной прочности.

С целью повышения уровня механизации работ на печи была создана опорная система в виде четырех колонн, размещенных вдали от кожуха печи. Такая система получила достаточно широкое распространение как при капитальных ремонтах, так и реконструкциях доменных печей. Колонны, как правило, устанавливаются в створе колонн здания печи и входят в его каркас. Схемы четырехколонников разнообразны и зависят от условий размещения колонн на всем их протяжении – снизу доверху.

При невозможности установки колонн четырехколонника необходимого габарита по всей высоте он может выполняться из двух или более различных по габаритам частей (рис. 3.13). Колонны нижней его части устанавливаются исходя из условий расположения на генеральном плане железнодорожных путей. В отдельных случаях колонны могут быть достаточно далеко отнесены от печи. Габарит верхних частей четырехколонника уменьшается для нормальной компоновки площадок печи и колонны опираются на нижний расширенный четырехколонник через специальные опорные балки. При необходимости колонны четырехколонника в своей верхней части также могут привязываться системой связей – «звездочкой» к кожуху печи, чем обеспечивается их общая устойчивость. Во время ремонтов и замены кожуха печи в этом районе система связей должна быть временно перенесена.

Наиболее полно проблема освобождения пространства вокруг печи решена в конструкции бесколонной доменной печи с круглым литейным двором, впервые примененной для доменных печей объемом 5000 и 5580 м³ и ряда других [61]. Такая конструкция имеет определенное преимущество при эксплуатации, так как позволяет максимально приблизить кран здания литейного двора к доменной печи и обеспечить условия для наилучшей механизации трудоемких работ у горна печи. Вместе с тем, отсутствие опорной системы приводит к передаче на кожух печи значительных вертикальных и горизонтальных нагрузок, а также усложняет производство ремонтов печи со сменой всего кожуха или его части и требует установки дополнительных временных опорных конструкций.

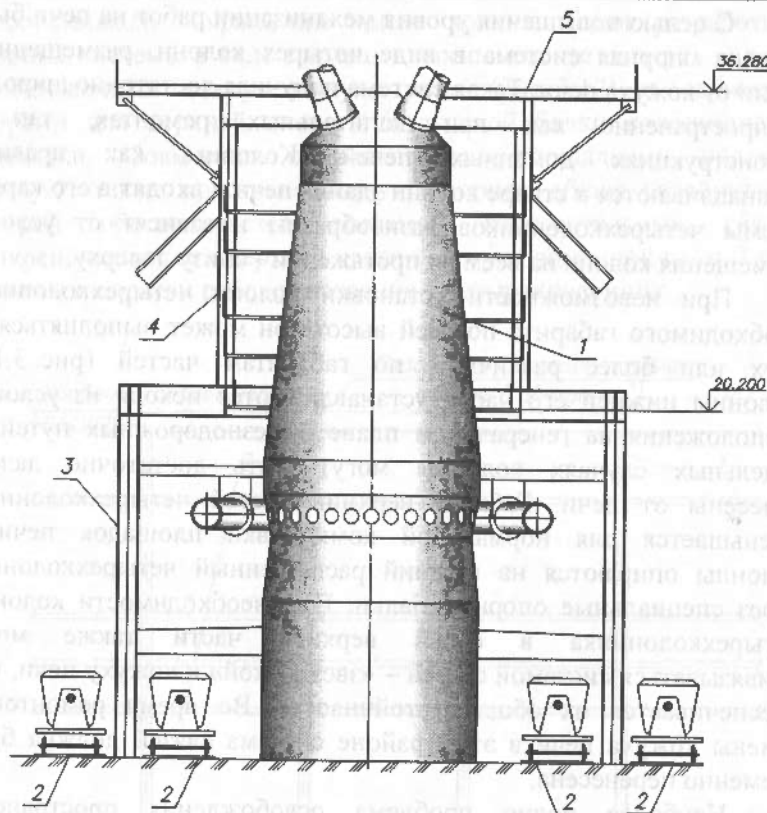


Рис. 3.13. Опорная четырехколонная система с разнесенными колоннами: 1 – доменная печь; 2 – железнодорожные пути; 3, 4 – колонны опорной системы I^я и II^я ярусов соответственно; 5 – колошниковая площадка

§ 3.5. Площадки опорных систем доменной печи

В состав опорных систем доменной печи входят технологические и обслуживающие площадки различного назначения, конструктивно обеспечивающие устойчивость системы и отдельных ее колонн.

Колошниковая площадка является основной технологической рабочей и ремонтной площадкой верхней зоны печи. Она распо-

ложена поверх колонн шахты или четырехколонника и служит жестким диском всего пространственного каркаса опорной системы, ее настил, в отличие от других площадок печи, выполняется из сплошного листа толщиной 10 мм с несскользящей поверхностью. Для стока воды в настиле предусматриваются отверстия диаметром 30–50 мм с шагом 250 мм. Площадка ограждается перилами высотой не менее 1,2 м со сплошной зашивкой стальными листами.

На этой площадке размещаются технологические помещения, действующее оборудование, материалы для ремонта, запасные детали и др., поэтому нагрузка при проектировании принимается не менее 10 кПа.

Печи небольшого объема строительства прошлых лет были оборудованы площадками из ортогональной или полигональной системы балок, опирающихся на кронштейны, расположенные на кожухе печи (рис. 3.14, а). С целью снижения нагрузок на кожух доменной печи и отделения его от сопутствующих конструкций была разработана схема колошниковой площадки, опирающейся на колонны шахты (рис. 3.14, б).

С ростом объемов печей и увеличением количества и габаритов оборудования увеличивались и размеры площадок. Для доменной печи объемом 2000 м³ была разработана принципиально новая конструкция колошниковой площадки (рис. 3.15). Основой ее служит кольцевая балка, диаметр которой определяется положением колонн шахты или четырехколонника, на которые она опирается. В отдельных случаях, по условиям компоновки колонн шахты, может быть применена полигональная балка.

На кольцевую балку опираются балки площадки, к которым приваривается сплошной настил. В качестве поперечного сечения кольцевых балок, как правило, принимают круг, так как, во-первых, цилиндрическая оболочка не требует специальных подкреплений для обеспечения местной устойчивости стенки и, во-вторых, конструктивное решение стыков балки в кольцевом направлении решается достаточно просто. Диаметр поперечного сечения балок принимается в пределах 1800–2400 мм, толщина стенки 25–30 мм. Такая балка способна воспринимать не только изгибающие, но и крутящие усилия от части колошниковой площадки, расположенной на консолях.

Жесткость таких балок велика и расчеты показывают, что их прогиб при нормальной работе не превышает 0,5 мм, что полностью обеспечивает нормальную работу загрузочного устройства.

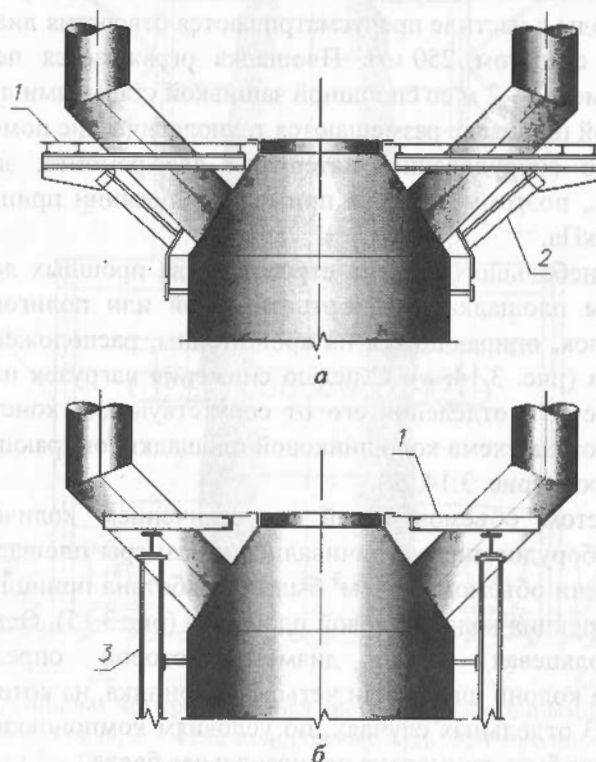


Рис. 3.14. Схемы опорных конструкций колошниковой площадки:
а – на кронштейнах, закрепленных к кожуху печи; б – на колоннах шахты; 1 – балки колошниковой площадки; 2 – кронштейны к куполу печи; 3 – колонны шахты печи

Учитывая относительную тонкостенность кольцевой балки, в местах опирания на нее конструкций, например, колонн колошниковой копра, создающих значительные сосредоточенные нагрузки, устанавливаются кольцевые ребра жесткости – шпангоуты или диафрагмы. В ряде случаев для этих мест толщина стенки поперечного сечения увеличивается до 20 – 25 мм.

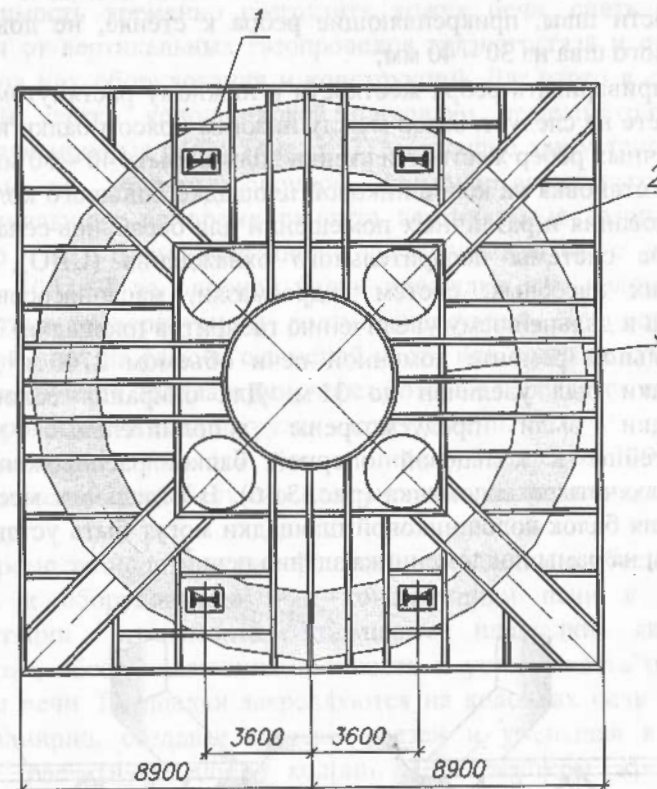


Рис. 3.15. Колошниковая площадка с опиранием на кольцевую балку:
1 – колонны шахты или четырехколонника; 2 – опорная кольцевая балка; 3 – балки колошниковой площадки

Известны также балки с поперечным прямоугольным сечением. Однако для обеспечения устойчивости плоской стенки в этом случае необходимы дополнительные ребра, диафрагмы и др., а устройство стыков весьма затруднительно. При этом особое внимание следует уделять расположению ребер жесткости и диафрагм, выполняя следующие требования:

– ребра жесткости, параллельные стыковым швам стенки, должны быть удалены от стыков на расстояние не менее $10t$ (где t – толщина стенки);

– в местах пересечения стыковых швов стенки с ребрами жесткости швы, прикрепляющие ребра к стенке, не доводят до стыкового шва на 30 – 40 мм;

– приваривать ребра жесткости к нижнему растянутому поясу в пролете не следует. Зазор между нижним поясом балки и торцом поперечных ребер жесткости стенки должен быть 40 – 50 мм.

Установка на колошниковой площадке большого количества оборудования и различных помещений для барабанов-сепараторов и баков системы испарительного охлаждения (СИО), гидравлических насосных, систем гидросмазки, маслонасосов и др. привела к дальнейшему увеличению габаритов площадки. Так, при капитальном ремонте доменной печи объемом 2700 м^3 диаметр площадки был увеличен до 31 м. Для опирания балок такой площадки были предусмотрены дополнительные несущие кронштейны к кольцевой опорной балке, расположенной на колоннах четырехколонника (рис. 3.16). В отдельных местах для опирания балок колошниковой площадки могут быть установлены и опоры на рамы поддоменника здания печи.

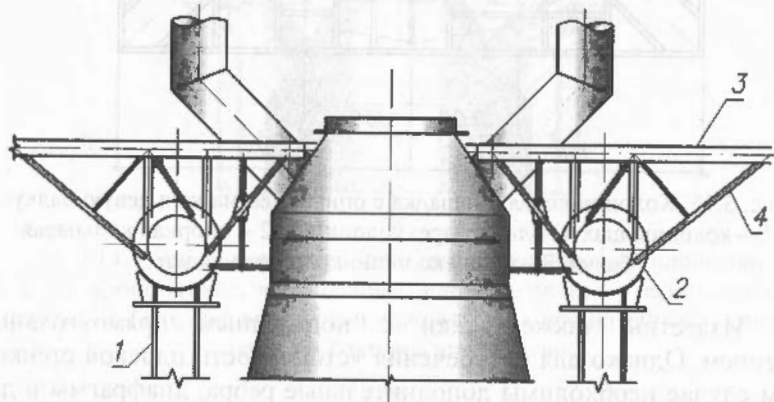


Рис. 3.16. Колошниковая площадка для доменной печи объемом 2700 м^3 :

1 – колонна четырехколонника; 2 – опорная кольцевая балка;

3 – балки колошниковой площадки; 4 – кронштейны к кольцевой балке

При ремонте печи с заменой кожуха или его части возникает необходимость временно разгрузить кожух печи, снять с него нагрузки от вертикальных газопроводов грязного газа и опирающегося на них оборудования и конструкций. Для этого в системе балочной клетки колошниковой площадки предусматриваются достаточно мощные балки (рис. 3.17), служащие для установки на них или на колонны опорной системы временных опор, поддерживающих во время ремонта вертикальные газопроводы грязного газа. Временные опоры устанавливаются с зазором ($\Delta = 50 - 100 \text{ мм}$) до опорной балки площадки или колонны, не препятствуя температурному росту конструкций. При остановке доменной печи на ремонт с заменой части или всего кожуха печи зазор заполняется прокладками, через которые передается нагрузка от газопроводов, снимая нагрузки с кожуха печи.

Кольцевые площадки имеют ширину не менее 1000 мм и предназначены для обслуживания системы охлаждения, кожуха печи и др.

Кроме технологических функций, состоящих в обеспечении доступа к оборудованию и к конструкциям печи в период эксплуатации и ремонта, кольцевые площадки являются элементом, обеспечивающим прочность и устойчивость опорной системы печи. Площадки закрепляются на колоннах печи жестко или шарнирно, создавая систему связей и уменьшая в обоих случаях расчетную длину колонн. При жестком креплении обеспечивается устойчивость опорной системы во время ремонта доменной печи. Конструкция площадок здесь несколько усложняется, так как для обеспечения их работы на кручение несущие элементы выполняются коробчатого поперечного сечения. При шарнирном креплении площадки опираются на кожух, что требует проведения мероприятий по обеспечению свободного вертикального перемещения кожуха.

В ряде случаев для равномерной передачи горизонтальных нагрузок на колонны площадки должны иметь необходимую жесткость в горизонтальном направлении, которая, как правило, обеспечивается устройством системы горизонтальных связей.

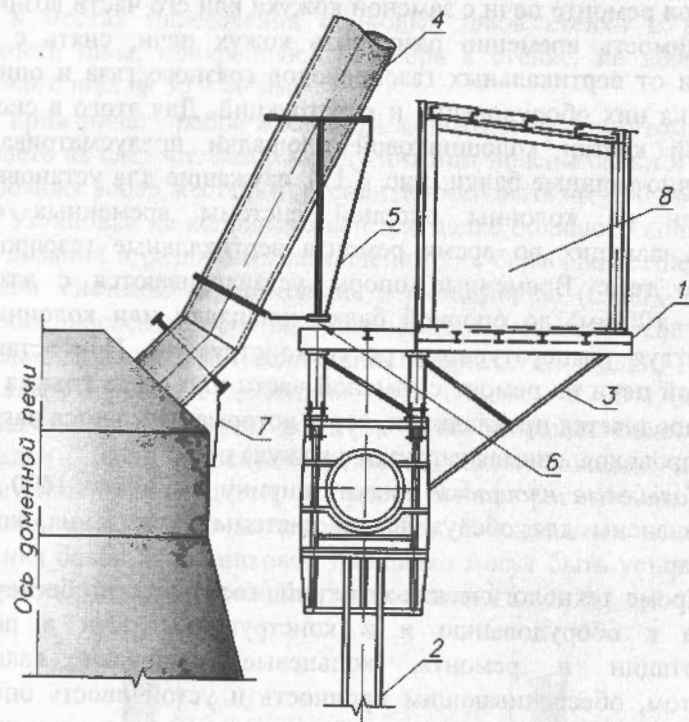


Рис. 3.17. Временное опирание газопроводов на время ремонта печи с заменой кожуха:

- 1 – балки колошниковой площадки; 2 – колонна шахты или четырехколонника; 3 – кронштейны для опирания колошниковой площадки; 4 – вертикальный газопровод грязного газа; 5 – конструкция для временного опирания газопровода грязного газа; 6 – зазор Δ между опорной конструкцией и балками колошниковой площадки; 7 – ребра в узле опирания на купол печи вертикальных газопроводов грязного газа; 8 – помещения на колошниковой площадке

Таким образом, с точки зрения компоновки кольцевые площадки бывают двух типов:

- с несущими балками площадок, опирающихся на колонны и прикрепляемыми к ним жесткими узлами;
- с несущими балками площадок, опирающихся на кронштейны, расположенные на кожухе печи и прикрепляемыми к колоннам только для уменьшения их расчетной длины.

Поскольку несущие балки имеют круговую ось, их конструкция должна обеспечить восприятие не только изгибающих, но и крутящих усилий. Для этого их сечение принимается замкнутого типа или предусматривается система связей.

При конструкции площадок, опирающихся на кронштейны, должны быть приняты меры для независимого вертикального перемещения кожуха и колонн печи.

В качестве настила площадок применяется ребристый наборной настил из стальных полос, поставленных на ребро при расположении площадок внутри помещений – сплошной листовой настил из рифленой стали. При этом следует иметь в виду, что ребристый наборной или рифленый настил не является жестким диском.

Для пропуска труб системы охлаждения и возможности обслуживания кожуха печи между настилом площадок и кожухом предусматривается зазор не менее 350 мм, а между балками площадок и кожухом – не менее 500 мм. С наружной стороны площадок устанавливаются ограждения высотой 1200 мм, а со стороны кожуха – сплошной листовой бортик высотой 200 мм, предохраняющий от соскальзывания ноги и падения предметов. Высота прохода по площадкам от пола конструкции перекрытия должна быть не менее 2200 мм. Высота от пола до низа выступающих частей коммуникаций и оборудования в местах регулярного прохода людей и на путях эвакуации должна быть не менее 2000 мм, а в местах нерегулярного прохода людей не менее 1800 мм (СНиП 2.09.02-85* Производственные здания).

В целях безопасности с каждой стороны площадок должно быть не менее двух выходов, расположенных с противоположных сторон печи. Вблизи площадок допускается устройство пандусов с уклоном не более 1:10.

Лестницы к площадкам постоянного обслуживания должны быть маршевыми, шириной не менее 800 мм, с уклоном не более 45°, а к площадкам периодического обслуживания – 60°. При высоте лестниц более 10 м должны быть устроены переходные площадки через каждые 4–6 м. В местах, где невозможно устройство наклонных лестниц, допускаются вертикальные лестницы-стремянки, огражденные предохранительными дугами-корзиной. Дуги должны располагаться на расстоянии не более 0,8 м друг от друга и соединяться между собой не менее чем тремя продольными полосами. Расстояние от лестницы до дуги должно

одной стороны на кожух печи, а с другой – на подвески, закрепленные к конструкциям колошниковой площадки.

§ 3.6. Колошниковое устройство доменной печи

Колошниковое устройство представляет собой многоэтажную пространственную этажерку, так называемый копер, предназначенный для поддержания комплекса механизмов, балансиров конусного загрузочного устройства, а также монтажной балки, монорельсов, площадок и других приспособлений для монтажа, ремонта и обслуживания оборудования (рис. 3.20).

Общий вид смонтированных рам копра показан на рис. 3.21.

Основой колошниково копра (рис. 3.22) являются четыре колонны, входящие в состав этажерки, объединенные системой горизонтальных площадок и связевых систем. Две вертикальные плоскости этажерки решены в виде рам – передняя (со стороны монтажной балки) и задняя (со стороны наклонного моста), две другие боковые продольные – в виде связевых вертикальных ферм.

Колонны копра опираются через колошниковую площадку на колонны шахты либо на опорную балку колошниковой площадки и далее – на колонны шахты или четырехколонника. На кожух печи во время работы опираются только загрузочное устройство и газопроводы грязного газа.

При конусном загрузочном устройстве копер должен обладать достаточной жесткостью в горизонтальной плоскости для обеспечения его надежной работы и плотного закрытия конусов, что достигается установкой максимального количества связей – в передней раме устраиваются даже временные съемные связи, позволяющие при их демонтаже производить смену загрузочного устройства с помощью монтажной балки. На задней раме, сквозь которую проходит головная часть наклонного моста, за его пределами также устанавливают связи. В двух других боковых плоскостях размещаются решетчатые стержневые фермы, обеспечивающие общую устойчивость сооружения.

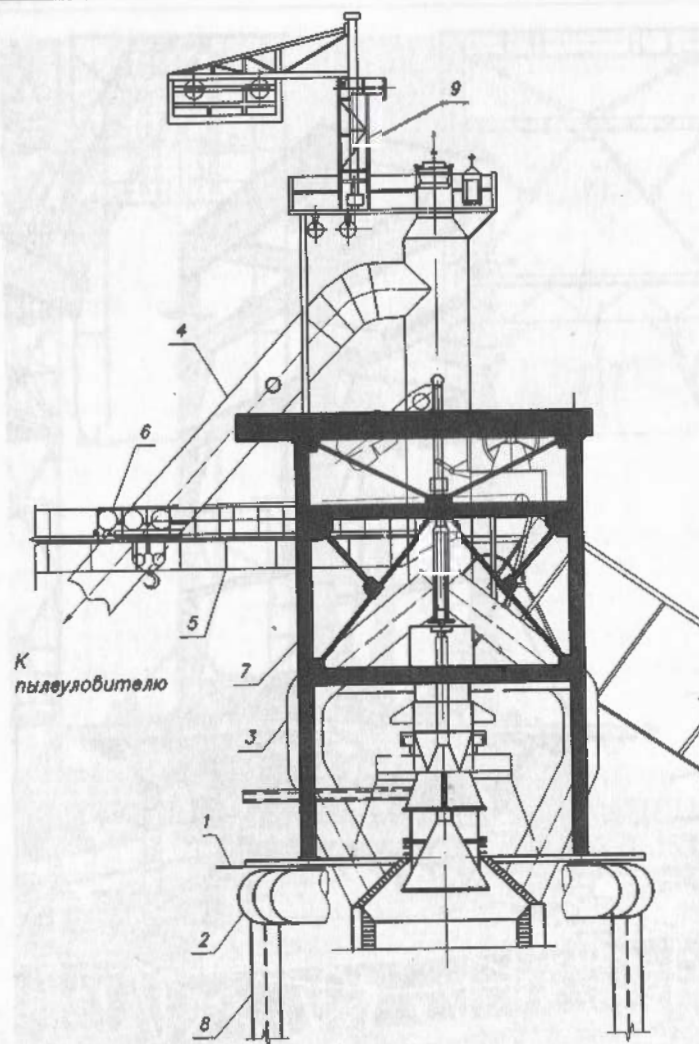


Рис. 3.20. Колошниковое устройство доменной печи:
1 – колошниковая площадка; 2 – опорная кольцевая балка;
3 – вертикальные газопроводы грязного газа; 4 – нисходящий газопровод
грязного газа; 5 – монтажная балка; 6 – тележка монтажной балки;
7 – рамы колошниково копра; 8 – колонны шахты или
четырёхколонника; 9 – консольно-поворотный кран

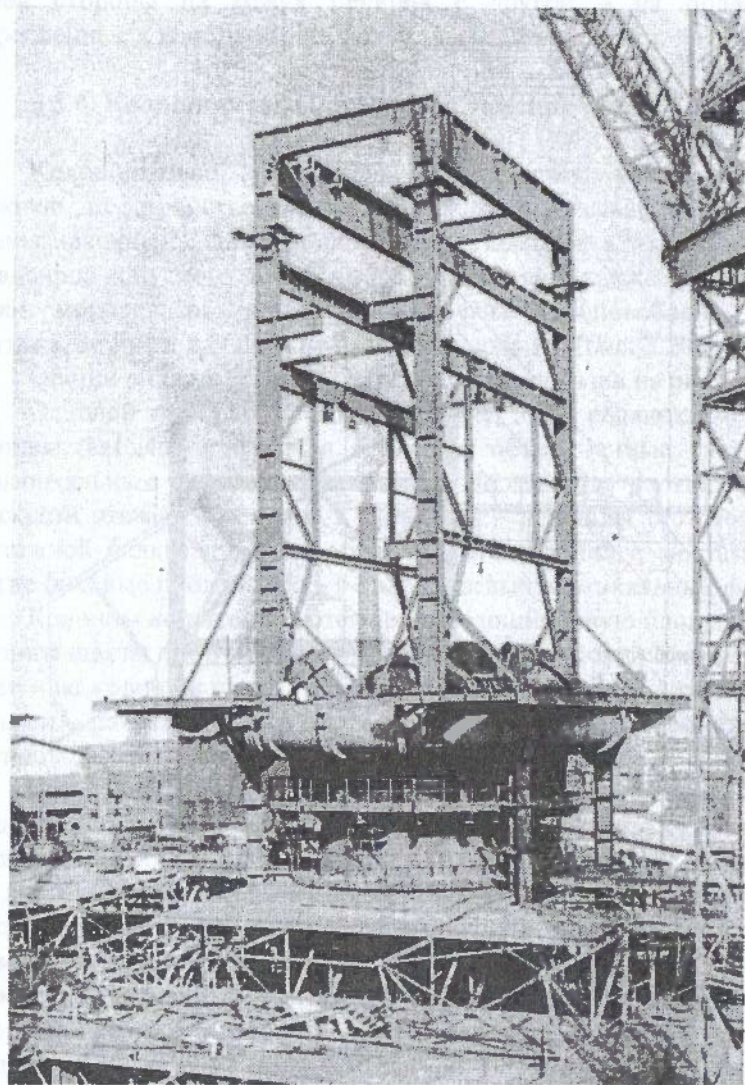


Рис. 3.21. Общий вид смонтированных рам колашниковой копра

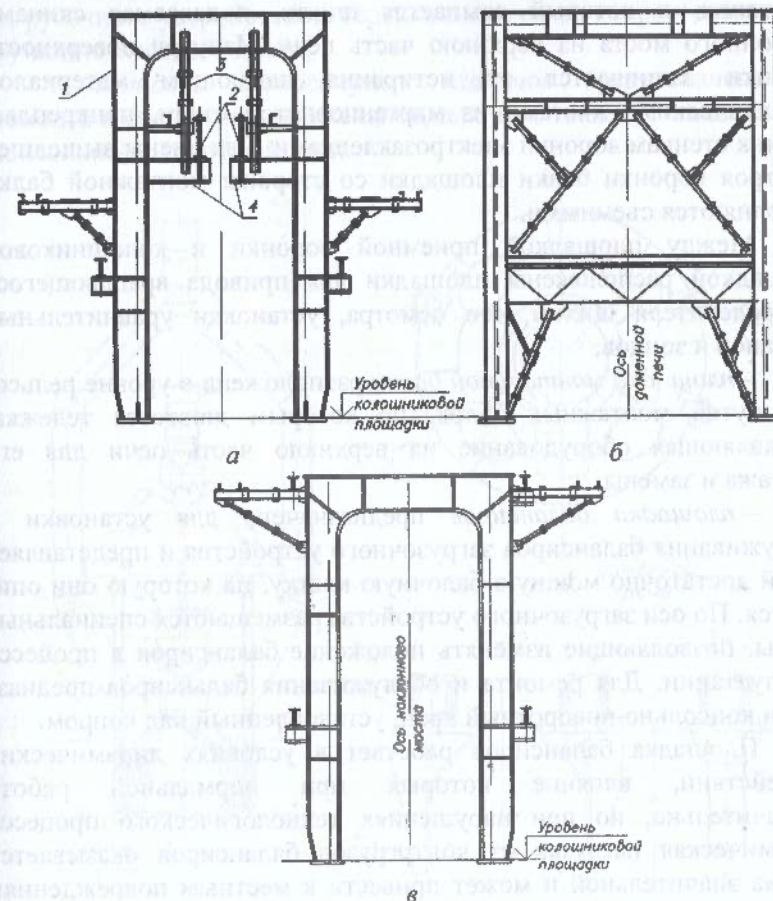


Рис. 3.22. Конструктивная схема рам колашниковой копра:

а – передняя рама; *б* – боковая продольная связевая рама;
в – задняя рама; 1 – колонны рам копра; 2 – балки монтажной тележки;
 3 – подвески консолей для опирания монтажной балки; 4 – консоли
 для опирания монтажных балок

В состав колашниковой копра при установке конусного загрузочного устройства входят четыре основные технологические площадки:

– площадка приемной воронки предназначена для установки на ней приемной воронки в виде бункера достаточно сложного

очертания, в который сыпается шихта, подаваемая скипами наклонного моста на верхнюю часть печи. Изнутри поверхность воронки защищается от истирания падающим материалом металлическими листами из марганцовистой стали, прикрепляемыми к стенкам воронки электрозаклепками. Для смены вышедшей из строя воронки балки площадки со стороны монтажной балки выполняются съемными.

Между площадкой приемной воронки и колошниковой площадкой расположены площадки для привода вращающегося распределителя шихты, его осмотра, установки уравнильных клапанов и зондов;

— *площадка монтажной балки* расположена в уровне рельсовых путей монтажных балок, по которым движется тележка, доставляющая оборудование на верхнюю часть печи для его монтажа и замены;

— *площадка балансиров* предназначена для установки и обслуживания балансиров загрузочного устройства и представляет собой достаточно мощную балочную клетку, на которую они опираются. По оси загрузочного устройства размещаются специальные упоры, позволяющие изменять положение балансиров в процессе эксплуатации. Для ремонта и обслуживания балансиров предназначен консольно-поворотный кран, установленный над копром.

Площадка балансиров работает в условиях динамических воздействий, влияние которых при нормальной работе незначительно, но при нарушениях технологического процесса динамическая нагрузка от контргрузов балансиров оказывается весьма значительной и может привести к местным повреждениям конструкций. Ситуация связана с конструктивной схемой работы конусов. При схеме со свободным их опусканием может возникнуть задержка опускания конуса из-за неожиданного повышения давления внутри печи по причине механического «прилипания» конуса к чаше и другим причинам, в результате чего появляется слабина в тросе, а затем внезапное падение конуса. При схеме с принудительным опусканием конус может на первом этапе не закрыться, в нем образуется слабина, а затем происходит его резкое опускание. Связи, располагаемые в плоскости площадки, передают горизонтальные силы от тросов управления конусами

загрузочного устройства на вертикальные связи копра и выполняют функцию жесткого диска;

— *площадка атмосферных клапанов* предназначена для ремонта и обслуживания клапанов, для чего также устанавливается консольно-поворотный кран.

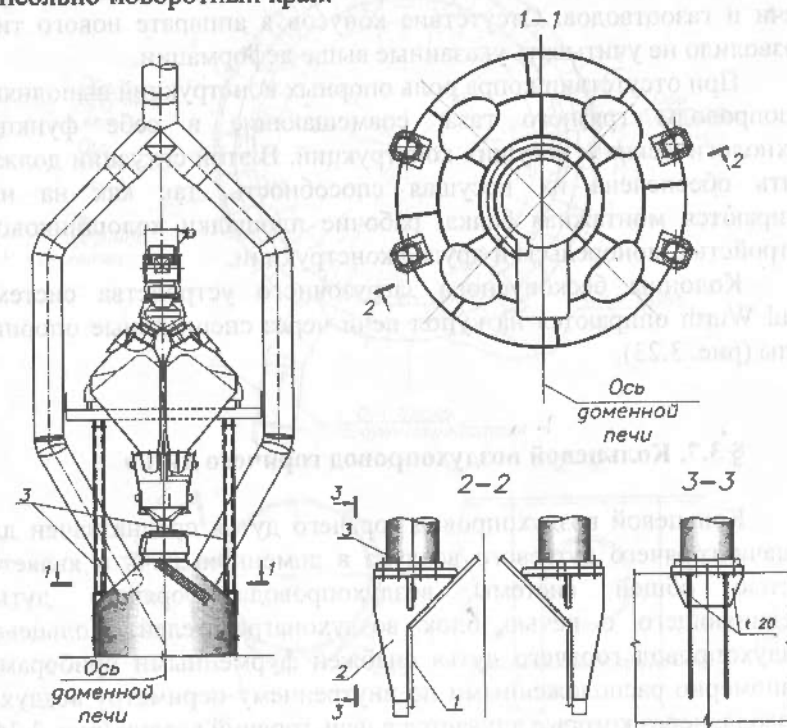


Рис. 3.23. Конструктивная схема опирания загрузочного устройства системы Paul Wurth:

1 — кожух колошника печи; 2 — опорные ребра; 3 — опорная колонна загрузочного устройства

Применение бесконусного загрузочного устройства системы Paul Wurth, а также загрузочных устройств роторного типа не требует их опирания на колошниковый копер, в связи с чем не было необходимости его сооружения в составе колошникового устройства. Такое решение стало возможным в связи с отсутствием

жесткого требования строгой центровки подвешенного на длинной штанге самого конусного аппарата, что было необходимым условием плотного закрытия конусов. Это обеспечивалось наличием жесткого копра, в котором положение штанги сохранялось неизменным при термических деформациях кожуха печи и газоотводов. Отсутствие конусов в аппарате нового типа позволило не учитывать указанные выше деформации.

При отсутствии копра роль опорных конструкций выполняют газопроводы грязного газа, совмещающие в себе функции технологических и несущих конструкций. В этой ситуации должна быть обеспечена их несущая способность, так как на них опираются монтажная балка, рабочие площадки колошниковоустройства, монорельсы и другие конструкции.

Колонны бесконусного загрузочного устройства системы Paul Wurth опираются на купол печи через специальные опорные узлы (рис. 3.23).

§ 3.7. Кольцевой воздухопровод горячего дутья

Кольцевой воздухопровод горячего дутья предназначен для подачи горячего дутьевого воздуха в доменную печь и является частью общей системы воздухопровода горячего дутья, соединяющего с печью блок воздухонагревателей. Кольцевой воздухопровод горячего дутья снабжен фурменными приборами, равномерно расположенными по внутреннему периметру воздухопровода, через которые вдувается в печь горячий воздух (рис. 3.24). Количество фурменных приборов может быть разным и зависит от объемов доменной печи. В среднем их число колеблется от 16 – 18 для малых печей до 28 – 42 для печей больших объемов.

Кольцевая труба имеет полигональное очертание и собирается из отдельных участков, количество которых соответствует числу фурменных приборов. Между собой участки соединяются встык с помощью сварки. Длина каждого участка должна обеспечить расстояние от шва крепления фурменного прибора до стыкового шва не менее пяти толщин стенки, которое принимается в пределах 200 – 300 мм. Для присоединения фурменных приборов в середине

каждой части со стороны печи ввариваются патрубки, выступающие за границы кольца на 300 – 350 мм.

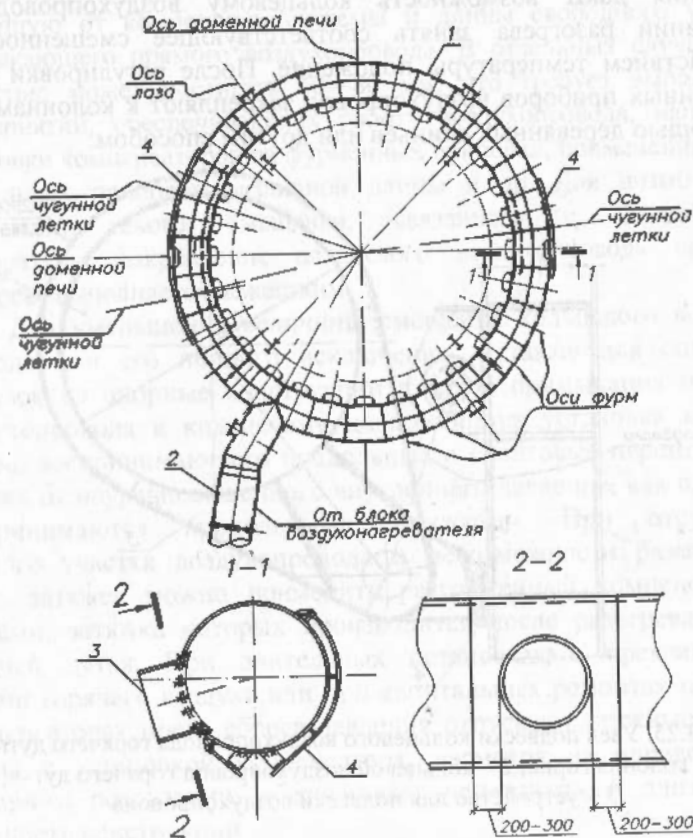


Рис. 3.24. Кольцевой воздухопровод горячего дутья:
1, 2 – кольцевой и прямой воздухопроводы горячего дутья соответственно; 3 – патрубок крепления фурменного прибора; 4 – защитный экран от теплового излучения

Участки воздухопровода, расположенные над чугунными и шлаковыми желобами, защищаются от термического излучения экранами из листового металла с образованием воздушного зазора.

Наиболее распространенным способом опирания кольцевого воздухопровода является шарнирная подвеска его к колоннам

горна или четырехколонника, позволяющая воздухопроводу смещаться в радиальном направлении (рис. 3.25). Такие узлы опирания дают возможность кольцевому воздухопроводу по окончании разогрева занять соответствующее смещенное под воздействием температуры положение. После регулировки сопел фурменных приборов воздухопровод закрепляют к колоннам печи с помощью деревянных клиньев или другим способом.

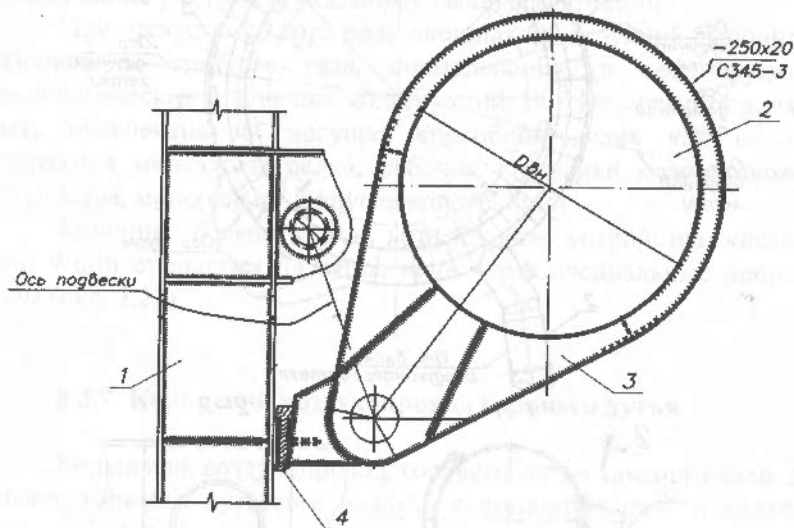


Рис. 3.25. Узел подвески кольцевого воздухопровода горячего дутья:

1 – колонна горна; 2 – кольцевой воздухопровод горячего дутья;

3 – устройство для подвески воздухопровода

Существуют и другие способы опирания воздухопровода – через скользящие опоры на консоли к колоннам горна, на хордовые балки четырехколонника или на круглых литейных дворах через катковые опоры на специальную эстакаду, расположенную вокруг печи. Несмотря на свободу радиальных перемещений кольцевого воздухопровода в период разогрева, известны случаи разрушения при эксплуатации узла его сопряжения с прямым воздухопроводом, выход из строя фурменных приборов и т.п.

Кольцевая труба, испытывая нагрузку от продольных перемещений прямого воздухопровода горячего дутья при его

нагреве, смещается не только в радиальном направлении, но и в противоположную от прямого воздухопровода сторону на величину, зависящую от компоновки системы и длины свободного участка примыкающего прямого воздухопровода. В отдельных случаях это смещение может достигать 40–80 мм, что требует выполнения мероприятий, обеспечивающих работу воздухопровода, например, установки компенсаторов на фурменных приборах, применения сопел фурменных приборов различной длины и др. Для возможности реализации такого смещения, связанного с воздействием температуры, закрепление кольцевого воздухопровода при его разогреве выполняется нежестким.

Для уменьшения величины смещения кольцевого воздухопровода или его полного исключения, а также для снижения нагрузок на опорные конструкции в месте примыкания прямого воздухопровода к кольцевому целесообразна установка компенсатора, воспринимающего продольные и сдвиговые перемещения. Усилия от неуравновешенного внутреннего давления, как правило, воспринимаются продольными затяжками. При отсутствии прямого участка воздухопровода и невозможности размещения таких затяжек можно применить разгруженный компенсатор с болтами, затяжка которых производится после разогрева, перед подачей дутья. При длительных остановках с прекращением подачи горячего воздуха или при капитальных ремонтах на таких компенсаторах после сброса давления отпускают стяжные болты. Схема с установкой компенсатора, несмотря на определенные трудности реализации, обеспечивает надежность и длительную прочность конструкций.

Внутри воздухопровод футеруется несколькими слоями огнеупорной кладки, а ее температурные деформации компенсируются слоем асбестового картона толщиной 30–40 мм, расположенного между металлом и футеровкой.

Достаточно распространено крепление к нижней части воздухопровода монорельсов для обслуживания и замены фурменных приборов.

ГЛАВА 4 БЛОК ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

§ 4.1. Эволюция конструктивных форм

Воздух, вдуваемый в современную доменную печь для технологического процесса горения топлива, предварительно нагревается до $1200 - 1450^{\circ}\text{C}$ в специальных аппаратах – воздухонагревателях. Для каждой доменной печи сооружается блок воздухонагревателей, состоящий из 3 – 4 аппаратов.

На рис. 4.1 показана типичная компоновка блока воздухонагревателей, а на рис. 4.2 – блок воздухонагревателей в стадии монтажа.

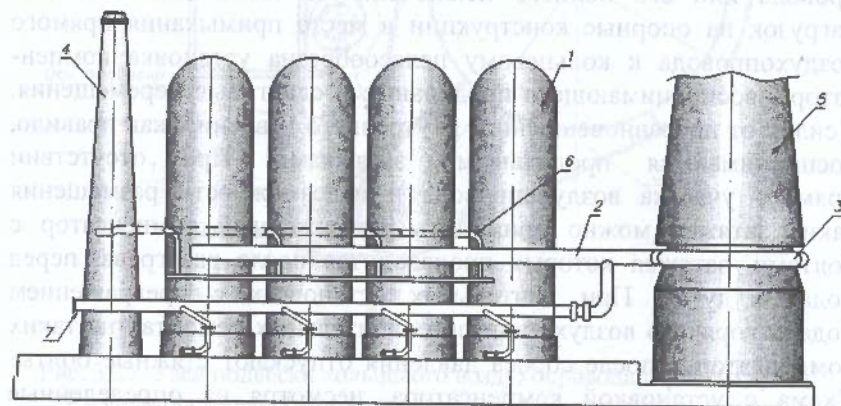


Рис. 4.1. Компоновка блока воздухонагревателей:

1 – воздухонагреватель; 2, 3 – прямой и кольцевой воздухопроводы горячего дутья соответственно; 4 – дымовая труба; 5 – доменная печь; 6 – газопровод чистого газа; 7 – воздухопровод холодного дутья

Воздухонагреватель доменной печи – это аппарат регенеративного типа, который в процессе развития и совершенствования конструкций доменной печи также претерпевал изменения. Первоначально воздух нагревался с помощью системы труб, нагреваемых снаружи. Температура воздуха при этом не превышала $400 - 500^{\circ}\text{C}$. В 50-х годах XIX века был сооружен первый воздухонагреватель регенеративного типа в виде кирпичного цилиндрического кожуха, внутри которого по периферии располагалась

огнеупорная кладка. Внутреннее пространство заполнялось специальными огнеупорными блоками, так называемой насадкой, расположенными над колосниковой решеткой, где происходило горение твердого топлива для нагрева блоков.

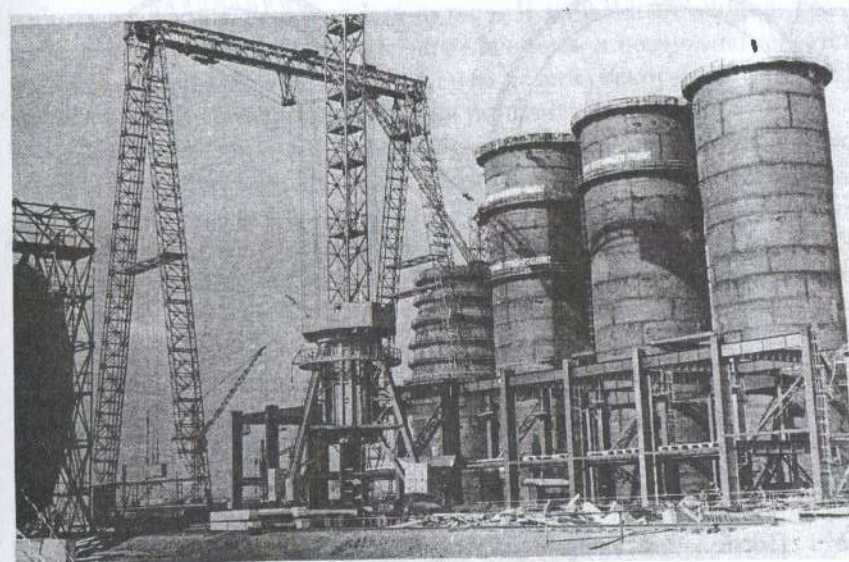


Рис. 4.2. Блок воздухонагревателей в стадии монтажа

В дальнейшем для нагрева насадки колосниковую топку заменили газовой в виде отдельной камеры различной конфигурации, расположенной несимметрично в боковой части внутреннего объема агрегата (рис. 4.3), где происходило горение газа. Эта схема воздухонагревателя стала классической и, претерпев ряд усовершенствований, применяется до сих пор.

Воздухонагреватель работает циклично. Цикл начинается с нагрева насадки горячими газами при закрытом отсечном клапане на воздухопроводе горячего дутья. В период нагрева в газовую горелку подается газ, а из воздухопровода воздуха горения воздух, необходимые для горения. Образующиеся в результате горячие продукты поднимаются вверх по камере горения, проходят подкупольное пространство и под действием тяги дымовой трубы устремляются вниз по каналам насадки, нагревая их. Охлажденные продукты горения (с максимальной температурой 400°C) выходят

из воздухонагревателя через дымовые штуцера обычно в подземный дымовой бор или в наружный отдельный дымопровод, а затем через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу.

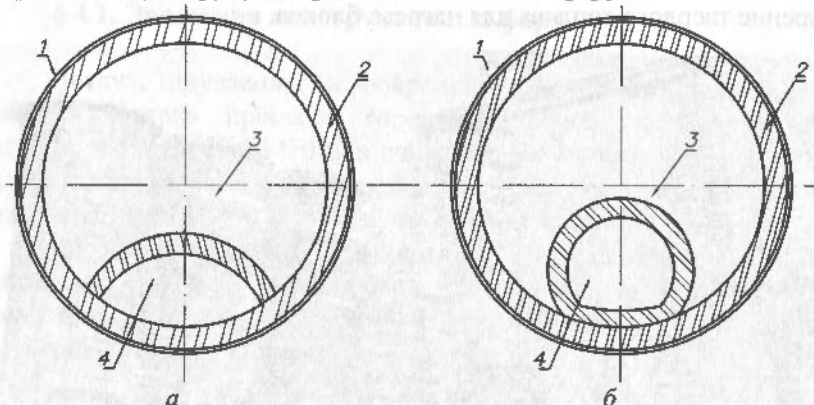


Рис. 4.3. Формы камеры горения:

а – чечевицкая; б – кольцевая; 1 – кожух воздухонагревателя; 2 – футеровка стен воздухонагревателя; 3, 4 – камеры насадки и горения соответственно

После достижения куполом заданной температуры и окончания нагрева воздухонагреватель ставится «на дутье». При этом отключается горелка, закрываются дымовые клапаны и задвижки газопровода чистого газа и воздуха горения. Отсеинной клапан на воздухопроводе горячего дутья и клапан холодного дутья открываются. Холодный воздух под давлением по воздухопроводу холодного дутья подается через штуцер холодного дутья в поднасадочное устройство и дальше в каналы нагретой насадки. Поднимаясь вверх по ее каналам, он нагревается, проходитнаиболее нагретую зону – подкупольное пространство, где изменяет направление движения, опускается по камере горения и выходит через штуцер горячего дутья в прямой воздухопровод и далее через кольцевой – в доменную печь.

Блок воздухонагревателей, как правило, состоит из трех или четырех аппаратов, работающих в последовательном или попарно-параллельном режиме. При последовательном режиме горячий воздух проходит через один аппарат, в то время как остальные аппараты стоят «на нагреве», при попарно-параллельном – два

воздухонагревателя нагреваются, а через два других воздух подается в доменную печь.

Недостатком регенеративных воздухонагревателей является непостоянство температуры дутья в начальный и конечный периоды работы воздухонагревателя «на дутье». В начальный период, сразу же после нагрева, насадка еще не охладилась и воздух нагревается до более высокой температуры, чем через некоторый интервал времени, когда температура насадки понизилась.

По основному компоновочному признаку – расположению камеры горения – такой аппарат называется *воздухонагревателем с внутренней камерой горения*. Использование для первых воздухонагревателей относительно низкой температуры (до 700–800°C) вдуваемого в доменную печь воздуха и невысокое его давление (до 0,08–0,1 МПа) требовали особых конструктивных решений по обеспечению прочности агрегата.

Боковое расположение камеры горения, создающее неосесимметричное напряженное состояние, при таких невысоких параметрах работы не приводило к значительному уровню напряжений в футеровке и в кожухе, что обеспечивало непрерывность подачи горячего воздуха, а также достаточную надежность и долговечность агрегата. Вертикальный рост стен совместно с кладкой купола был небольшим и не превышал имеющийся зазор между кладкой и кожухом купола.

Такая компоновка получила широкое распространение при строительстве как низкотемпературных воздухонагревателей, обеспечивающих нагрев воздуха до 1050–1200°C, так и высокотемпературных, нагревающих воздух до 1400–1450°C.

Основное конструктивное отличие низкотемпературных воздухонагревателей от высокотемпературных состоит в составе, толщине и схеме опирания огнеупорной кладки различных зон воздухонагревателя.

Интенсификация технологических процессов привела к значительному увеличению параметров работы воздухонагревателей – повышению давления воздуха до 0,25–0,5 МПа и температуры под куполом до 1250–1450°C, что вызвало необходимость увеличения толщины кладки в высокотемпературной зоне. При этом проявились негативные качества совмещения кладки купола с кольцевыми периферийными стенами, усугубилось влияние неосесимметричного

расположения камеры горения и появилась потребность в пересмотре ряда технических решений.

Для высокотемпературных воздухонагревателей в связи с ростом температурных перемещений величина зазора между кладкой купола и кожухом оказалась недостаточной. С целью уменьшения вертикальных перемещений кладка купола была отделена от периферийной кладки и расположена на отдельной кольцевой балке. Тем самым массивы кладки были разделены, перемещения кладки купола стали относительно невелики и не превышали величину зазора, а периферийная кладка получила возможность независимого вертикального роста.

Были также применены новые материалы для футеровки, деформационных слоев, изменены конструкции футеровки, использованы новые узлы крепления кожуха к фундаменту, а также новые конструктивные формы аппарата в целом. Была разработана конструкция с увеличенной в районе высокотемпературной зоны толщиной футеровки, для которой применяли высокообоженные динасовые огнеупоры, позволяющие довести температуру кладки купола до 1500°C . Для возможности увеличения толщины футеровки диаметр кожуха в этой зоне был увеличен и конструкция кожуха, соответственно, изменена.

Негативное влияние внутренней несимметрично расположенной боковой камеры горения в условиях роста давления и температуры нагреваемого воздуха, а также соответствующий подъем уровня напряженно-деформированного состояния кожуха и футеровки воздухонагревателей привели к разработке *воздухонагревателя с вынесенной камерой горения*, отличающегося более стабильной работой.

Выделение камеры горения из общего кожуха позволило получить отдельные сосуды с осесимметричным воздействием температурного поля и равномерным распором футеровки. Это в значительной степени улучшило общее напряженно-деформированное состояние конструкций.

Дальнейшие разработки позволили создать так называемый *бесшахтный воздухонагреватель* принципиально новой конструктивной формы, в котором вертикальная камера горения ликвидирована, а горение газа происходит в горизонтальной кольцевой форкамере, расположенной в районе купола воздухонагревателя.

Разработчик воздухонагревателя такого типа – предприятие ЗАО «Калугин» (г. Екатеринбург, Россия).

Интенсификация технологических процессов привела к значительному влиянию циклического режима работы агрегата, связанного с колебаниями внутреннего давления от 0 до 0,5 МПа. При среднем количестве 6×10^4 циклов за расчетное время эксплуатации возникла опасность появления повреждений в результате малоциклового усталости, что потребовало дополнительного расчета конструкций с учетом малоциклового усталости кожухов.

Как известно, повышение температуры в воздухонагревателях приводит к выделению из воздуха азота и образованию его окислов, что при высоком уровне напряжений активизирует явление коррозионного растрескивания металла кожуха вследствие межкристаллитной коррозии. Наблюдается также щелочное растрескивание, вызывающее разрушение металла под воздействием щелочей.

Известны различные способы защиты внутренней поверхности кожуха воздухонагревателя от воздействий агрессивных сред или исключения условий для возможного образования кислот или выделения щелочей, например, устройство сплошной защиты из листовой фольги, алитирование – металлизация внутренней поверхности кожуха алюминием, нанесение двух слоев покрытия кремнийорганической антикоррозионной эмали типа КО-814 по ГОСТ 11066-74.

Возможно также наружное утепление кожуха с целью повышения его температуры и исключения условий для появления точки «росы» и связанным с ней образованием окислов азота.

В последнее время для этих целей стали применять более эффективные современные материалы, например антикоррозионное покрытие в виде двух слоев жаростойкой силиконовой краски с алюминиевым пигментированием Темал 600,006 7679 финской фирмы «Tikkurila», которая наносится без грунтовки. Однако, в связи с незначительными сроками эксплуатации защитных устройств затруднительно сделать вывод о каких-либо предпочтениях.

§ 4.2. Обеспечение надежности кожухов воздухонагревателей

Одним из основных критериев, определяющих эффективность и качество конструктивной формы сооружений, является надежность, обеспечивающая комплекс требований – заданные уровни безотказности, живучести, долговечности и ремонтпригодности. Эти критерии играют важнейшую роль при проектировании. Для воздухонагревателей основным условием долговечности является обеспечение эксплуатационной длительной надежности кожуха. Его сложное напряженное состояние связано с условиями работы, определяемыми следующими главными факторами:

- циклически действующее давление воздушной среды;
- усилия от примыкающих газо-воздухопроводов;
- термические и механические воздействия расширяющейся футеровки;
- общее и локальное воздействия высоких температур;
- возможное возникновение щелочной или межкристаллитной коррозии.

Каждый из этих факторов независимо от общего напряженного состояния может привести к неисправности конструкции, а в некоторых случаях – к отказу и аварийной ситуации.

Кожух воздухонагревателя является комплексной конструкцией, представляющей собой многослойную оболочку с неоднородными слоями – «кожух – компенсационный слой – футеровка». Каждый из них выполняет свою функцию, иногда неоднозначную:

- футеровка защищает кожух от воздействия высоких температур и одновременно создает одну из основных нагрузок на него, вызванную ее термическим расширением;
- компенсационный слой позволяет радиальное и вертикальное расширение футеровки, дает ей необходимую свободу, снижая воздействие на кожух;
- кожух обеспечивает герметичность и воспринимает все виды нагрузок, основными из которых являются избыточное внутреннее давление и термическое расширение футеровки, а также создает в ней сжимающие усилия, необходимые для предотвращения преждевременного растрескивания.

Отсутствие обоснованной статистики отказов не позволяет определить достаточно четкие критерии обеспечения надежности кожуха и футеровки, что осложняется особенностями конструктивной формы, главная из которых – это невозможность резервирования несущих элементов.

В связи с этим, весьма эффективным с точки зрения обеспечения элементной надежности оказывается подход, включающий мероприятия по ее повышению для отдельных элементов и деталей конструкций. С учетом постоянной интенсификации технологических процессов и повышения эксплуатационных параметров этот подход включает следующие основные направления:

- совершенствование конструкции футеровки с целью обеспечения минимальных воздействий на кожух, максимальная его термической защиты и обеспечения собственной прочности;
- применение для кожуха листового проката из высокопрочной стали, обладающей высокой прочностью, пластичностью и низкой склонностью к охрупчиванию;
- установка компенсаторов на примыкающих к воздухонагревателям газо-воздухопроводах, особенно на воздухопроводе горячего дутья;
- проведение систематических инструментальных наблюдений и контроля напряженно-деформированного состояния кожуха, а также связанного с их результатами управления технологическим процессом.

В значительной степени на напряженное состояние кожуха влияют его толщина, физико-механические качества футеровки, величина и материалы компенсационных зазоров.

Прочность кожуха также зависит от температуры наружного воздуха, так как возникновению трещин может предшествовать резкое и значительное понижение температуры наружного воздуха до минус 25 – 35°C.

§ 4.3. Воздухонагреватель с внутренней камерой горения

Конструктивно воздухонагреватель с внутренней камерой горения решен в виде цилиндрического сосуда диаметром 8–10 м со сферическим куполом и плоским днищем. Его высота определяется необходимым объемом насадки и составляет 30 – 40 м.

На рис. 4.4 показано принципиальное техническое решение низкотемпературного воздухонагревателя, предназначенного для нагрева воздуха под куполом до $1000 - 1200^{\circ}\text{C}$. Как уже отмечалось, в связи с относительно невысокой температурой стены по всей его высоте имеют постоянную толщину, а кожух — постоянный диаметр.

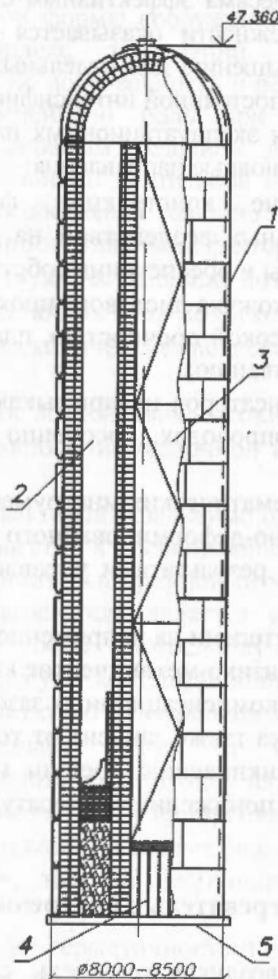


Рис. 4.4. Низкотемпературный воздухонагреватель:

- 1 — кожух воздухонагревателя; 2 — камера горения; 3 — камера насадки;
4 — поднасадочное устройство для опирания насадки; 5 — днище

Во внутреннем пространстве воздухонагревателя расположена вертикальная стенка, не доходящая до верха и разделяющая объем на две части — камеру горения и камеру насадки. Вверху расположено подкупольное пространство, соединяющее обе части воздухонагревателя в единый объем.

В камере горения, занимающей 15–20% общей площади поперечного сечения воздухонагревателя и имеющей различные формы собственного поперечного сечения, происходит образование газозвушной смеси и ее сгорание.

Основной объем воздухонагревателя — камера насадки — заполнен огнеупорными блоками, в которых для увеличения поверхности нагрева расположены отверстия, образующие в массиве насадки сплошные вертикальные каналы сечением, например, 45×45 мм, сквозь которые снизу вверх проходит нагретый воздух.

Назначение насадки — аккумуляция тепла во время нагрева воздухонагревателя и отдача его нагреваемому воздуху.

Блоки насадки в нижней части воздухонагревателя опираются на поднасадочное устройство в виде металлической решетки, расположенной на чугунных колоннах, установленных на днище воздухонагревателя.

Изнутри кожух защищен футеровкой — многослойной огнеупорной стеной, предохраняющей его от термических воздействий и уменьшающей теплопотери. Футеровка включает в себя огнеупорный кирпич различных марок, компенсационные слои из деформативных и выгорающих при разогреве воздухонагревателей материалов. С целью улучшения деформативности футеровки при нагреве в 80-е годы XX века для компенсационного слоя были разработаны упругие огнестойкие муллитокремнеземистые плиты, обладающие высоким коэффициентом деформативности под нагрузкой в условиях термических воздействий. Применение этих плит взамен ранее используемой трепельной крошки или засыпки из смеси асбеста и гранулированного шлака в значительной степени улучшило напряженно-деформированное состояние кожуха воздухонагревателя.

Между стенами и кожухом может выполняться набрызг из торкрет-бетона или укладываться трепельный (теплоизоляцион-

ный, имеющий низкий коэффициент теплопроводности) кирпич толщиной 65 мм.

Стены камеры горения выкладываются в два слоя без перевязки: наружный толщиной 230 мм из шамотного кирпича и внутренний – толщиной 345 мм из высокоглиноземистого или dinasового кирпича. Купол выкладывается из одного ряда высокоглиноземистого кирпича толщиной 450 мм, одного ряда легковесного шамотного кирпича толщиной 113 мм и одного ряда трепельного кирпича толщиной 123 мм. Между кожухом купола и кладкой оставляется зазор в 300–500 мм для компенсации температурного роста кладки.

Высокотемпературный воздухонагреватель, предназначенный для нагрева воздуха до 1400°C , имеет конструктивные особенности (рис. 4.5). Основное отличие состоит в автономном опирании стены кладки купола, доведенной до низа высокотемпературной зоны агрегата и, тем самым, увеличивающей толщину стены в этой зоне. Для размещения дополнительных слоев огнеупорной кладки, отделенных от основной кольцевой кладки и способных при нагреве независимо перемещаться вверх, не вызывая ее повреждения, диаметр кожуха в верхней его части, соответственно, больше чем в нижней.

Огнеупорная кладка купола опирается на специальную опорную кольцевую балку, входящую в состав кожуха и соединяющую его нижнюю и верхнюю части. Радиальное расширение стен здесь компенсируется устройством компенсационных слоев из муллитокремнеземистых матов и установкой в вертикальных швах кладки деревянных прокладок, выгорающих по мере разогрева кладки, позволяя ей расширяться в кольцевом направлении.

Опорная кольцевая балка, как правило, имеет коробчатое прямоугольное поперечное сечение (рис. 4.6) и состоит из двух кольцевых ребер-шпангоутов и двух вертикальных стенок, для которых использованы части кожуха. В наружной вертикальной стенке выполняются проемы для сварки и охлаждения балок. Эффект охлаждения балок усиливается устройством дополнительной вентиляционной системы, работающей за счет естественной вытяжки.

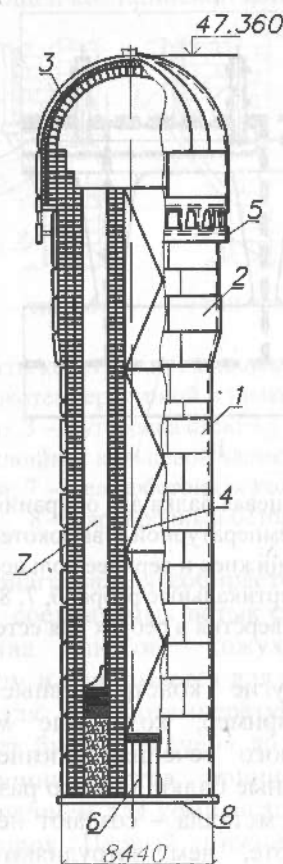


Рис. 4.5. Высокотемпературный воздухонагреватель:

1, 2 – кожух в низкотемпературной и высокотемпературной зонах соответственно; 3 – кладка купола; 4 – блоки насадки; 5 – кольцевая балка для опирания кладки купола; 6 – поднасадочное устройство для опирания блоков насадки; 7 – камера горения; 8 – днище

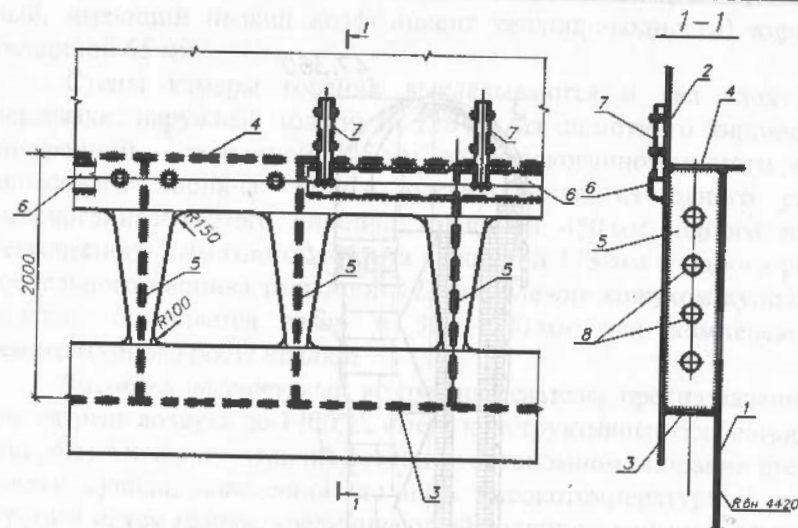


Рис. 4.6. Опорная кольцевая балка для опирания футеровки купола:
1, 2 – кожух в низкотемпературной и высокотемпературной зонах соответственно; 3, 4 – нижнее и верхнее кольцевое ребро-шпангоут соответственно; 5 – вертикальные ребра; 6, 7, 8 – кольцевая труба, вытяжные патрубки и отверстия в ребрах для естественной вентиляции

Известны и другие конструктивные решения опорных кольцевых балок, например, кольцевые металлические балки треугольного поперечного сечения, заполненные бетоном, или полностью железобетонные балки. Однако разные упругие свойства материалов – бетона и металла – создают неопределенность в их пространственной работе, чем затрудняют применение таких конструкций.

На рис. 4.7 показаны основные типы применяемых опорных кольцевых балок. Балки типов «а» и «б» решены металлическими прямоугольного и треугольного поперечного сечения. Балка типа «в» – железобетонная кольцевая, типа «г» решена в виде замкнутой треугольной металлической кольцевой балки, заполненной жаропрочным бетоном.

Балки каждого типа имеют свои недостатки – в треугольной балке примыкание наклонного листа к кожуху в направлении поперек проката, в сталежелезобетонных балках совместная работа

материалов разномодульных характеристик и т.п. Поэтому выбор типа балки связан с общей компоновкой конструкции.

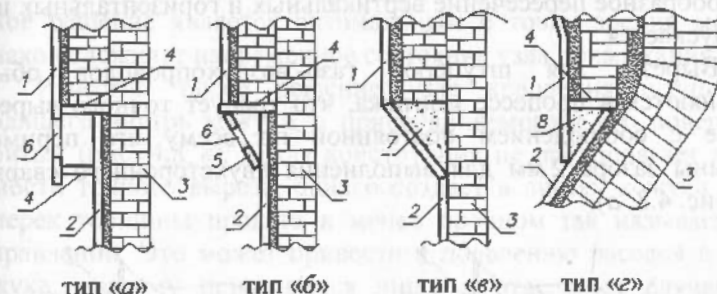


Рис. 4.7. Варианты конструкций кольцевых опорных балок:
1, 2 – кожух в высокотемпературной и низкотемпературной зонах соответственно; 3 – футеровка стен; 4 – кольцевое ребро-шпангоут; 5 – наклонный кольцевой элемент; 6 – отверстия для вентиляции; 7 – железобетонная кольцевая балка; 8 – жаропрочный бетон

Кожух воздухонагревателя собирается из отдельных листов различной толщины, соединяемых встык с расположением стыков вразбежку. Толщина листов кожуха воздухонагревателя определяется расчетом и принимается для низкотемпературного не менее 20–25 мм, для высокотемпературного толщина листов отдельных зон может быть увеличена до 30–40 мм. В пределах одного пояса толщина листов принимается одинаковой, с возможным ее увеличением для компенсации ослабления в местах расположения штуцеров. Первый, нижний пояс, сопрягаемый с днищем, также выполняется увеличенной толщины до 32–36 мм для восприятия усилий, связанных с краевым эффектом, а также в связи с ослаблением этого района отверстиями для патрубков воздухопровода холодного дутья и дымовых штуцеров.

Толщина листов днища принимается не менее 0,75 толщины листов первого пояса, а листов штуцеров – в зависимости от толщины листа основного кожуха, с которым он соединен, исходя из необходимого соотношения толщин листов при их сварке с разделкой кромок.

Вертикальные стыки листов располагаются таким образом чтобы смежные зоны концентрации напряжений не накладывались

друг на друга и расстояние между сварными вертикальными швами смежных поясов были не менее $10t$, где t — толщина листа. Крестообразное пересечение вертикальных и горизонтальных швов не допускается.

Вырезы для штуцеров газо-воздухопроводов обычно выполняются в процессе монтажа, что требует точного выреза в кожухе с соблюдением постоянной по всему его периметру величины зазора 2 мм для выполнения двухстороннего сварного шва (рис. 4.8, а).

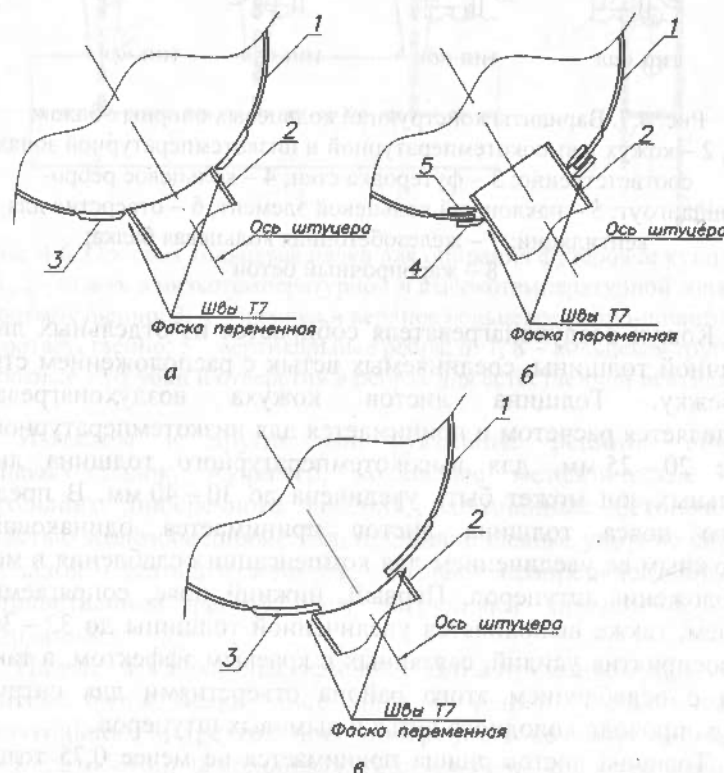


Рис. 4.8. Узел сопряжения кожуха со штуцером:

- а — без воротника; б — с воротниками; в — с наружным примыканием штуцера впритык; 1 — кожух воздухонагревателя; 2 — штуцер; 3 — утолщенная вставка; 4, 5 — наружный и внутренний воротники соответственно

При невозможности обеспечения точной геометрии выреза по его контуру устанавливают усиливающие воротники (рис. 4.8, б). Такое решение является оптимальным с точки зрения монтажа, однако осложняет напряженное состояние узла примыкания.

Известно также решение узла крепления штуцера, не входящего внутрь кожуха, а присоединяемого к его поверхности впритык (рис. 4.8, в). Такая конструкция не предполагает необходимости точного выреза, однако создает в листах кожуха усилия поперек толщины проката в менее прочном так называемом Z-направлении. Это может привести к появлению расслоя в листах кожуха, поэтому применяется лишь в отдельных случаях при невысоком уровне напряжений в зоне примыкания. С целью уменьшения напряжений в этой зоне целесообразно увеличение толщины пояса штуцера, примыкающего к кожуху.

Во всех случаях длина выступающей за кожух части штуцера должна обеспечить доступ для приварки банджа в узле примыкания трубопровода.

Днище воздухонагревателя выполняется толщиной 25–30 мм и состоит из отдельных листов, габаритных для транспортировки, соединяемых сваркой встык на технологической подкладке или на опорных балках, заложенных в массив бетона фундамента (рис 4.9). В листах днища предусматриваются отверстия диаметром 100 мм для подливки под днище цементного раствора, закрываемые после подливки и выверки днища квадратными накладками. Для крепления колонн поднасадочного устройства в днище предусматривается система отверстий.

Сварка листов кожуха, как правило, выполняется вручную или полуавтоматом. Электрошлаковая сварка здесь не допускается, так как электрошлаковый шов не обеспечивает требуемые для конструкции, работающей в условиях циклических воздействий, гарантированные показатели ударной вязкости.

Полусферический купол воздухонагревателя (рис. 4.10) собирается из отдельных вальцованных лепестков, укрупняемых на заводе-изготовителе в элементы, габариты которых допускают их транспортировку. Во избежание концентрации напряжений от сварки при сосредоточении большого количества швов в верхней части сферы центральная ее часть выполняется из одного или двух сферических элементов.

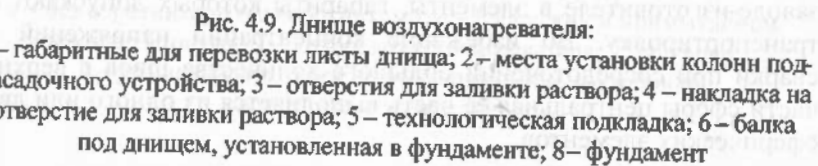


Рис. 4.9. Днище воздухонагревателя:

1 – габаритные для перевозки листы днища; 2 – места установки колонн поднасадочного устройства; 3 – отверстия для заливки раствора; 4 – накладка на отверстие для заливки раствора; 5 – технологическая подкладка; 6 – балка под днищем, установленная в фундаменте; 8 – фундамент

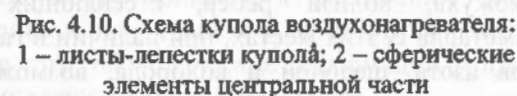


Рис. 4.10. Схема купола воздухонагревателя:
1 — листы-лепестки купола; 2 — сферические
элементы центральной части

В соответствии с нормативными документами законченный монтажом кожух испытывается внутренним давлением воздуха. СНиП III-18-75 предусматривает следующий порядок испытаний:

- на первом этапе смонтированный кожух без футеровки испытывается на плотность внутренним давлением, равным 70 кПа;
- на втором этапе кожух, заполненный футеровкой, испытывается на прочность внутренним испытательным давлением, равным 1,25 величины рабочего давления дутья.

Для воздухонагревателей с плоскими днищами, не рассчитанными на восприятие внутреннего давления, нормативные документы допускают одноэтапное испытание после возведения

огнеупорной кладки внутренним давлением воздуха, равным 1,25 величины рабочего давления.

Весьма важным этапом в сооружении воздухонагревателей является контроль сварных швов. СНиП III-18-75 предписывает осуществлять контроль швов в следующем объеме:

- ультразвуковой дефектоскопией – 100% длины швов;
- просвечиванием проникающими излучениями – 10% длины швов, выполненных ручной и полуавтоматической сваркой, и 1,5% длины швов, выполненных автоматической сваркой.

Кроме того, обозначены места обязательного просвечивания. К ним относятся участки швов с признаками дефектов, обнаруженные ультразвуковой дефектоскопией, пересечения кольцевых и вертикальных швов, стыковой периферийный шов приварки купола к коробчатой балке при выносной камере горения.

Последние исследования [16], связанные с разрушением купола воздухонагревателя с вынесенной камерой горения на одном из предприятий Российской Федерации, свидетельствуют о необходимости, особенно при обследовании и диагностике технического состояния воздухонагревателей, работающих с температурой под куполом 1400°C и более, подвергать ультразвуковому контролю, как рекомендовано [58], места переломов очертания кожуха, вблизи ребер, стесняющих свободную деформацию металла. В этих местах, при наличии в газовой среде окислов азота, щелочей и водорода, возможно развитие коррозионного растрескивания под напряжением.

Во время разогрева воздухонагревателя происходит рост кожуха с его нагревом и вертикальным перемещением футеровки, создающий за счет трения значительные усилия в узле сопряжения первого пояса воздухонагревателя с его днищем, вызывающие подъем последнего.

На рис. 4.11 приведены экспериментальные данные по подъему днища воздухонагревателя при его разогреве [28, 29]. Исследования показали заметную неравномерность величин подъемов по периметру днища. Наибольшие подъемы наблюдались со стороны камеры насадки, что можно объяснить воздействием массы камеры горения, препятствующей подъему.

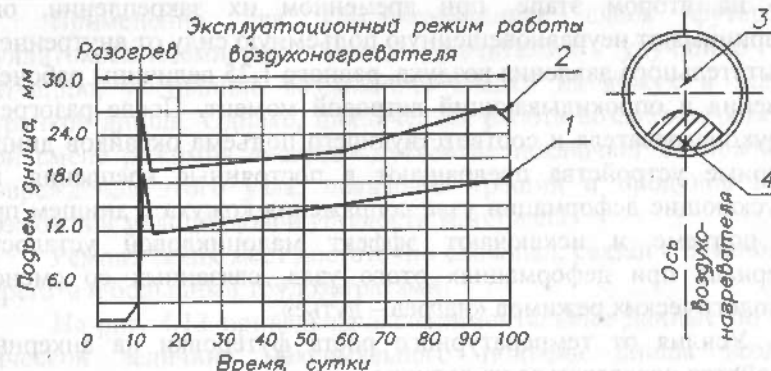


Рис. 4.11. Экспериментальные данные по подъему днища воздухонагревателя при его разогреве:

1 – со стороны камеры насадки; 2 – со стороны камеры горения;
3, 4 – камеры насадки и горения соответственно

При неудачной компоновке футеровки или применении малодеформативных материалов для компенсационных зазоров известны случаи подъема кожуха и вместе с ним окрайка днища на 120–150 мм. Такие значительные деформации узла с учетом воздействия первого пояса кожуха на днище в направлении поперек проката могут привести к расслоению листа днища, вызвать появление в нем трещин и привести к разгерметизации агрегата. Кроме того, периодические деформации этого узла могут вызвать малоцикловую усталость материала.

Для исключения или снижения этого эффекта кожух воздухонагревателя крепится к фундаменту анкерными устройствами. При их расчете удерживающая сила состоит из массы периферийной кладки, расположенной на днище, и массы металлоконструкций кожуха. Масса насадки не является удерживающей силой, так как блоки насадки опираются на собственные колонны и уложены с зазором к кожуху.

Анкерные устройства имеют следующее назначение:

- на первом этапе они играют роль временных креплений и должны воспринять усилия от разности давлений на купол и днище при испытании пустого кожуха давлением, равным 70 кПа и опрокидывающий ветровой момент;

– на втором этапе, при временном их закреплении, они воспринимают неуравновешенную подъемную силу от внутреннего испытательного давления воздуха, равного 1,25 величины рабочего давления и опрокидывающий ветровой момент. После разогрева воздухонагревателя и соответствующего подъема крайков днища анкерные устройства превращают в постоянные крепления, не допускающие деформации узла сопряжения кожуха с днищем при его подъеме и исключают эффект малоциклового усталости материала при деформациях этого узла, связанных со сменой технологических режимов «нагрев – дутье».

Усилия от температурного роста футеровки на анкерные устройства передаваться не должны.

В период эксплуатации воздухонагревателя также заметны вертикальные перемещения кожуха. Во время разогрева их величина достигает 30 мм, а при нормальной работе в режимах нагрева или дутья составляет ± 5 мм. Такие перемещения в ряде случаев приводили к разрыву анкеров.

Проведенные экспериментальные исследования [27, 28] позволили получить данные о фактических напряжениях в анкерах при разогреве и эксплуатации воздухонагревателей (рис. 4.12).

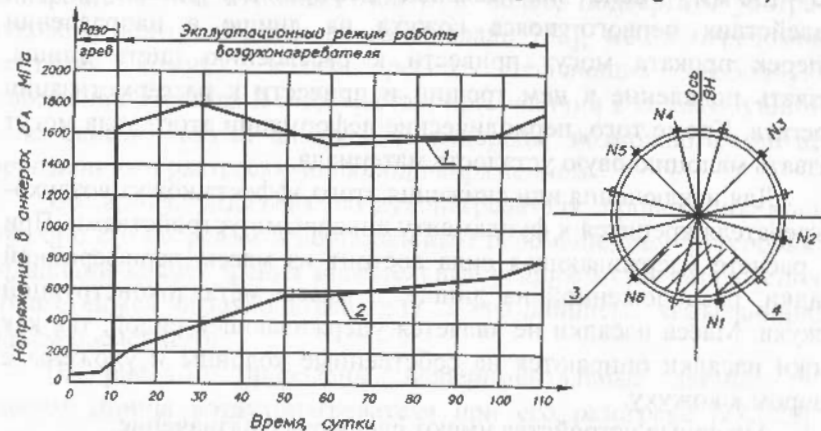


Рис. 4.12. Графики изменения условных напряжений в анкерах при разогреве и эксплуатации воздухонагревателя:
1 — средние напряжения в анкерах № 1, 6; 2 — средние напряжения в анкерах № 2–5; 3, 4 — камеры насадки и горения соответственно

Применение для компенсационных слоев футеровки муллитокремнеземистых матов значительно улучшило эту ситуацию, уменьшило воздействие кладки на кожух и подъем крайков днища. Однако, циклическая работа воздухонагревателя при смене режимов «нагрев – дутье» не исключает возможности повреждения этого узла, появления трещин и продувов ввиду возможной малоциклового усталости материала.

Ремонт таких мест достаточно сложный, связан с остановкой агрегата и большими трудозатратами.

На рис. 4.13 приведены экспериментальные данные по фактической величине максимального подъема днища воздухонагревателя при закрепленном и незакрепленном воздухонагревателе, на рис. 4.14 показана зависимость величины напряжений в анкерах от давления дутья.

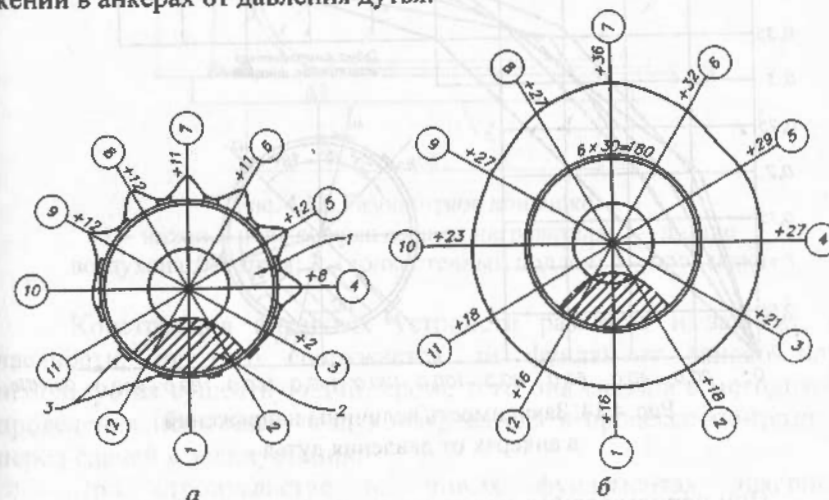
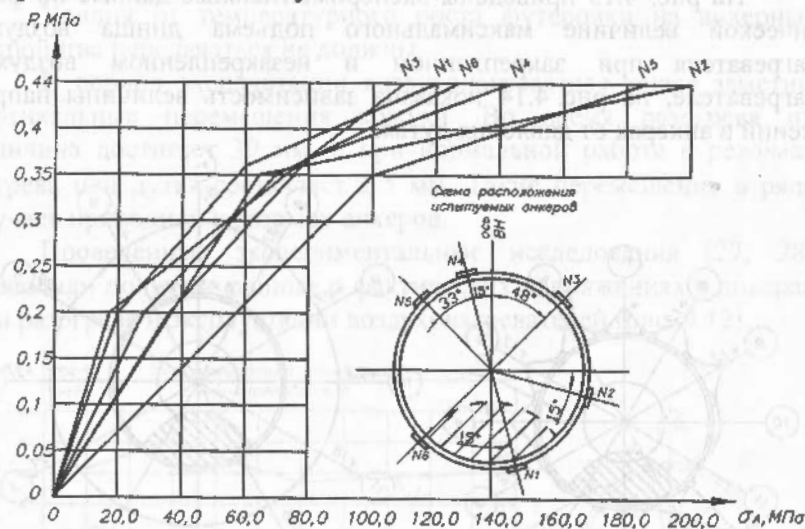


Рис. 4.13. Экспериментальные данные по величине максимального подъема днища воздухонагревателя:
а — с установленными анкерами; б — без анкеров;
1, 2 — камеры насадки и горения соответственно; 3 — анкера

Поскольку одним из основных критериев работоспособности воздухонагревателя является его газоплотность, эффективной оказалась установка на днище дополнительного тонкостенного поддона из достаточно тонкого листа (6–8 мм), стенки которого

примыкают к внутренней поверхности первого пояса кожуха и днища через прокладки (рис. 4.15). При термическом росте футеровки и возможном «дыхании» днище воздухонагревателя и дно тонкостенного поддона получают одинаковые вертикальные перемещения. Так как соотношение возникающих в них напряжений пропорционально соотношению их толщин, небольшая жесткость поддона позволяет ему деформироваться без возникновения чрезмерно больших напряжений, что не вызывает трещинообразования и сохраняет герметичность кожуха даже при повреждениях основного узла.



При использовании для заполнения компенсационного зазора муллитокремнеземистых матов и оптимально скомпонованной футеровки, практически исключая подъем окрайков днища, возможно одноэтапное постоянное крепление анкерных устройств.

Анкерные устройства должны располагаться равномерно по периметру кожуха. Однако, на практике осуществить такое расположение не удастся, так как в этом районе располагаются штуцера дымовых клапанов и воздухопровода холодного дутья, лазы и выдержать одинаковое расстояние между анкерными

устройствами не представляется возможным, что вызывает их вынужденную сбивку.

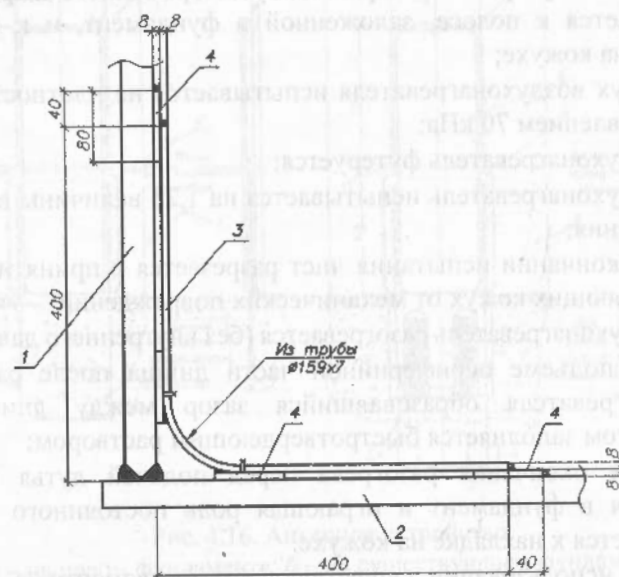


Рис. 4.15. Газоплотное доннышко:

1 – нижний пояс кожуха воздухонагревателя; 2 – днище воздухонагревателя; 3 – тонкостенный поддон; 4 – прокладка

Конструкция анкерных устройств различна и зависит, в частности, от того сооружается ли фундамент заново или используется существующий, кроме того она связана с методикой проведения испытания воздухонагревателя в процессе монтажа и перед сдачей в эксплуатацию.

При строительстве на новых фундаментах анкерное устройство (рис. 4.16, а) решается в виде полосы, закладываемой в массив фундамента, выступающей над ним на 600–700 мм и отстающей от кожуха на толщину нижней накладки, над которой устанавливается верхняя накладка толщиной, равной сумме толщин нижней накладки и анкерной полосы, закладываемой в фундамент.

При закреплении кожуха воздухонагревателя анкерными устройствами предусматривается следующая последовательность выполнения операций:

- после монтажа одного-двух первых поясов кожуха наружный лист анкерного устройства, играющий роль временного закрепления, приваривается к полосе, заложённой в фундамент, и к верхней накладке на кожухе;
- кожух воздухонагревателя испытывается на плотность внутренним давлением 70 кПа;
- воздухонагреватель футеруется;
- воздухонагреватель испытывается на 1,25 величины внутреннего давления;
- по окончании испытания лист разрезается с принятием мер, предохраняющих кожух от механических повреждений;
- воздухонагреватель разогревается (без внутреннего давления);
- при подъёме периферийной части днища после разогрева воздухонагревателя образовавшийся зазор между днищем и фундаментом заполняется быстротвердеющим раствором;
- после окончания разогрева перед подачей дутья полоса, заложённая в фундамент и играющая роль постоянного анкера, приваривается к накладке на кожухе.

При использовании существующего фундамента, в связи с трудностями закрепления в него анкерного устройства в виде полосы, нижнюю часть устройства, закладываемую в фундамент, выполняют из круглых стержней, закрепляемых с помощью одного из известных материалов в пробуренные отверстия (рис. 4.16, б). Верхняя выступающая часть круглых стержней крепится к анкерной полосе до их закладки в фундамент и механизм закрепления анкерного устройства при испытании воздухонагревателя сохраняется прежним.

Известны конструкции анкерных устройств, которые при закреплении к кожуху не требуют никаких специальных операций в процессе испытания и ввода в действие воздухонагревателя. Такие саморегулирующиеся устройства (рис. 4.17) решены в виде системы накладок, прикрепленных к кожуху и соединенных с анкерной полосой высокопрочными болтами с заданным натяжением, величина которого обеспечивает возможность проскальзывания анкера при подъёме днища.

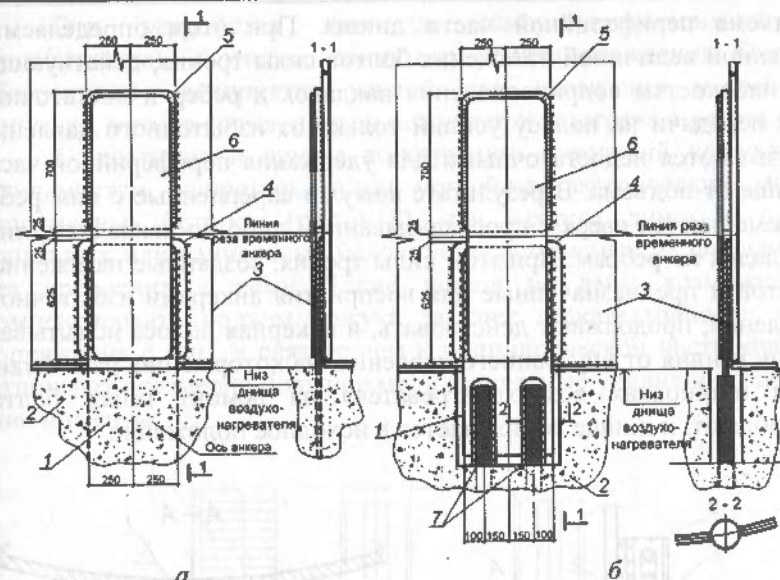


Рис. 4.16. Анкерное устройство:

- а – на новом фундаменте; б – на существующем фундаменте;
 1 – полоса, закладываемая в фундамент (постоянный анкер);
 2 – фундамент; 3 – нижний пояс кожуха; 4, 5 – нижняя и верхняя накладки соответственно; 6 – временная анкерная полоса;
 7 – анкерные болты, закрепляемые в фундаменте

Закрепление воздухонагревателя происходит следующим образом. По окончании строительства до разогрева соединяют ребра парными уголковыми накладками, располагая высокопрочные болты таким образом, чтобы они находились в прорези ребра, приваренного к анкерной полосе в нижнем положении, а в прорези ребра, приваренного к накладке, в верхнем положении. Длина каждой прорези должна быть больше расстояния между крайними болтами, установленными на ней, на половину ожидаемой величины подъема днища. Перед испытанием воздухонагревателя на прочность высокопрочные болты затягивают на усилие, достаточное для передачи на анкерную полосу нагрузки от испытательного давления. В процессе разогрева и эксплуатации под воздействием избыточного давления и температуры кожух стремится занять новое положение за счет

подъема периферийной части днища. При этом определяемые заданной величиной натяжения болтов силы трения, действующие по плоскостям соприкосновения накладок и ребер и достаточные для передачи на полосу усилий только от избыточного давления, оказываются недостаточными для удержания периферийной части днища от подъема. В результате кожух и скрепленные с ним ребра перемещаются вверх с проскальзыванием либо по накладкам, либо накладок по ребрам. При этом силы трения, созданные натяжением болтов и предназначенные для восприятия анкерами избыточного давления, продолжают действовать, и анкерная полоса испытывает лишь усилия от внутреннего давления, на которые она рассчитана. При остановках воздухонагревателя на ремонт гайки болтов ослабляют, и днище возвращается в исходное положение.

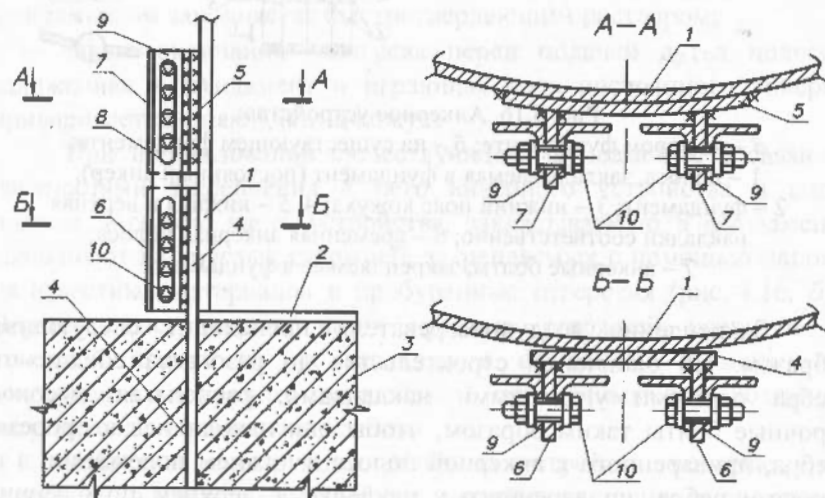


Рис. 4.17. Саморегулирующееся анкерное устройство:

1 – нижний пояс кожуха воздухонагревателя; 2 – днище воздухонагревателя; 3 – фундамент; 4 – анкерная полоса; 5 – прокладка, приваренная к нижнему поясу кожуха воздухонагревателя; 6 – ребро, приваренное к анкерной полосе; 7 – ребро; 8 – прорезь для болтов в верхнем ребре; 9 – парные уголки; 10 – прорезь для болтов в нижнем ребре

Эти устройства являются саморегулирующимися и автоматически, с учетом принятого усилия натяжения болтов, обеспечивают восприятие усилий при испытании и работе, допуская, в то же время, подъем кожуха при разогреве агрегата.

Существуют и другие конструкции креплений кожухов к фундаментам, например, путем устройства сферических днищ, заполненных бетоном (рис. 4.18), или жестких днищ из ортогональных или радиальных балок, устанавливаемых на фундамент без крепления к нему. Такие днища не дают возможности компенсировать подъем кожуха за счет деформативности узла сопряжения с ним, в связи с чем в цилиндрической части кожуха возникают чрезмерно большие меридиональные усилия и изгибающие моменты.

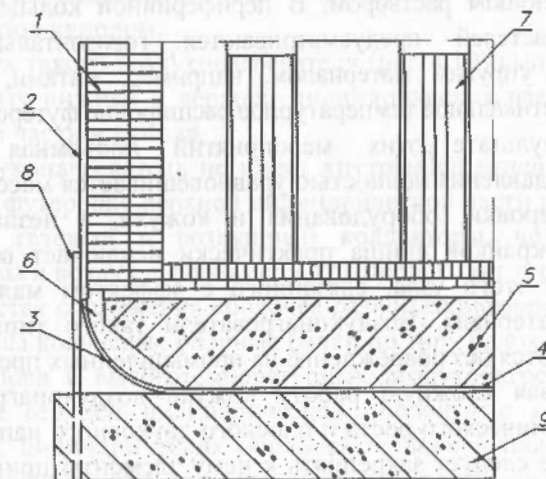


Рис. 4.18. Воздухонагреватель со сферическим днищем:

1 – огнеупорная футеровка; 2 – нижний пояс кожуха воздухонагревателя; 3 – сферический переход; 4 – днище; 5 – бетонная плита; 6 – теплоизоляционный материал; 7 – колонны поднасадочного устройства; 8 – листовые анкеры; 9 – фундамент

При строительстве воздухонагревателей без анкеров кожух с плоским днищем устанавливается на фундамент без его закрепления. В таких случаях для исключения или минимизации вертикального роста кожуха, обеспечения прочности узла сопряжения его с

днищем тщательно подбирается конструкция футеровки, применяются компенсационные материалы высокого качества с необходимыми деформативными и прочностными свойствами, устанавливается уплотнительный поддон. Кладка воздухонагревателя в нижней части (на высоту не менее 1,5 м) выполняется с зазором между кожухом и кладкой не более 15 мм, что обеспечивает максимальное погашение подъемной силы от внутреннего давления массой периферийной кладки. По всей остальной высоте зазор определяется расчетом и заполняется упругими матами, компенсирующими температурное расширение футеровки.

После первоначального разогрева воздухонагревателя, в случае образования зазора между днищем и фундаментом, его заполняют быстротвердеющим раствором. В периферийной кольцевой кладке воздухонагревателей предусматриваются горизонтальные швы, заполненные упругим материалом, например, матами, компенсирующими вертикальное температурное расширение футеровки.

В результате этих мероприятий подъемная сила от внутреннего давления полностью уравнивается массой периферийной футеровки, оборудования и кожуха, а незначительное «дыхание» крайков днища практически исключает вероятность повреждения этого узла, связанного с эффектом малоциклового усталости материала. Воздуонагреватели такого типа успешно эксплуатируются без повреждений на промышленных предприятиях.

Учитывая сложную работу кожуха воздухонагревателя в условиях термического роста и плоского двухосного напряженного состояния, не следует закреплять к нему элементы примыкающих каркасов зданий, опор газо- и воздухопроводов, других конструкций, передающих как вертикальные, так и горизонтальные сосредоточенные усилия.

§ 4.4. Бесшахтный воздухонагреватель

Воздуонагреватели с внутренней боковой камерой горения, как уже отмечалось, имеют ряд недостатков, а именно:

- несимметричная работа агрегата неблагоприятно влияет на футеровку стен камеры горения и блоки насадки, которые в

условиях нестационарного температурного поля наклоняются на стену камеры горения. Это вызывает дополнительные усилия изгиба, приводящие к разрушению кладки;

- значительный, до 30% объема воздухонагревателя, объем камеры горения и уменьшение объема камеры насадки, а, соответственно, общей поверхности нагрева, что приводит к увеличению габаритов воздухонагревателя – высоты или его диаметра.

В связи с этим во вновь разрабатываемых конструкциях были сделаны попытки устранить указанные недостатки. К наиболее удачной конструкции, получившей в последние годы широкое распространение, следует отнести воздухонагреватель, разработанный ЗАО «Калугин» (г. Екатеринбург, Россия), с кольцевыми коллекторами, подающими газ и воздух в форкамеру, расположенную под куполом.

Кожух такого воздухонагревателя (рис. 4.19) выполнен в виде сопряженных нижней и верхней цилиндрических частей, а также конической части и купола.

Воздуонагреватель не имеет внутренней отдельной камеры горения. В футеровке верхней цилиндрической части расположены кольцевые газовый и воздушный коллекторы, через которые подаются газ и воздух в форкамеру, где происходит горение.

В местах сопряжения оболочек разной геометрической формы расположены кольцевые опорные балки по типу балок для опирания кладки купола в высокотемпературных воздухонагревателях. Для соединения верхней цилиндрической оболочки с конической, а также двух цилиндрических оболочек и нижней цилиндрической части оболочки другого диаметра предусмотрены верхняя и нижняя кольцевые балки.

Стоимость таких воздухонагревателей на 25–30% ниже стоимости воздухонагревателей с внутренней камерой горения.

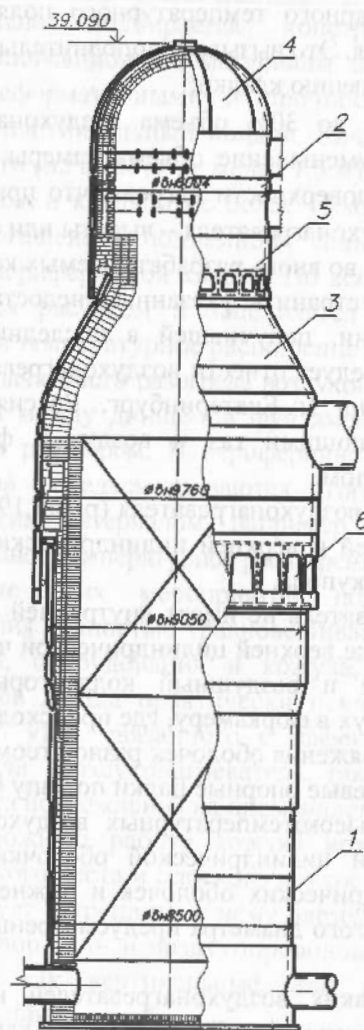


Рис. 4.19. Бесшахтный воздухогреватель:

1, 2 – кожухи нижней и верхней цилиндрической части соответственно; 3 – коническая часть; 4 – купол; 5, 6 – верхняя и нижняя опорные кольцевые балки соответственно

§ 4.5. Воздухогреватель с вынесенной камерой горения

Одним из направлений создания конструктивной формы воздухогревателя было отделение камеры горения от камеры насадки и ее автономное расположение. Такой воздухогреватель с вынесенной камерой горения позволил обеспечить осесимметричную работу конструкций в условиях термических воздействий и раздельные температурные перемещения камер.

К недостаткам таких воздухогревателей следует отнести их высокую стоимость, на 25–30% превышающую стоимость обычных воздухогревателей с внутренней камерой горения, а также потребность в больших площадях, которых в доменных цехах недостаточно.

За рубежом строительство воздухогревателей с вынесенной камерой горения началось давно. Известны три основных типа таких аппаратов – фирмы Didier Werke, Coppers и Marten & Pagenshtecher (см. рис. 1.9)

Первый воздухогреватель с вынесенной камерой горения фирмы Didier Werke был пущен в 1960 г. на заводе в Фелькингене. Его характеристики следующие:

Температура дутья, °C	1050
Температура под куполом, °C	1250
Период дутья, ч	1,5
Период нагрева, ч	1,5
Диаметр кожуха камеры горения, мм	2800
Диаметр кожуха камеры насадки, мм	7000
Высота, мм	26840

После опытного подтверждения их надежности началось массовое строительство воздухогревателей и до 1976 г. было возведено 45 аппаратов фирмы Didier Werke. Наибольшее количество доменных печей было возведено в Японии, где до этого в основном применялись воздухогреватели типа Coppers. Первые воздухогреватели типа Coppers были возведены в 1963 г., Marten & Pagenshtecher – в 1965 г.

В таких воздухогревателях главным является узел сопряжения камеры горения с камерой насадки. Каждое из его

решений имеет свои недостатки. Однако наиболее широкое распространение получила конструкция сопряжения камер фирмы Dedeir Werke, решенная с помощью общего купола, позволяющего получить равномерный, без завихрений газовый и воздушный потоки и равномерное их распределение по поперечному сечению насадки, что обеспечивает долговечность работы воздухо-нагревателя.

Такой воздухонагреватель (рис. 4.20) состоит из камеры горения и камеры насадки, соединенных общим куполом, выполненным из оболочек вращения. Камера насадки опирается непосредственно на фундамент, а камера горения – на пространственную опору. Балка коробчатого сечения передает на кожухи камер давление газовой среды и вес футеровки купола [47, 49].

На рис. 4.21 показано конструктивное решение узла сопряжения камер воздухонагревателя фирмы Didier Werke. Купол выполнен в виде сложной оболочки вращения, состоящей из двух надкамерных зон соединительной части, опирающихся на кольцевую коробчатую балку. Надкамерные зоны выполнены из сферических частей, центры которых совпадают с осями камер, находятся на одном уровне и соединены между собой конической поверхностью.

На рис. 4.22 показан блок воздухонагревателей с выносными камерами горения в стадии монтажа.

Воздухонагреватели такой конструкции были возведены на доменной печи № 8 объемом 2700 м³ металлургического комбината им. Дзержинского (г. Днепропетровск, Украина), доменной печи № 9 объемом 5000 м³ ОАО «Миттал Стіл Кривий Ріг» (г. Кривий Ріг, Украина) и на доменной печи № 5 объемом 5580 м³ ОАО «Северсталь» (г. Череповец, Россия).

Разделение камер и их автономная работа в условиях температурного поля привели к необходимости обеспечения их независимых температурных перемещений. Было разработано и осуществлено три конструктивных решения:

- камера горения опирается на собственную отдельно стоящую опору, а ее температурные перемещения компенсируются одним замкнутым, регулируемым сильфонным компенсатором, установленным в верхней части камеры горения;

- камера горения свободно подвешивается к кольцевой опорной балке купола и не требует мероприятий по компенсации температурных перемещений системы;

- камера горения опирается на собственную отдельно стоящую опору, а ее температурные перемещения автоматически компенсируются двумя замкнутыми, нерегулируемыми сильфонными компенсаторами, установленными сверху и снизу камеры горения.

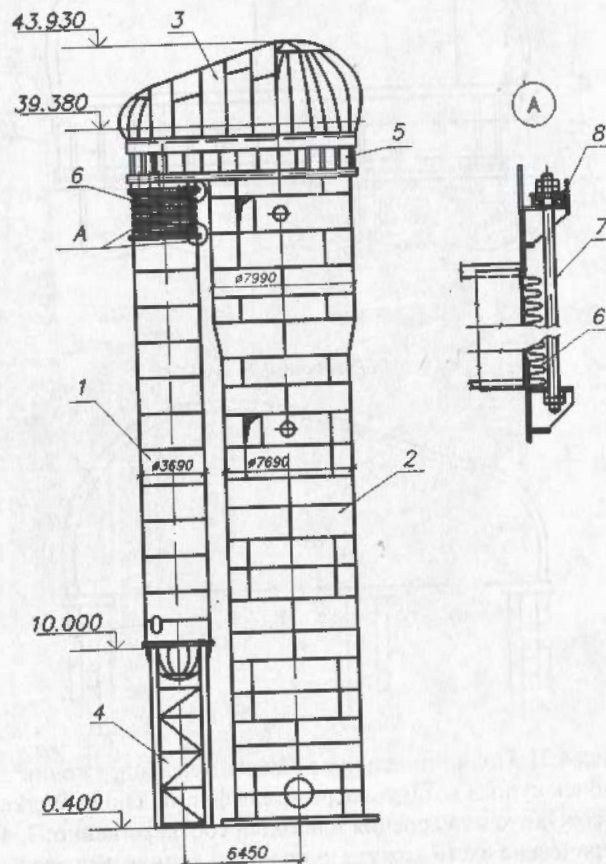


Рис. 4.20. Воздухонагреватель с выносной камерой горения:
1, 2 – камеры горения и насадки соответственно; 3 – купол; 4 – опора камеры горения; 5 – опорная кольцевая балка; 6 – сильфонный компенсатор; 7 – стяжные болты; 8 – блок тарельчатых пружин

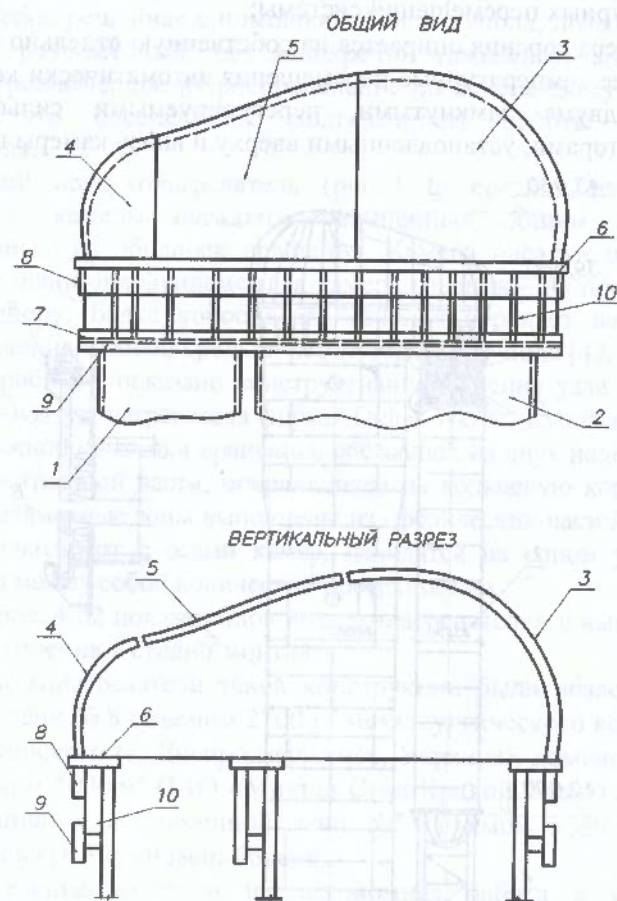


Рис. 4.21. Принципиальное решение узла сопряжения оболочек купола воздухонагревателя фирмы Didier Werke: 1, 2 – кожухи камер горения и насадки соответственно; 3, 4 – сферические части кожуха купола; 5 – коническая часть кожуха купола; 6, 7 – верхний и нижний пояса опорной кольцевой балки соответственно; 8, 9 – усиливающие верхний и нижний вертикальные кольцевые элементы соответственно; 10 – ребра жесткости в кольцевой балке

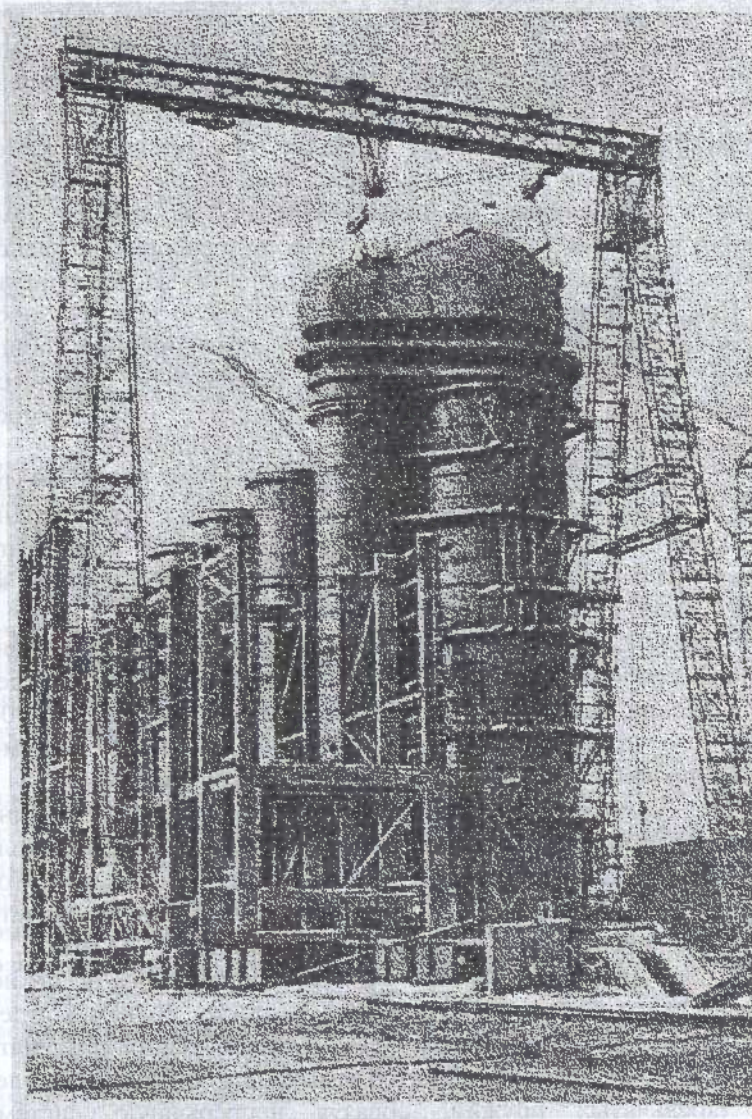


Рис. 4.22. Строительство воздухонагревателей с выносными камерами горения

Конструктивные решения подобных воздухонагревателей практически одинаковы и отличаются лишь характером восприятия веса камеры горения и способом решения компенсации температурных перемещений. Обе камеры объединяются кольцевой опорной балкой, опирающейся на кожух камеры насадки. На балке располагается купол, а снизу к балке прикрепляется камера горения. Кольцевая балка выполняется коробчатого поперечного сечения и обеспечивает не только передачу на кожухи камер усилий от внутреннего давления на купол, но и восприятие распора от примыкающих к ней конических и сферических частей купола.

При опирании камеры горения на опорную конструкцию в виде колонны система из двух камер, объединенных общим куполом, становится при воздействии температуры статически неопределимой и, как отмечалось, возникает необходимость компенсации разности их температурных деформаций.

Чтобы исключить воздействие на коробчатую балку и купол усилий от неодинакового температурного удлинения камер, в верхней части камеры горения устанавливают сильфонный компенсатор волнового типа с расчетной компенсирующей способностью, как правило, 30 мм при избыточном давлении 0,5 МПа.

В связи с тем, что компенсатор не воспринимает неуравновешенные продольные осевые растягивающие усилия от внутреннего давления, величина которых составляет порядка 1300–1500 тс, его «замыкают» предназначенной для этого системой болтов, прикрепленных к двум опорным шпангоутам.

Для компенсации переменной доли неуравновешенной нагрузки, связанной с климатическими и незначительными технологическими перепадами температуры, под болтами компенсатора устанавливают предварительно упругообжатые блоки тарельчатых пружин, компенсирующих деформации величиной 12–15 мм.

Чтобы не препятствовать работе компенсатора, в период разогрева гайки болтов не затягивают, позволяя волнам компенсатора перемещаться. После разогрева и стабилизации температуры перед подачей дутья компенсатор замыкается болтами с комплектами тарельчатых пружин, образуя непрерывную систему, воспринимающую осевые растягивающие усилия.

При остановке воздухонагревателя на ремонт гайки болтов вновь отпускают.

Система воспринимает неуравновешенную нагрузку от внутреннего давления и одновременно, с помощью блоков пружин, допускает независимые перемещения камер насадки и горения при воздействии переменных нагрузок, возникающих от смены циклов «нагрев – дутье» и при климатических перепадах температур. Учитывая зависимость работы системы от технологических процессов, предусмотрен специальный порядок затяжки и отпуска гайк болтов.

Футеровка камер выполнена так, что их вертикальные перемещения не воздействует на купол, так как между ними устроены зазоры. Объемное расширение футеровок погашается слоем теплоизоляции, совместно с футеровкой обеспечивающим температуру кожуха не выше 80°C [26].

Схема компенсации температурных перемещений камер с помощью регулируемого компенсатора решает поставленную задачу, но при этом вызывает определенные сложности, связанные с необходимостью регулировки, что не исключает влияние «человеческого» фактора.

В связи с этим, для воздухонагревателей одной из доменных печей металлургического завода Украины была разработана конструкция (рис. 4.23), предполагающая автоматическую компенсацию разности деформаций и восприятие переменной доли неуравновешенных нагрузок.

По этой схеме на камере горения было установлено два сильфонных компенсатора. Верхний компенсатор воспринимал разницу температурных перемещений камер насадки и горения, нижний компенсатор, установленный за пределами опоры камеры горения на участке, выполняющем функции «хвостовика», компенсировал упругие деформации продольных затяжек, воспринимающих неуравновешенные усилия. Одинаковая с камерой горения длина затяжек и близкое расположение к ней предполагают их одинаковые температурные перемещения.

Особенностью реализации такого решения является необходимость ограничения собственных упругих деформаций затяжек, которые при максимальных усилиях, с учетом их значительной длины, не должны превышать суммарные перемещения системы и компенсирующую способность нижнего компенсатора.

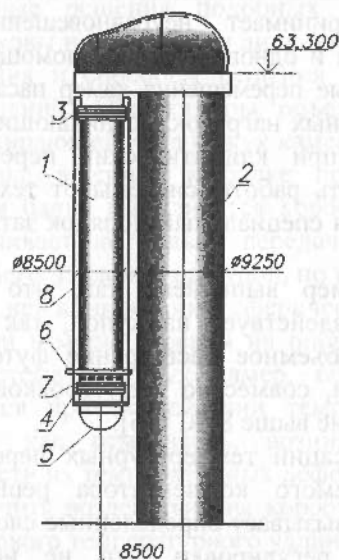


Рис. 4.23. Воздухонагреватель с выносной камерой горения с двумя компенсаторами:

1, 2 – камеры горения и насадки соответственно; 3, 4 – верхний и нижний компенсаторы соответственно; 5 – нижний купол камеры горения; 6 – опорная площадка; 7 – герметичное днище; 8 – тяги

Известно решение воздухонагревателя с вынесенной камерой горения без компенсатора. В этом случае камера горения проектируется подвешенной к камере насадки через опорную кольцевую балку, а все усилия от внутреннего давления в камерах оказываются замкнутыми и не передаются на опорные конструкции в виде неуравновешенных нагрузок. Собственная масса камеры насадки передается на фундамент, а камеры горения – через опорную кольцевую балку на камеру насадки.

В связи с возможностью возникновения нештатных ситуаций между камерой горения и опорой был устроен страховочный зазор, достаточный для компенсации разности температурного роста обеих камер. Зазор заполняется прокладками (например, деревянными), выполняющими роль упругих опор. Воздухонагреватели такого типа были применены для доменной печи № 5 металлургического комбината «Северсталь» (г. Череповец, Россия).

§ 4.6. Эстакада воздухонагревателей

Для установки мостового грузоподъемного крана, обслуживающих монорельсов, технологического оборудования, площадок для его обслуживания, различных помещений и опирания газопроводов рядом с воздухонагревателями размещают специальное здание. Для южных регионов, где не требуются ограждающие конструкции, вместо здания, как правило, сооружают открытую эстакаду, пример которой показан на рис. 4.24.

На верхней части каркаса часто размещают помещения и оборудование для систем испарительного охлаждения (СИО) клапанов горячего дутья воздухонагревателей, а иногда и кожуха доменной печи, что, как правило, требует значительной высоты сооружения.

Интенсификация технологических процессов и связанные с этим увеличение количества и массы устанавливаемого оборудования, применение компенсаторов для газопровода горячего дутья, отказ от использования кожухов воздухонагревателей в качестве опорных конструкций усложнили схему зданий. Каркас их стал выполняться в виде системы П-образных многоярусных поперечных рам, обеспечивающих восприятие всех видов нагрузок, в том числе и горизонтальных. В связи с разными температурными режимами конструкций и негативным воздействием на кожух сосредоточенных нагрузок исключено закрепление поперечных рам к кожухам воздухонагревателей. Традиционно поперечные рамы каркаса здания или эстакады устанавливаются на железобетонном постаменте. Ригели опорных рам постаменты, как правило, имеют консоли, что связано с невозможностью рационального размещения опор из-за близкого расположения железнодорожного пути.

Учитывая большую высоту каркаса (до 40–45 м), при благоприятных условиях генерального плана колонны поперечных рам каркаса целесообразно довести до фундаментов, исключив, тем самым, устройство отдельного постаменты или переломов колонн. Однако, и в этом случае наличие железнодорожного пути может привести к необходимости смещения нижней части колонн, что усложняет конструкцию сооружения и требует дополнительных мероприятий по обеспечению жесткости каркаса.

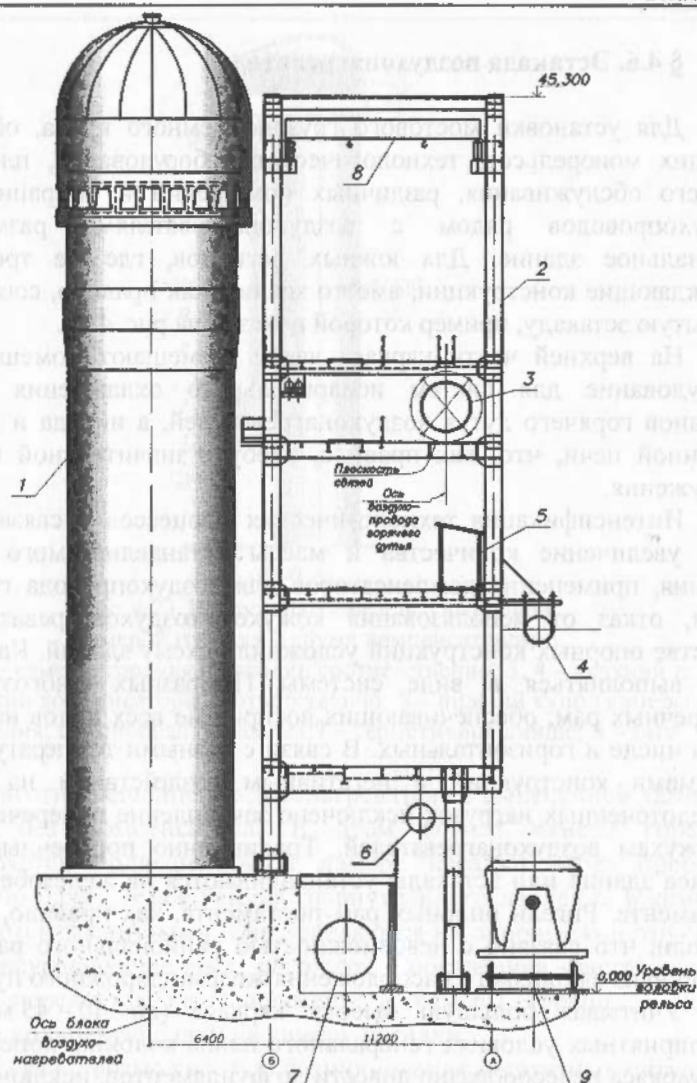


Рис. 4.24. Схема эстакады воздухонагревателей:

- 1 – воздухонагреватель; 2 – колонна эстакады воздухонагревателей;
 3 – прямой воздухопровод горячего дутья; 4 – воздухопровод воздуха горения; 5 – электрокабельная галерея; 6 – воздухопровод холодного дутья; 7 – дымопровод; 8 – мостовой кран;
 9 – железнодорожный путь

При тяжелых многоярусных рамах каркаса для увеличения поперечной жесткости могут быть использованы торцы здания, в плоскостях которых размещаются вертикальные связи. Передача усилий на эти связи обеспечивается устройством жесткой горизонтальной фермы в плоскости верха колонн.

При строительстве доменных печей на новых площадках следует располагать железнодорожные пути так, чтобы исключить необходимость в консолях и в смещении колонн.

Общая устойчивость каркаса в продольном направлении обеспечивается вертикальными продольными связями по колоннам и диском горизонтальных связей, расположенных поверх колонн и на других уровнях. Поперечные рамы могут устанавливаться попарно в пространстве между кожухами воздухонагревателей и, в связи с невозможностью устройства общей системы продольных связей из-за выступающих габаритов кожухов, попарно объединяться связями. При регулярной расстановке колонн вне кожухов воздухонагревателей связи по колоннам устанавливаются в одной или двух средних панелях.

Для монтажа, обслуживания и замены оборудования, газозухопроводов в здании предусматривается кран. Подкрановые балки с тормозными конструкциями устанавливаются на консолях к колоннам поперечных рам (рис. 4.25). Тормозные конструкции могут служить также распорками связей и ходовыми площадками.

Примерно в середине высоты каркас в обязательном порядке должен иметь один или два сплошных горизонтальных связевых диска, обычно совмещаемых с перекрытиями. Балки диска, входящие в состав поперечных рам – ригели, должны обеспечить возможность закрепления к ним смежных конструкций и оборудования, а также обслуживания и замены клапанов горячего дутья на штуцерах. Возможность демонтажа и выноса клапанов является одним из критериев определения местоположения поперечных рам.

В ряде случаев для организации поперечного транспорта, обеспечивающего подъем груза с железнодорожных путей и вынос оборудования на пути при ремонтах, устанавливается консольный кран или монорельс со своей опорой с вылетом наружной его части, необходимым для размещения крюка над железнодорожной платформой.

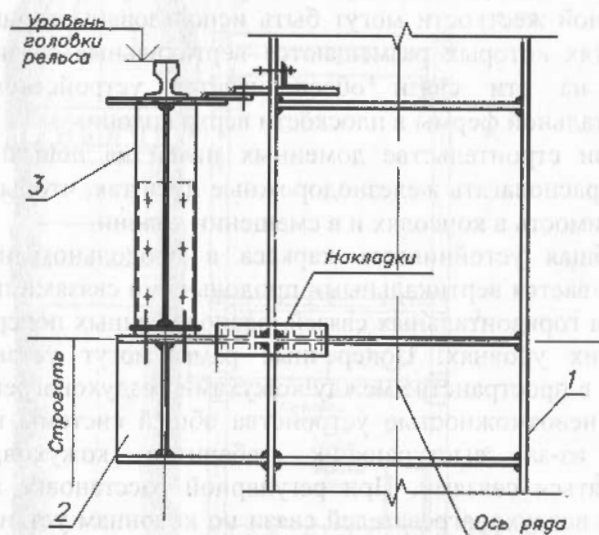


Рис. 4.25. Узел опирания подкрановой балки:

1 – колонна эстакады; 2 – консоль для опирания подкрановой балки; 3 – подкрановая балка

При необходимости устройства кровли ее выполняют из листового или профилированного настила толщиной 4 мм по прогонам.

Внутри здания имеются многочисленные площадки и помещения для размещения и обслуживания технологического оборудования, представляющие собой сложные в увязке пространственные конструкции.

ГЛАВА 5 СИСТЕМЫ ГАЗО - ВОЗДУХОПРОВОДОВ КОМПЛЕКСА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

§ 5.1. Трубопроводы

Трубопроводы в зависимости от требуемых диаметров и толщины стенок могут выполняться как из готовых цельносварных труб заводской поставки, так и из труб, свальцованных на заводе металлоконструкций из отдельных обечаек [42].

Минимальная толщина стенки газопроводов доменного комплекса принимается 8 мм, в обоснованных случаях могут быть применены трубы с толщиной стенки 6 мм.

Газо-воздухопроводы диаметром до 1420 мм, как правило, изготавливаются из цельносварных труб, поставляемых трубопрокатными заводами. Здесь можно столкнуться с проблемой поставки заводами-изготовителями труб определенных диаметров с толщиной стенки, превышающей необходимую для газопроводов доменного комплекса.

Монтажные марки труб диаметром 630...820 мм рекомендуется изготавливать из одного листа длиной 6000 мм с одним продольным швом, а марки труб большего диаметра – из двух листов с двумя продольными швами (рис. 5.1).

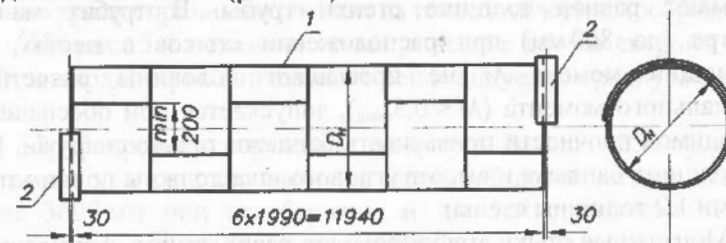


Рис. 5.1. Монтажная марка трубопровода:

1 – трубопровод; 2 – полубандаж для стыковки монтажных марок

Для криволинейных частей трубопроводов обечайки вырезают из цельносварной или ранее свальцованной и сваренной трубы (рис. 5.2), независимо от расположения ее швов. Стыковые швы листа выполняют с полным проплавлением, равнопрочными основному металлу и обеспечивающими плотность соединений.

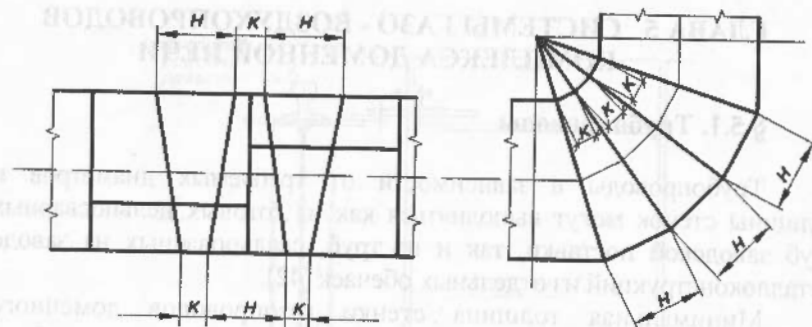


Рис. 5.2. Раскрой угловых элементов труб

Собирают трубопроводы с помощью кольцевых полубандажей, заранее приваренных на заводе к концам отправочных марок (рис. 5.3). Это позволяет выявлять и устранять неточности изготовления конструкций, разбивки опор и др. При устройстве стыков на криволинейных участках при наличии патрубков и в других случаях, требующих пространственной рихтовки участков трубопровода, верхний полубандаж следует приваривать только на монтаже к обеим отправочным маркам. Бандажи приваривают угловыми швами снаружи и изнутри. Толщину бандажа и высоту углового шва принимают равной толщине стенки трубы. В трубах малого диаметра (до 800 мм) при расположении стыков в местах, где изгибающий момент M не превышает половины расчетного максимального момента ($M < 0,5 M_{\max}$), допускается при обеспечении необходимой прочности приваривать бандажи только снаружи. При этом толщина бандажа и высота углового шва должны приниматься равными 1,2 толщины стенки.

Монтажные стыки трубопроводов располагают, как правило, в местах наименьших усилий как можно ближе к опорам и с учетом требований монтажа. В точках изменения направления трассы, при ее переломах, также устраивают монтажные стыки на бандажах. При наличии соответствующих грузоподъемных средств и сборочных стендов целесообразно перед подъемом укрупнять две отправочные марки с помощью сварки встык.

Геометрические размеры сварных колен назначают исходя из минимальной ширины детали $K \geq 200$ мм и размещения бандажа на

конце колена. Радиус кривизны сварного колена, как правило, принимают не меньше диаметра трубопровода. В трубопроводах диаметром менее 1220 мм для обеспечения указанной минимальной ширины детали радиус изгиба оси обычно больше диаметра трубы.

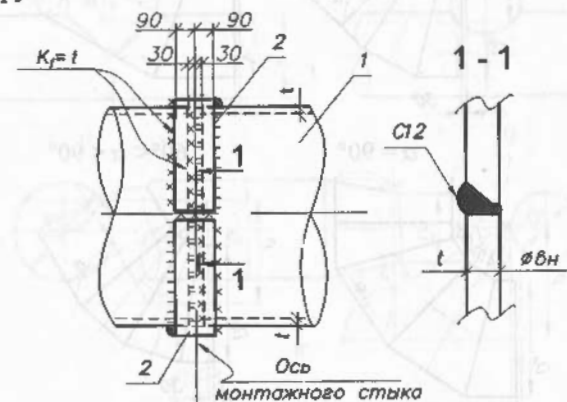


Рис. 5.3. Деталь монтажного стыка трубопровода:
1 – трубопровод; 2 – полубандаж для стыковки монтажных марок

В воздухопроводах аспирационных систем, где критериями их работоспособности являются параметры аэродинамики, радиусы поворотов трассы принимают исходя из технологических соображений.

На рис. 5.4 показаны геометрические схемы сварных колен трубопроводов применительно к рекомендуемым радиусам изгиба их оси.

Трубопроводы наружным диаметром больше 3250 мм негабаритны для транспортирования по железной дороге, а при диаметре более 3600 мм они негабаритны и для автотранспорта. В этих случаях трубы могут быть отправлены в виде рулонной заготовки с последующим разворотом ее на монтаже и сваркой продольного шва. Колена таких труб изготавливают по схеме рис. 5.4 после разворота и сварки рулона. На заводе-изготовителе рулонную заготовку предварительно размечают [41].

Значительной трудоемкостью отличаются узлы сопряжений и переходов трубопроводов. Наиболее часто встречающиеся пересечения и переходы трубопроводов показаны на рис. 5.5.

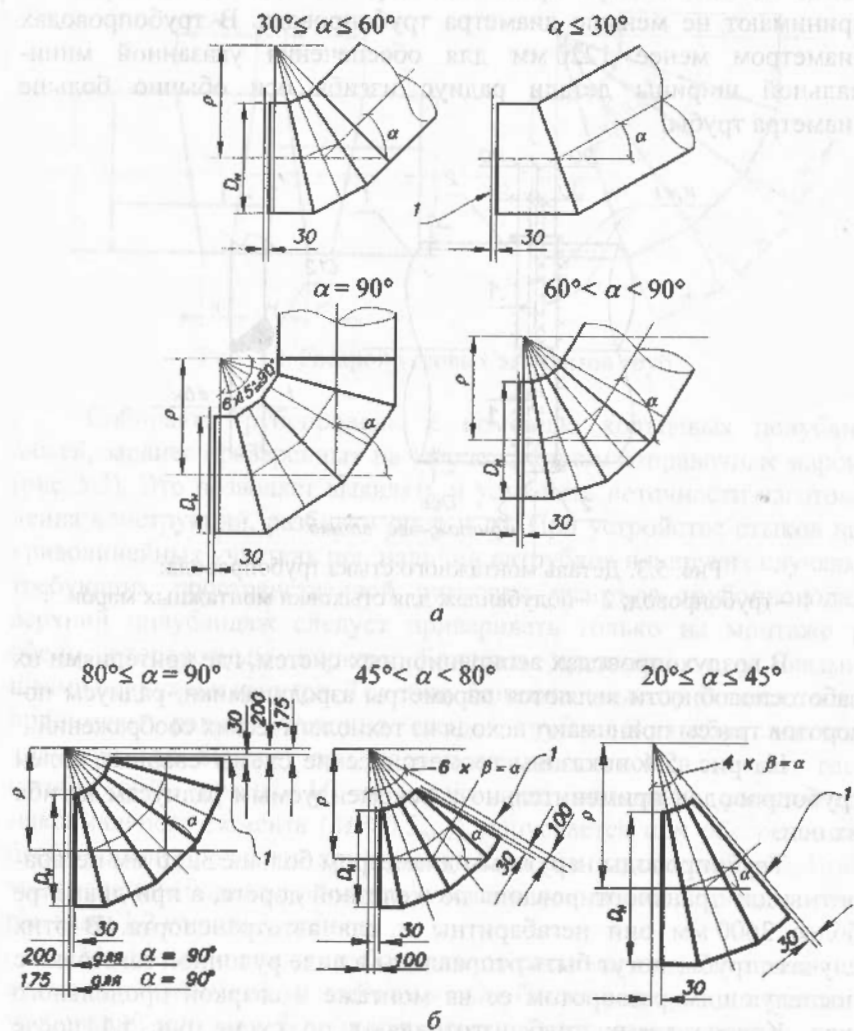


Рис. 5.4. Геометрические схемы сварных колен:

а – при $D \leq 3200$ мм; б – при $D > 3200$ мм;

1 – ось монтажного стыка

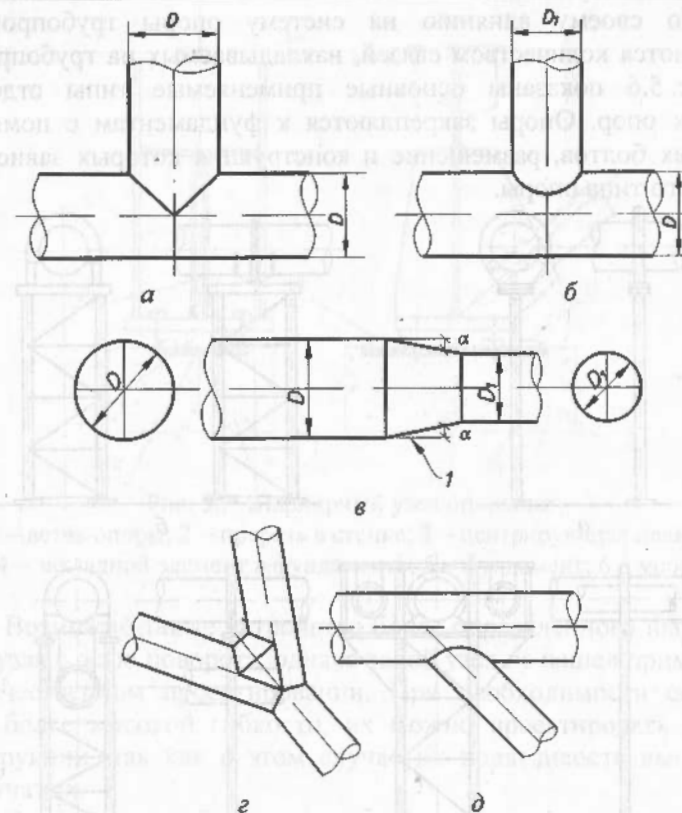


Рис. 5.5. Схемы сечений и переходов трубопроводов:

а – трубы одного диаметра под прямым углом; б – трубы разных диаметров под прямым углом; в – переход труб разных диаметров;

г – тройник; д – примыкание под углом; 1 – рекомендуемый угол $\alpha = 10^\circ$

§ 5.2. Опоры трубопроводов

При компоновке газо-воздухопроводов очень важно создать гибкую систему, обеспечивающую компенсацию температурных перемещений и минимизирующую нагрузки на опорные конструкции. Эта проблема решается расстановкой и выбором типа опор, опорных частей и применением компенсаторов, воспринимающих эти перемещения.

По своему влиянию на систему опоры трубопроводов различаются количеством связей, накладываемых на трубопровод. На рис. 5.6 показаны основные применяемые типы отдельно стоящих опор. Опоры закрепляются к фундаментам с помощью анкерных болтов, размещение и конструкция которых зависят от принятого типа опоры.

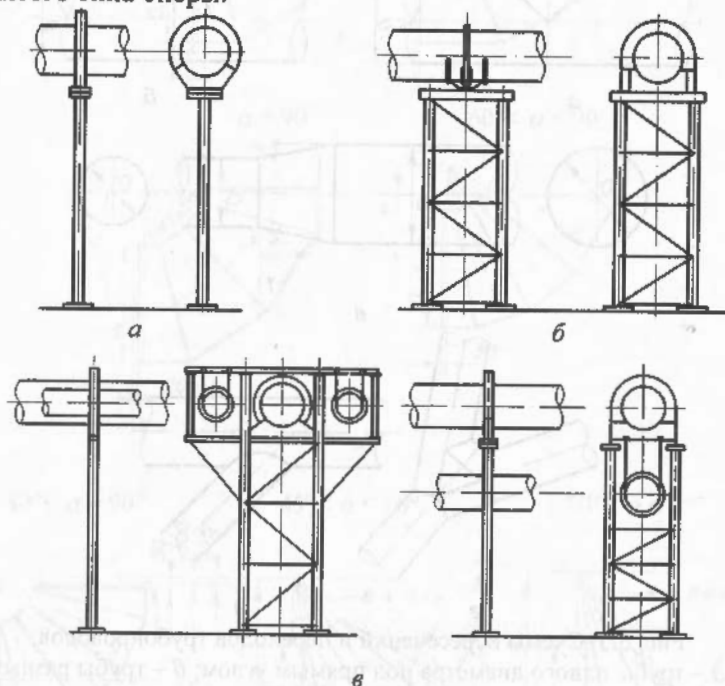


Рис. 5.6. Схемы опор трубопроводов:
а – маятниковая; б – пространственная неподвижная или скользящая; в – плоская промежуточная

В случаях относительно коротких опор, когда из-за защемления анкерными болтами не обеспечивается достаточная их податливость, или при гибкости ветвей менее 70 рекомендуется ветви опор опирать на фундамент через центрирующую планку на специальный лист, предусмотренный в фундаменте и установленный в строго горизонтальном положении. Такое решение приближает узел к шарнирному (рис. 5.7).

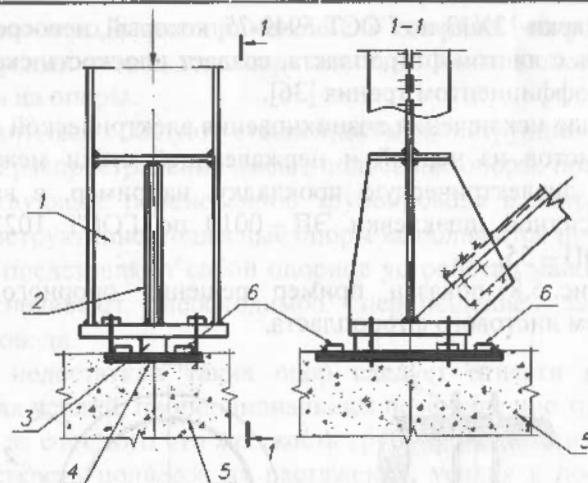


Рис. 5.7. Шарнирный узел опирания:

1 – ветвь опоры; 2 – прорезь в стенке; 3 – центрирующая планка;
4 – закладной элемент в фундаменте; 5 – фундамент; 6 – упоры

Возможно также устройство более определенного шарнира в виде узла с осью поворота, однако такой узел не нашел применения в отечественном проектировании. При необходимости создания опор более высокой гибкости, их можно проектировать рамной конструкции, так как в этом случае их податливость выше, чем решетчатых.

Опираются трубопроводы через специальные опорные части, которые бывают неподвижными и подвижными. Подвижные опорные части, устанавливаемые только на пространственные опоры, обеспечивают перемещение трубопровода скольжением по плоскости соприкосновения (контакта) опорной части с опорой.

С целью снижения горизонтальных нагрузок на опоры и примыкающие конструкции от сил трения, вызванных скольжением трубопровода, для создания плоскости скольжения могут быть применены материалы с низким коэффициентом трения, например, листовой фторопласт сортов 1 и 2 (незакаленный) по ГОСТ 10007-80.

Для уменьшения сил трения и снижения нагрузок на опорные конструкции в таких опорных узлах предусматривают установку промежуточного листа из полированной нержавеющей стали,

например, марки 12Х13 по ГОСТ 5949-75, который, непосредственно соприкасаясь с листом фторопласта, создает плоскость скольжения с низким коэффициентом трения [36].

С целью исключения возникновения электрической пары при контакте листов из черной и нержавеющей стали между ними размещают диэлектрическую прокладку, например, в виде двух слоев эпоксидной шпаклевки ЭП-0010 по ГОСТ 10277-90 по грунтовке ЭП-55.

На рис. 5.8 показан пример решения опорного узла с применением листового фторопласта.

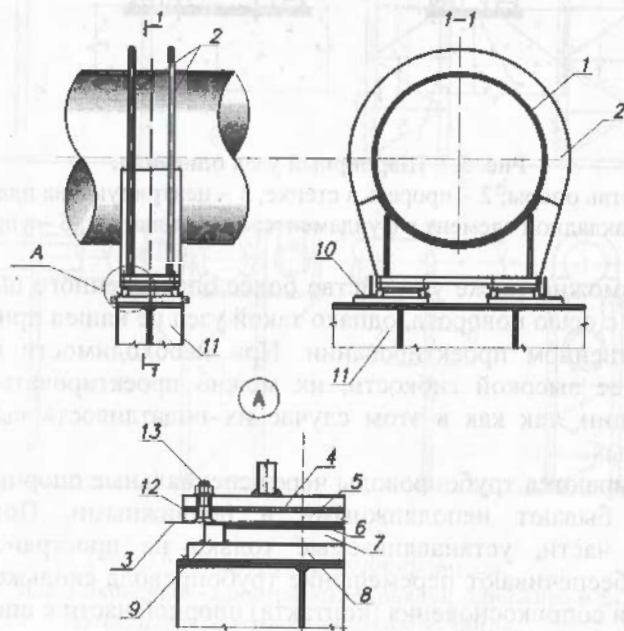


Рис. 5.8. Опорный узел с применением листового фторопласта:

- 1 – трубопровод; 2 – кольцевое ребро-шпангоут; 3 – плоскость скольжения; 4 – нижний лист седла трубопровода; 5 – лист из полированной нержавеющей стали; 6 – листовой фторопласт; 7, 8 – верхний и нижний опорные листы соответственно; 9 – упор от горизонтального смещения фторопласта; 10 – ограничители смещения; 11 – балка опоры трубопровода; 12 – диэлектрическая прокладка из эпоксидной шпаклевки; 13 – винт М12 «впотай»

Возможно также применение в опорных частях одно- или двухъярусных катков или шариков, что уменьшает силу трения и нагрузки на опоры.

Учитывая общую стесненность конструкций комплекса, широкое распространение имеют подвесные опоры, практически не препятствующие перемещению трубопровода в направлении его оси. Конструктивно подвесные опоры выполняются по-разному, но все они представляют собой опорное устройство малой жесткости и обеспечивают необходимое перемещение закрепляемого трубопровода.

К недостаткам таких опор следует отнести появление в подвесках усилий, пропорциональных перемещению трубопровода. Однако, за счет того что жесткость трубопровода на изгиб меньше, чем жесткость подвесок на растяжения, усилия в последних при перемещениях трубопровода выравниваются.

Наиболее простой является конструкция подвесной опоры-подвески в виде круглых тяжей. Верхние концы тяжей закрепляются на несущей конструкции, а нижние поддерживают подвешенный трубопровод. Трубопровод подвешивается за кольцевое ребро (рис. 5.9) или опирается на подвешенный полосовой элемент, так называемое «полотенце» (рис. 5.10). При подвеске за ребро обеспечивается четкая передача усилий и восприятие поперечных сил, а также сохранение контура поперечного сечения трубы.

Выполнение подвесными опорами своих функций определяется их гибкостью, зависящей, в основном, от соотношения длины подвесок и диаметра трубопровода. Оптимальная длина подвесок, как правило, должна быть не менее 1,5–2 диаметра подвешиваемого трубопровода.

При необходимости учета и компенсации незначительных перемещений трубопровода, связанных с перепадом температуры или возможностью его перемещений в вертикальной плоскости, в состав узла закрепления подвесок включают систему пружин, чаще всего – тарельчатых. При изменениях положения трубопровода они обеспечивают равномерное включение в работу всех подвесных опор.

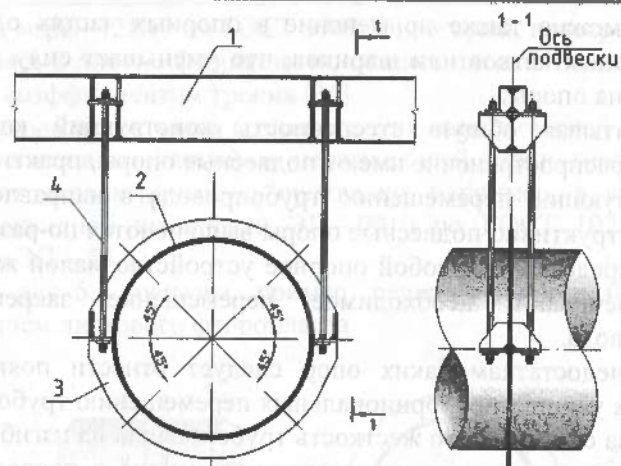


Рис. 5.9. Подвеска трубопровода через кольцевое ребро:

1 – опорная балка; 2 – трубопровод; 3 – кольцевое ребро (шпангоут);
4 – подвеска из круглой стали

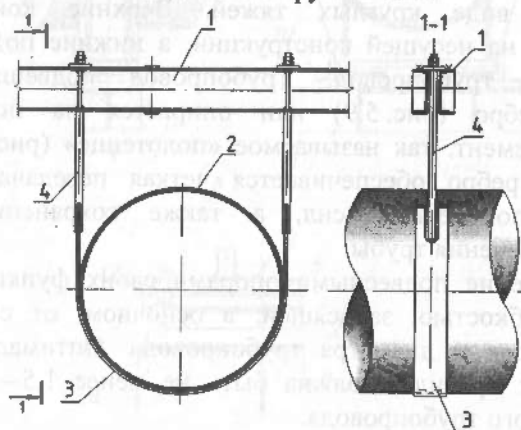


Рис. 5.10. Подвеска трубопровода через «полотенце»:

1 – опорная балка; 2 – трубопровод; 3 – «полотенце»;
4 – подвески из круглой стали

В месте передачи на трубопровод сосредоточенных нагрузок над опорами устанавливают опорные части, конструктивно выполненные в виде опорного седла, которое входит в состав опорного ребра (шпангоута). Они являются расчетными элементами

и могут быть одностенчатыми и двухстенчатыми. Ребра komponуют из отдельных кольцевых элементов, соединяемых равнопрочными швами. Сварные швы, приваривающие опорные ребра к трубопроводу, являются расчетными и должны быть равнопрочными. Опорные ребра привариваются к трубе с обеих сторон сплошным угловым швом.

Опорные ребра обеспечивают передачу всех видов нагрузки с трубопровода на опору и позволяют сохранить контур поперечного сечения трубопровода без изменений. Подробный расчет таких ребер изложен в [44].

Поскольку практически все трубопроводы комплекса доменной печи работают на несимметричную поперечную нагрузку, вызывающую деформацию контура поперечного сечения трубопровода, на трубопроводах диаметром 1000 мм и более устанавливают кольцевые ребра-шпангоуты, обеспечивающие сохранение контура поперечного сечения трубы. Это позволяет рассматривать ее как балку кольцевого сечения и не учитывать в расчете пространственный эффект, связанный с деформацией контура.

К промежуточным кольцевым ребрам, устанавливаемым с целью сохранения контура поперечного сечения, предъявляются менее жесткие требования, чем к опорным. Они могут выполняться одностенчатыми, размеры их принимаются по конструктивным соображениям, при этом допускаются стыки элементов ребер внахлестку, а также (при определенных условиях) односторонние или прерывистые швы, приваривающие ребра к трубопроводу.

§ 5.3. Технологическое оборудование

Трубопроводы комплекса снабжены большим количеством технологического оборудования, предназначенного для отключения их от агрегатов, измерения и регулирования параметров газовой среды и др. Это клапаны, задвижки, измерительные диафрагмы, дроссели и т.п.

Так, для отсечения воздухонагревателя от воздухопровода горячего дутья служит клапан горячего дутья, имеющий конструкцию шиберного типа. Клапан газовой горелки является отдельным для газопровода доменного газа, подающего в воздухонагреватель газ для нагрева. Дымовой клапан предназначен

для выпуска дыма из воздухонагревателя в дутьевом режиме. На воздухопроводе холодного дутья устанавливается клапан шиберного типа, который перекрывает воздухопровод при переводе воздухонагревателя на нагрев. Для быстрого прекращения подачи в воздухонагреватель холодного дутьевого воздуха при работающей воздуходувной машине предусмотрен воздушно-разгрузочный клапан «СНОРТ».

Размещение технологического оборудования определяется эксплуатационными требованиями к газо-воздухопроводам и увязывается с общими конструктивными решениями.

Технологическое оборудование соединяют с трубопроводами при помощи фланцев и бандажей (рис. 5.11) или приваркой встык. Фланцы прикрепляют к трубопроводу двумя угловыми швами. Согласно существующему положению все виды запорной арматуры и оборудования, имеющие штуцеры с фланцами для присоединения трубопроводов, поставляются с ответными фланцами. Исключение составляют листовые фланцы для присоединения листовых заглушек, изготавливаемых совместно с трубопроводами. Однако, в ряде случаев это положение нарушается, и в проекте металлоконструкций возникает необходимость проектирования ответных фланцев.

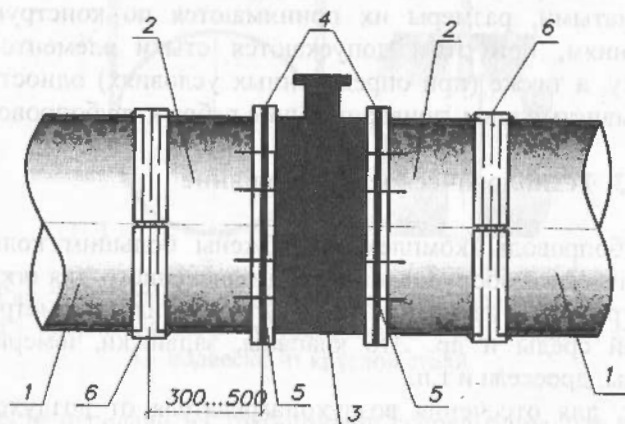


Рис. 5.11. Узел установки технологического оборудования:

- 1 – трубопровод; 2 – патрубки, примыкающие к оборудованию;
3 – оборудование; 4 – ответный фланец; 5 – фланцы оборудования;
6 – полубандажи

В местах установки оборудования, присоединяемого на фланцах, для удобства монтажа предусматриваются дополнительные монтажные стыки на бандажах на расстоянии 300...500 мм от фланца. Участки патрубков длиной 300...500 мм изготавливают на заводе металлоконструкций с незаваренным продольным швом. При монтаже незамкнутый патрубок вставляют во фланец, выверяют и приваривают к нему. После этого заваривают продольный шов патрубка и кольцевой стык на полубандажах.

Для смены технологического оборудования на трубопроводах устанавливают упоры для домкратов, с помощью которых трубопровод разжимают, что позволяет демонтировать оборудование (рис. 5.12).

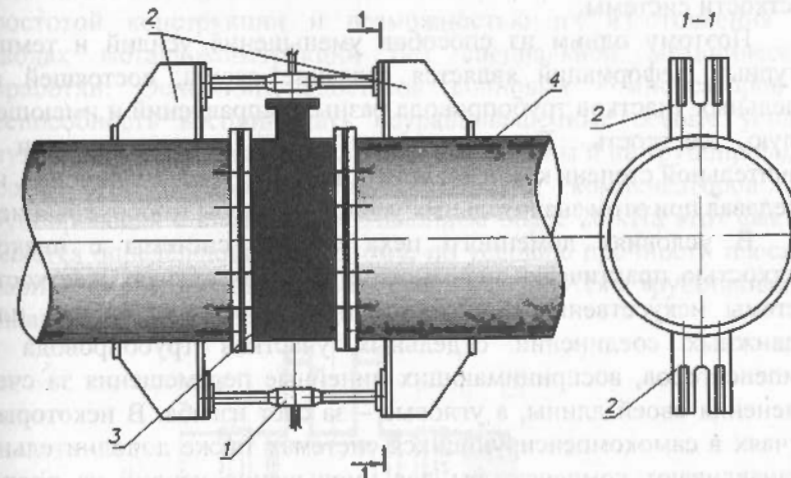


Рис. 5.12. Установка разжимных домкратов:

- 1 – домкрат; 2 – упоры; 3 – оборудование; 4 – трубопровод

§ 5.4. Уменьшение влияния температурных деформаций

При нагреве трубопровода на каждые 100°C изменения температуры длина его погонного метра увеличивается, а при остывании уменьшается на 1,2 мм. В то же время, компенсация температурных удлинений только за счет упругого сжатия материала возможна лишь в случаях изменения температуры в пределах до 30°C.

Одно из основных требований, предъявляемых к трубопроводным системам, состоит в ограничении усилий, действующих на опорные конструкции и примыкающее оборудование. В рационально запроектированной системе усилия, передаваемые на оборудование, не должны превышать значений, определяемых его техническими данными, а усилия, передаваемые на фундаменты опор, значений, дающих возможность их выполнения.

Напряжения и усилия, вызванные внешними нагрузками, эффективно регламентируются путем рационально размещенных и сконструированных опор. Усилия, вызванные температурными воздействиями, в значительной степени зависят от возможностей системы воспринимать температурные деформации, т.е. степенью жесткости системы.

Поэтому одним из способов уменьшения усилий и температурных деформаций является создание схемы, состоящей из отдельных участков трубопровода разных направлений и имеющей малую жесткость. Такие системы могут полностью или в значительной степени компенсировать температурные удлинения, не передавая при этом значительных усилий на опоры и оборудование.

В условиях доменной цеха создать системы с низкой жесткостью практически невозможно. В таких случаях жесткость системы искусственно понижается путем введения гибких или подвижных соединений отдельных участков трубопровода — компенсаторов, воспринимающих линейные перемещения за счет изменения своей длины, а угловые — за счет изгиба. В некоторых случаях в самокомпенсирующихся системах также дополнительно устанавливают компенсаторы для уменьшения усилий на опоры или примыкающее оборудование.

Компенсаторы, применяемые в трубопроводных системах комплекса доменной печи, можно классифицировать следующим образом:

- образуемые путем естественных или искусственных поворотов трассы — П-, Z- и Г-образные;
- осевого перемещения — волновые (дисковые, линзовые, сальфонные), сальниковые или в виде гибкой вставки;
- углового перемещения, сдвиговые — волновые (дисковые, линзовые, сальфонные) или в виде гибкой вставки.

Компенсаторы, образуемые изменением направления трассы, снижают жесткость системы и хорошо компенсируют температурные удлинения. Однако, они занимают много места на генеральном плане и требуют специальных опорных конструкций. Их применяют, как правило, для трубопроводов небольших диаметров — до 700 мм и для трубопроводов больших диаметров с внутренним давлением более 30 кПа.

Наиболее широко при проектировании трубопроводных систем применяют волновые компенсаторы в виде вставок в трубопроводы. Поскольку они имеют небольшую поперечную жесткость, то требуют постановки вблизи них опор.

Волновые дисковые компенсаторы (рис. 5.13) отличаются простотой конструкции и возможностью их изготовления на заводах металлоконструкций без специальной механической обработки. Основным недостатком волновых компенсаторов — неспособность воспринимать неуравновешенные осевые усилия внутреннего давления на последний диск волны и на трубопровод в месте его поворота. При установке компенсаторов на трубопроводах с внутренним давлением более 20 кПа этот фактор является определяющим. Поэтому, по условию прочности плоских сварных дисков такие компенсаторы применяются в трубопроводах с давлением до 20 кПа.

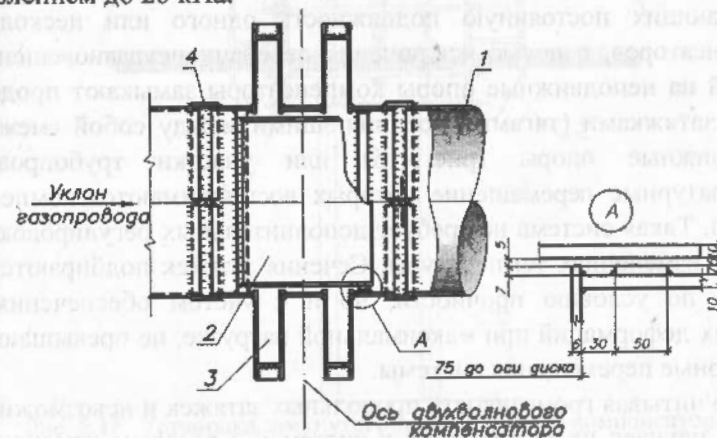


Рис. 5.13. Волновой дисковый компенсатор:

- 1 — трубопровод; 2 — внутренний патрубок; 3 — диск компенсатора; 4 — стыковые бандажы

В трубопроводах, работающих под давлением более 20кПа, по условиям прочности применяют компенсаторы с конфигурацией волн в виде линз-сильфонов, изготавливаемых на специализированных предприятиях (рис. 5.14).

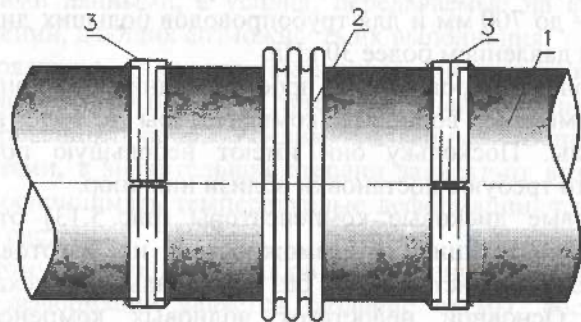


Рис. 5.14. Волновой сильфонный компенсатор:
1 – трубопровод; 2 – линзы компенсатора; 3 – стыковые бандаж

Неуравновешенные усилия в компенсаторах значительны и не могут быть восприняты волновыми компенсаторами при отсутствии неподвижных опор на трубопроводе.

При многократных систематических изменениях температуры, вызывающих постоянную подвижность одного или нескольких компенсаторов, с целью исключения передачи неуравновешенных усилий на неподвижные опоры компенсаторы замыкают продольными затяжками (тягами), соединяющими между собой смежные неподвижные опоры (рис. 5.15) или участки трубопровода, температурные перемещение которых воспринимаются компенсаторами. Такая система не требует дополнительных регулировок при любых изменениях температуры. Сечения затяжек подбираются не только по условию прочности, но и с учетом обеспечения их упругих деформаций при максимальной нагрузке, не превышающих суммарные перемещения системы.

Учитывая громоздкость продольных затяжек и невозможность в ряде случаев их размещения в системах с разовым изменением температуры, например, разогрев при пуске, могут устанавливаться замкнутые компенсаторы (рис. 5.16). По окончании разогрева после спадывания компенсатора можно его замкнуть системой коротких

болтов. При больших изменениях температур (например, остановка на ремонт) болты должны быть ослаблены. Перемещения, вызванные суточными, сезонными и небольшими технологическими перепадами температур, могут восприниматься системой пружинных шайб, устанавливаемых в таких случаях под гайками болтов.

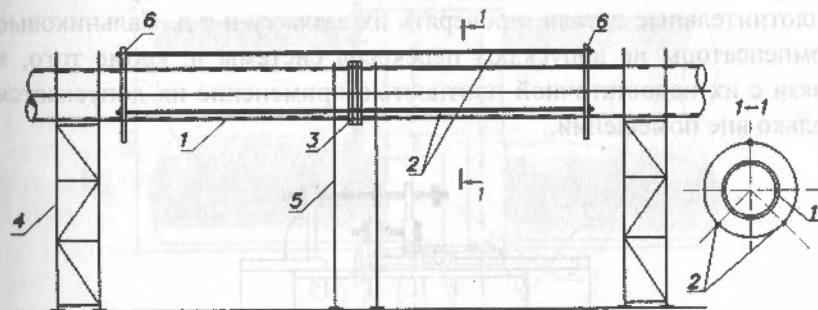


Рис. 5.15. Установка нерегулируемого компенсатора:
1 – трубопровод; 2 – продольные тяги; 3 – компенсатор;
4 – неподвижные опоры; 5 – плоские опоры; 6 – опорные элементы тяг

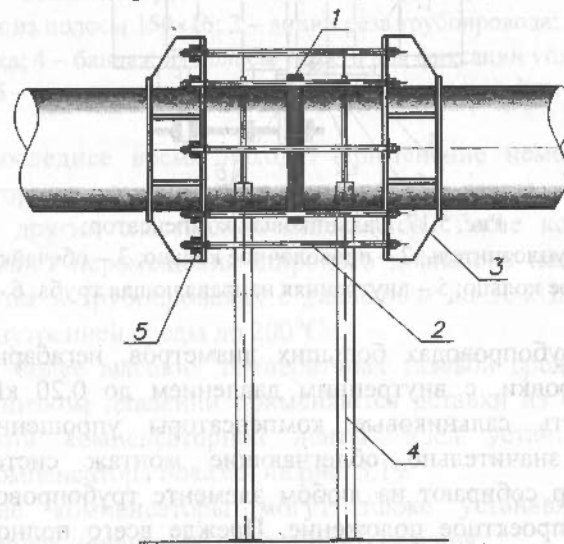


Рис. 5.16. Установка замкнутого регулируемого компенсатора:
1 – компенсатор; 2 – стяжные болты; 3 – опорные ребра болтов;
4 – опоры трубопровода; 5 – блоки пружин

Конструкция сальниковых компенсаторов основана на принципе телескопической подвижности (рис.5.17). Наиболее простые и распространенные компенсаторы такого типа – скользящие, с сальниковыми уплотнителями. Компенсаторы требуют постоянного ухода, так как необходимо менять отработанные уплотнительные детали, проверять их затяжку и т.д. Сальниковые компенсаторы не допускают перекосов системы и, кроме того, в связи с их недостаточной плотностью применение их допускается только вне помещений.

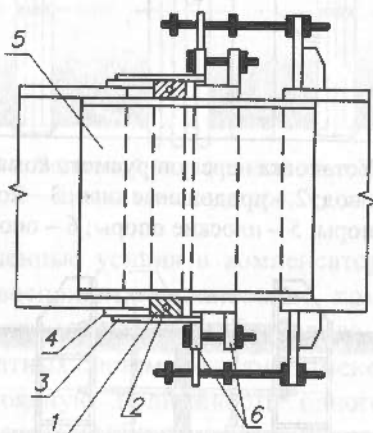


Рис. 5.17. Сальниковый компенсатор:

- 1 – уплотнитель; 2 – проволочное кольцо; 3 – обечайка;
4 – запорное кольцо; 5 – внутренняя направляющая труба; 6 – фланцы

На трубопроводах больших диаметров, негабаритных для транспортировки, с внутренним давлением до 0,20 МПа можно устанавливать сальниковые компенсаторы упрощенного типа (рис.5.18), значительно облегчающие монтаж системы [45]. Компенсатор собирают на любом элементе трубопровода до его подъема в проектное положение. Прежде всего полностью размечают компенсатор и приваривают бандажи. После этого устанавливают внешнюю обечайку (заранее свальцованное и сваренное кольцо), забивают уплотнение из смоляных канатов до

герметизации и устанавливают запирающий фланец. В таком виде монтажный элемент с полностью собранным компенсатором устанавливают в проектное положение. После закрепления трубопровода на опорах вырезают изнутри трубы полосу шириной 300 мм по линиям реза.

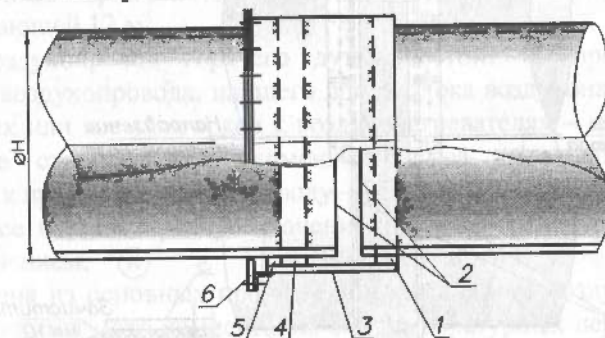


Рис. 5.18. Упрощенный сальниковый компенсатор для негабаритных трубопроводов:

- 1 – бандаж из полосы 150×16; 2 – линии реза трубопровода; 3 – внешняя обечайка; 4 – бандаж из полосы 100×10 для фиксации уплотнения;
5 – уплотнительная набивка; 6 – запирающий фланец

В последнее время находят применение неметаллические компенсаторные вставки из транспортной ленты, силиконовой резины и других эластичных материалов. Такие компенсаторы воспринимают перемещения широкого диапазона направлений и применяются в трубопроводах с давлением до 30 МПа и с температурой внутренней среды до 200°C.

При более высоких температурах газовой среды (до 400–600°C) и низком давлении применяются вставки из специальной жаростойкой компенсаторной ленты. Узел установки такого гибкого компенсатора показан на рис. 5.19.

Такие компенсаторы могут также устанавливаться на трубопроводах некруглого поперечного сечения.

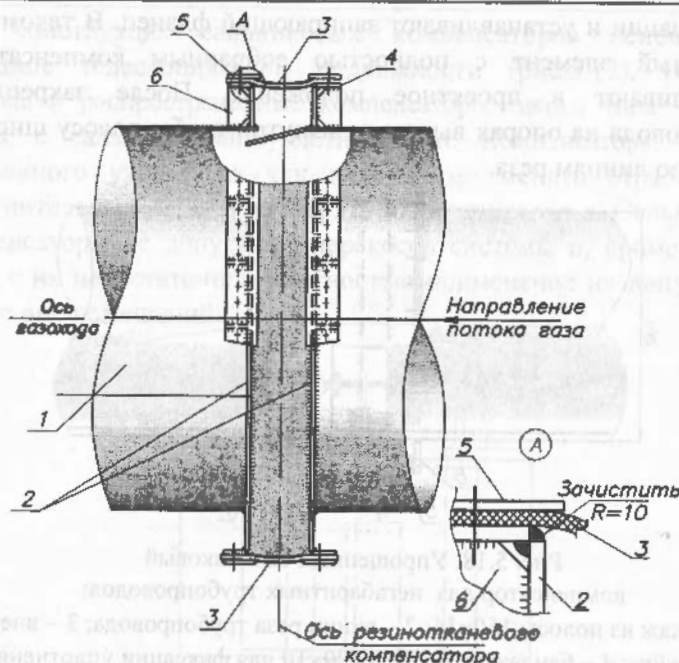


Рис. 5.19. Гибкий компенсатор:

- 1 – трубопровод; 2 – кольцевые ребра жесткости; 3 – гибкая вставка;
4 – фланцы крепления гибкой вставки; 5 – прижимное кольцо;
6 – ребра жесткости

§ 5.5. Воздухопровод горячего дутья

Воздухопровод горячего дутья предназначен для транспортирования горячего воздуха из воздушонагревателей в доменную печь. По своему расположению он делится на два участка – кольцевой и прямой. К кольцевому относят воздухопровод, расположенный вокруг доменной печи и соединенный с фурменными приборами, к прямому – участок воздухопровода, проходящий вдоль блока воздушонагревателей до кольцевого воздухопровода.

В связи с высокой температурой горячего воздуха воздухопровод футеруется несколькими слоями огнеупорного кирпича, термическое расширение которых компенсируется деформационным слоем из асбестового картона, расположенным между ними и стенкой трубы.

Толщина стенки прямого воздухопровода горячего дутья определяется расчетом и принимается, как правило, не менее 20 мм. Лист валцуется в секции длиной, соответствующей ширине проката, обычно до 2000 мм и затем секции собираются в отправочные марки длиной, допускающей их транспортировку и не превышающей 12 м.

Воздухопровод горячего дутья состоит из протяженного участка воздухопровода, идущего вдоль блока воздушонагревателей, и прямых или косых отводов к воздушонагревателям – штуцеров. В практике строительства применяются два типа подключения отводов к прямому воздухопроводу – боковое и нижнее. В последнее время все большее распространение получили отводы с нижним подключением.

Одна из основных проблем при компоновке воздухопровода горячего дутья – это компенсация его температурных перемещений, что в большой степени обеспечивает прочность конструкций и их надежную эксплуатацию. При стандартной компоновке блока воздушонагревателей общая стесненность, насыщенность оборудованием, увеличенная жесткость колен и углов поворота воздухопровода, связанная с наличием футеровки, в значительной степени ограничивают возможность перемещений и деформирования контура поперечного сечения колен воздухопровода.

Учитывая, что температура стенки трубы воздухопровода достигает 100°C и более, в период эксплуатации неизбежно происходит перемещение воздухопровода частично за счет подвижных опор, выполняемых обычно на подвесках или на скользящих опорных частях, и податливости кожухов воздушонагревателей в местах врезки штуцеров. Несмотря на это, перемещение прямого воздухопровода и рост кожуха воздушонагревателя при его нагреве приводят к деформации штуцеров в месте примыкания их к кожуху, вызывая местные повреждения и появление трещин, заклинивание клапанов горячего дутья, а также к смещению кольцевого воздухопровода с оси печи, что усложняет эксплуатацию фурменных приборов.

Оптимальным решением данной проблемы является снижение общей жесткости системы путем установки компенсаторов. Из-за достаточно сложной конструкции компенсаторов воздухопровода и

их футеровки в отечественном домностроении такое решение длительное время практически не применялось.

Интенсификация технологического процесса, рост эксплуатационных параметров и связанное с этим увеличение толщины кожухов воздухонагревателей еще больше повысили жесткость системы и, соответственно, затруднили работу воздухопровода горячего дутья. По этой причине при строительстве и реконструкции доменных печей стали использовать схемы воздухопровода горячего дутья с компенсаторами, устанавливаемыми не только на прямом воздухопроводе, но и на отводах к воздухонагревателям — штуцерах.

На рис. 5.20 показана одна из возможных схем воздухопровода горячего дутья, в которой перемещения всех направлений воспринимаются системой компенсаторов. Неуравновешенные усилия давления дутьевого воздуха передаются на систему продольных элементов — затяжек. Учитывая деформирование во время эксплуатации системы в пространстве и связанные с этим перемещения воздухопровода в различных направлениях, компенсаторы, размещенные на прямом воздухопроводе и на штуцерах, должны обеспечить осевые и угловые (сдвиговые) перемещения системы.

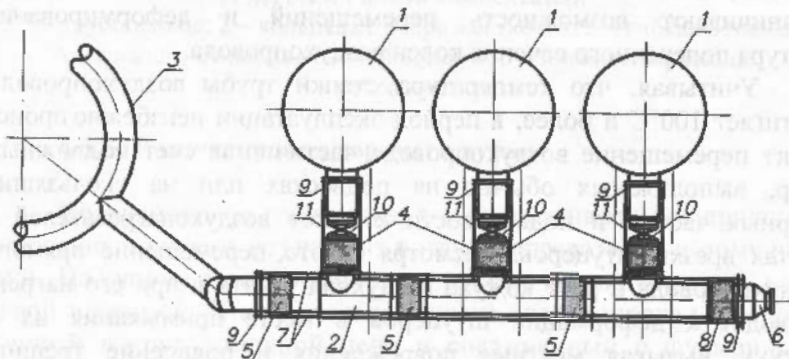


Рис. 5.20. Схема воздухопровода горячего дутья:

- 1 — воздухонагреватели; 2 — прямой воздухопровод горячего дутья;
- 3 — кольцевой воздухопровод; 4 — сильфонные компенсаторы на соединительных штуцерах; 5 — сильфонные компенсаторы на прямом воздухопроводе; 6 — хвостовик; 7 — продольные тяги; 8 — сильфонный компенсатор перемещения тяг; 9 — ребра для крепления тяг; 10 — клапаны горячего дутья; 11 — тяги на штуцерах

Компенсаторы, установленные на штуцерах, воспринимают осевые перемещения на длине штуцера, сдвиговые перемещения в горизонтальной плоскости от осевого смещения прямого воздухопровода и также компенсируют рост кожуха воздухонагревателя при его разогреве и эксплуатации. Этим минимизируются нагрузки на кожух воздухонагревателя в месте врезки штуцера и на клапаны горячего дутья, что позволяет исключить их перекося. Кроме того, компенсаторы должны обеспечить возможность разжима фланцевых соединений для замены уплотнителя (купорки) и, при необходимости, демонтажа и замены шибера горячего дутья.

Компенсаторы, установленные на прямом воздухопроводе, воспринимают осевые перемещения от термического расширения участка воздухопровода и сдвиговые перемещения от воздействий штуцера горячего дутья.

Компенсаторы решены в виде волновых сильфонных вставок, волны которых способны воспринимать нагрузку от внутреннего давления, а также осевые и сдвиговые перемещения. Необходимая расчетная компенсирующая способность компенсаторов зависит от компоновочной схемы воздухопровода горячего дутья, количества и расположения компенсаторов и опор. Для приведенной схемы она находится в следующих пределах: сжатие или растяжение 20 — 50 мм, сдвиг — 20 — 50 мм.

При определении требуемой компенсирующей способности компенсаторов, устанавливаемых на штуцерах горячего дутья, кроме величины температурных перемещений следует учитывать еще и необходимость образования зазора для смены уплотнителя, так называемой «купорки», и замены шибера горячего дутья. Поскольку замена «купорки», как и шибера, выполняется на горячем штуцере, когда все расчетные температурные перемещения скомпенсированы и расчетные зазоры «выбраны», должна быть предусмотрена возможность дальнейшего деформирования компенсатора при механическом разжиге фланцев домкратами для образования зазора, позволяющего установить новую «купорку». В большинстве случаев величина этого дополнительного зазора составляет 20 — 30 мм.

Для обеспечения работы компенсаторов эти дополнительные зазоры должны быть зарезервированы в их расчетной компенсирующей способности.

Особое внимание необходимо обратить на проектное обеспечение компенсирующей способности футеровки и высококачественное ее выполнение.

Продольные усилия от неуравновешенного внутреннего давления на торцы трубы и на крайние волны компенсатора в связи с отсутствием неподвижных опор передаются на систему затяжек, расположенных вдоль воздухопровода. Обычно система состоит из четырех затяжек, симметрично расположенных по окружности вокруг воздухопровода (рис. 5.21).

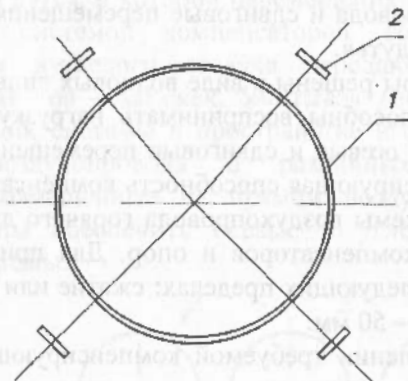


Рис. 5.21. Расположение тяг:
1 – воздухопровод; 2 – тяги

При определении поперечного сечения затяжек кроме условий прочности следует обеспечить их упругое удлинение под нагрузкой, не превышающее компенсирующую способность компенсаторов. Величина этого упругого удлинения при максимальных усилиях должна быть учтена в расчетной компенсирующей способности компенсаторов.

Затяжки в зависимости от конструкции узлов могут быть выполнены круглого сечения диаметром 100 – 130 мм или в виде прямоугольной полосы эквивалентной площади. Возможный узел крепления круглой затяжки показан на рис. 5.22, а, а листовой затяжки – на рис. 5.22, б. Пример монтажного стыка такой затяжки

– на рис. 5.23. Учитывая значительную протяженность затяжек, для поддержания их собственной массы по длине воздухопровода располагают локальные опоры (рис. 5.24).

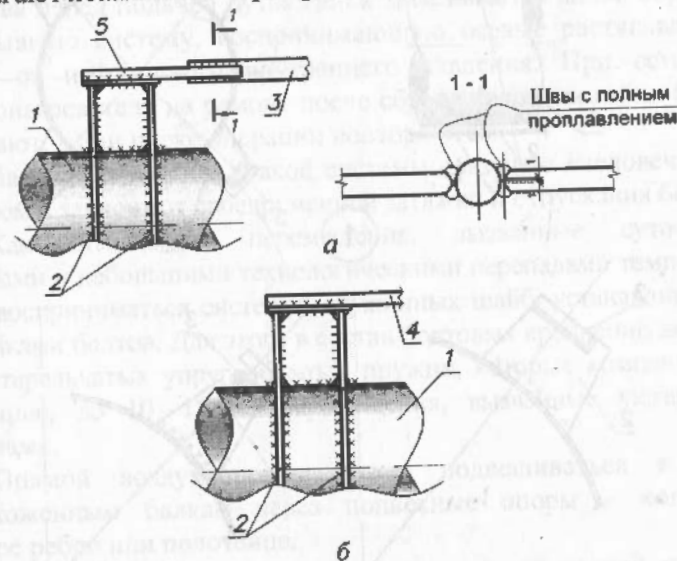


Рис. 5.22. Узел крепления тяг:

а – крепление круглых тяг; б – то же плоских тяг;
1 – трубопровод; 2 – кольцевые ребра для закрепления тяг; 3, 4 – круглая и плоская тяги соответственно; 5 – переходной плоский элемент

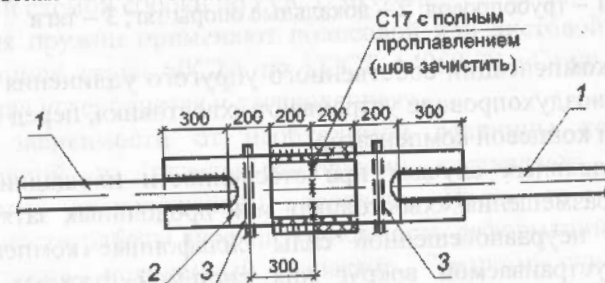


Рис. 5.23. Узел стыка круглых тяг:

1 – круглая тяга; 2 – стыковочный элемент;
3 – локальная опора тяги

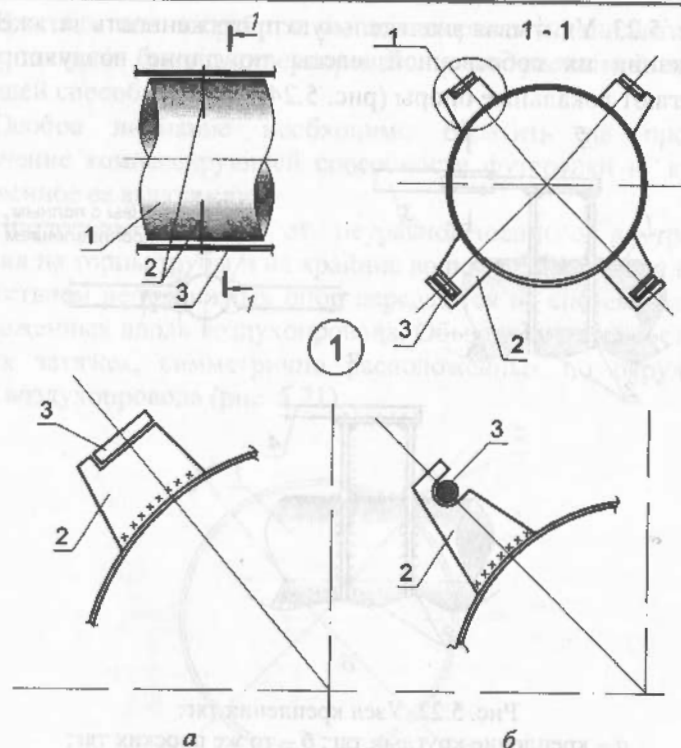


Рис. 5.24. Узлы опирания тросов по длине трубопровода:
а – форма локальной опоры для плоской тяги; б – то же для круглой;
1 – трубопровод; 2 – локальные опоры тросов; 3 – тяги

Для компенсации собственного упругого удлинения затяжек на прямом воздухопроводе устраивают «хвостовик», перед которым расположен концевой компенсатор.

В отдельных случаях при стесненности площадки, невозможности размещения «хвостовика» или продольных затяжек для восприятия неуравновешенной силы сильфонные компенсаторы замыкают устраиваемой вокруг них системой стяжных болтов. Такие компенсаторы не могут в автоматическом режиме в циклах «нагрев» и «дутье» компенсировать температурные перемещения, так как при затянутых болтах исчезает их компенсирующая способность в осевом направлении, а при отпущенных болтах не воспринимаются неуравновешенные усилия.

Поэтому в период разогрева гайки болтов не затягивают, чтобы волны компенсатора могли перемещаться. По окончании разогрева перед подачей дутья гайки затягивают и вновь образуют непрерывную систему, воспринимающую осевые растягивающие усилия от избыточного внутреннего давления. При остановке воздухонагревателя на ремонт после сброса давления гайки болтов отпускают, а при пуске операции повторяются.

Надежность работы такой системы связана с «человеческим» фактором и зависит от своевременной затяжки и отпуска болтов.

Как отмечалось, перемещения, вызванные суточными, сезонными и небольшими технологическими перепадами температур, могут восприниматься системой пружинных шайб, устанавливаемых под гайками болтов. Для этого в состав болтовых креплений вводятся блоки тарельчатых упругообжатых пружин, которые компенсируют небольшие, до 10–15 мм, перемещения, вызванные указанными причинами.

Прямой воздухопровод может подвешиваться к выше расположенным балкам через подвесные опоры – кольцевое опорное ребро или полотенец.

На рис. 5.25 показан пример решения подвесной опоры с установленными пружинами.

В качестве пружин, как правило, используют пружины тарельчатого типа класса 1, исполнения 4, группы 1 с последовательной схемой сборки по ГОСТ 3057-90.

Для пружин применяют полосовой или листовой прокат из легированной стали 60С2А по ГОСТ 14959-79 «Сталь рессорно-пружинная углеродистая и легированная».

В зависимости от необходимой величины компенсации перемещений из отдельных пружин составляют наборы с различным расположением тарелок. Из-за геометрической нелинейности работы тарелки зависимость деформаций от усилий носит также нелинейный характер. Теоретические расчеты тарельчатых пружин достаточно сложны, так как их сферическая оболочка изменяет свою кривизну в процессе нагружения. Кроме того, при, казалось бы, незначительных отклонениях в размерах пружин, их жесткость может существенно отличаться, особенно при начальных деформациях в малых наборах.

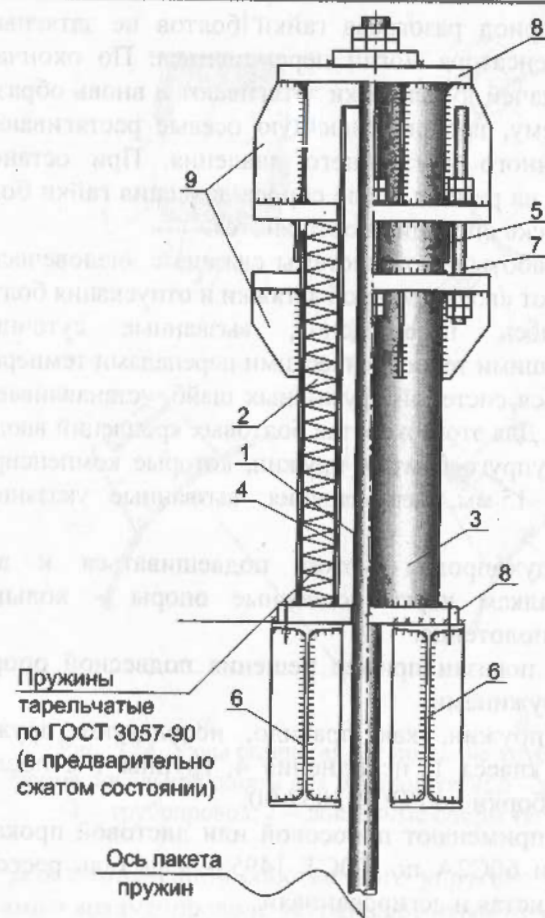


Рис. 5.25. Узел пружинной подвески трубопровода:

- 1 – подвеска; 2 – блок тарельчатых пружин; 3 – стакан для размещения пружин; 4 – направляющая трубка; 5 – защитное кольцо; 6 – опорные балки; 7 – стяжные шпильки; 8 – опорные плиты; 9 – ребра жесткости

Для практического расчета можно использовать методику, изложенную в приложении 1 к ГОСТ 3057-90.

В соответствии с требованиями ГОСТ 3057-90 пружины должны иметь защитное покрытие по ГОСТ 9.303-84 и ГОСТ 9.301-86.

При изготовлении комплект пружин предварительно напрягается упругим обжатием с последующим фиксированием этого положения специальными болтами. Такое положение пружин сохраняется во всех состояниях эксплуатации воздухопровода путем затяжки этих болтов при ремонтах, сменах оборудования и т.д. и ослаблением их перед очередной подачей горячего дутья.

Прямой воздухопровод может также опираться на ниже расположенные балки с применением скользящих опорных частей. В этом случае опорная реакция также передается через кольцевое опорное ребро-шпангоут (рис. 5.26). Такой узел опирания не требует компенсации неформализованных перемещений и установки пружин.

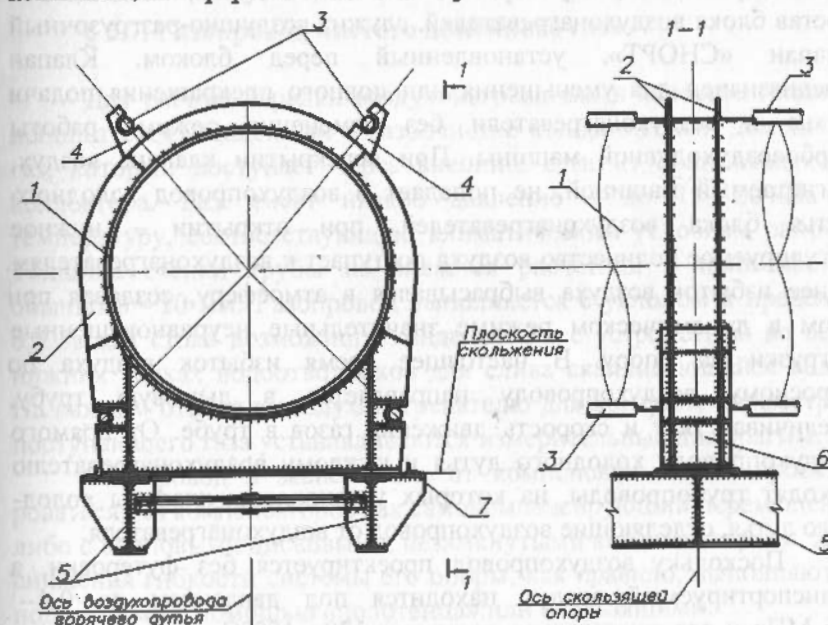


Рис. 5.26. Узел опоры воздухопровода:

- 1 – трубопровод; 2 – кольцевые ребра-шпангоуты; 3 – тяги; 4 – локальные опоры тяг; 5 – опорные балки; 6 – опорное седло; 7 – упоры

Для снижения горизонтальных сил трения от перемещений воздухопровода могут применяться опорные части с использованием материалов с низким коэффициентом трения.

Учитывая значительную высоту, на которой находится воздухопровод горячего дутья в здании воздухонагревателей, снижение сил трения может существенно уменьшить нагрузки на опорные конструкции. Поэтому применение таких материалов является предпочтительным.

§ 5.6. Воздухопровод холодного дутья

Воздухопровод холодного дутья транспортирует воздух от турбовоздуходувной машины ТЭЦ-ПВС до блока воздухонагревателей. Границей воздухопровода холодного дутья, входящего в состав блока воздухонагревателей, служит воздушно-разгрузочный клапан «СНОРТ», установленный перед блоком. Клапан предназначен для уменьшения или полного прекращения подачи дутья в воздухонагреватели без изменения режима работы турбовоздуходувной машины. При перекрытии клапана воздух, нагнетаемый машиной, не попадает в воздухопровод холодного дутья блока воздухонагревателей, при открытии – нужное регулируемое количество воздуха поступает к воздухонагревателям. Ранее избыток воздуха выбрасывался в атмосферу, создавая при этом в динамическом режиме значительные неуравновешенные нагрузки на опору. В настоящее время избыток воздуха по сбросному воздухопроводу направляется в дымовую трубу, увеличивая тягу и скорость движения газов в трубе. От прямого воздухопровода холодного дутья к каждому воздухонагревателю отходят трубопроводы, на которых установлены клапаны холодного дутья, отделяющие воздухопровод от воздухонагревателя.

Поскольку воздухопровод проектируется без футеровки, а транспортируемый воздух находится под давлением до 0,4–0,5 МПа и его температура достигает 120–150°C условия работы воздухопроводов холодного и горячего дутья схожи. Однако, воздухопровод холодного дутья, как правило, проектируется без компенсаторов, а его температурные перемещения компенсируются изменением направления трассы и его жесткостью. Отсутствие футеровки значительно снижает жесткость углов поворота и колен воздухопровода, что позволяет ему самокомпенсировать температурные перемещения. Опоры воздухопровода холодного дутья

обычно выполняются подвесными. В связи с небольшими опорными реакциями подвески могут быть выполнены без опорного ребра в виде полотенца, к которому закреплены опорные элементы.

Опора воздушно-разгрузочного клапана выполняется пространственной с неподвижным закреплением клапана.

Толщина стенки воздухопровода холодного дутья принимается обычно 10 мм, с увеличением в местах подключения отводов к воздухонагревателям до 12 мм. На конце воздухопровода холодного дутья устанавливаются заглушки, воспринимающие внутреннее давление. Размеры элементов заглушек определяются расчетом.

§ 5.7. Газопровод чистого доменного газа

Для работы горелки воздухонагревателя в качестве топлива используется очищенный в газоочистке колошниковый доменный газ, который поступает через внешние сети из общезаводского коллектора. Газ имеет низкое давление – до 15–20 кПа и температуру, соответствующую климатическим условиям района. Толщина стенки трубы не является расчетной и принимается обычно 8–10 мм. Газопровод выполняется с уклоном в пределах 0,5 % для стока возможного конденсата и с устройством во всех нижних точках водоотводчиков для слива скапливающейся воды. На каждом отводе к воздухонагревателю для контроля параметров поступающего газа устанавливаются измерительные диафрагмы.

Газопровод в зависимости от компоновки может проектироваться без компенсаторов как самокомпенсирующий перемещения либо с волновыми дисковыми, незамкнутыми компенсаторами. Для снижения гибкости системы его опоры, как правило, выполняются подвесными с помощью «полотенца» или скользящими.

§ 5.8. Дымопроводы

Продукты горения в виде дыма, удаляемые из воздухонагревателей через дымовые клапаны, направляются в специальный кирпичный боров, расположенный, как правило, ниже уровня земли, и далее – в вытяжную дымовую трубу, создающую общую тягу.

В последнее время на ряде доменных печей устанавливают металлический дымопровод, поднятый над поверхностью земли и расположенный на собственных опорах. В связи с возможностью выхода дыма с достаточно высокой эпизодической температурой – до 400°C, стенка дымопровода соответственно нагревается. Внутреннее давление в дымопроводе отсутствует, дым находится в состоянии незначительного разрежения, создаваемого естественной тягой дымовой трубы. В связи с этим толщина стенки трубы не является расчетной и принимается в соответствии с конструктивными соображениями в пределах 8–12 мм, в зависимости от диаметра дымопровода и расстояния между его опорами.

Учитывая достаточно высокую температуру стенки трубы и связанное с этим снижение предела текучести металла, при расстановке опор и расчете прочности дымопровода необходимо принимать дополнительные меры, обеспечивающие его прочность. При применении обычной углеродистой стали дымопровод целесообразно располагать на эстакаде с достаточно частым его опиранием. При расположении дымопровода на отдельно стоящих опорах расстояние между ними следует определять с учетом пониженного расчетного сопротивления материала трубы, применяя коэффициент условий работы оболочки дымопровода, примерно, $\gamma_c = 0,5$, что позволит избежать нештатных ситуаций при его нагреве. Возможно также применение сталей, более стойких к повышенным температурам типа 15ХСНД, специальных нержавеющих или хромистых, например, Х18Н10Т, 12Х13 и др.

В отдельных случаях дымопроводы футеруют, обеспечивая при этом максимальную температуру стенки не выше 100°C.

Для восприятия значительных температурных перемещений дымопровода устанавливают незамкнутые волновые компенсаторы, волны которых в связи с отсутствием внутреннего давления решаются в виде плоских дисков.

Согласно правилам охраны труда и техники безопасности поднятые над поверхностью земли горячие нефутерованные дымопроводы должны быть изолированы наружной поверхностной изоляцией.

§ 5.9. Воздухопровод воздуха горения

Работа газовых горелок воздухонагревателей предполагает централизованную подачу воздуха, обеспечивающего процесс горения. Воздух транспортируется от станции подачи воздуха горения с помощью специального воздухопровода, расположенного вдоль блока воздухонагревателей с отводами к каждой горелке. На каждом отводе устанавливаются измерительные диафрагмы для контроля количества поступающего воздуха.

Чтобы горелки работали продолжительное время, воздух должен быть достаточно чистым, с минимальным количеством пыли и других примесей, по этой причине его нередко берут из специального воздухозабора. Давление в воздухопроводе незначительное, близкое к атмосферному, существенного разрежения также нет. Поэтому толщина стенки трубы принимается конструктивно в пределах 6–8 мм.

Опорные реакции незначительны и воздухопровод, как правило, подвешивается к расположенным в этом районе несущим конструкциям с помощью плоского «полотенца».

Температурные перемещения воздухопровода воспринимаются незамкнутыми дисковыми компенсаторами.

§ 5.10. Установки утилизации тепла

Одной из задач повышения экономической эффективности воздухонагревателей и энергосбережения является использование тепла отработанных нагретых газов. Отходящие после цикла нагрева воздухонагревателя дымовые газы, имеющие при нормальном режиме температуру до 250–270°C, обычно направляются в дымовую трубу для выброса в атмосферу.

Отбор тепла этих дымовых газов и использование его в технологическом цикле весьма перспективно с точки зрения интенсификации процесса без затрат на другие источники топливного сырья. Однако, в связи со сложностью решения ряда технических проблем системы утилизации не нашли своего применения.

В последние годы для отдельных доменных печей разработаны и успешно внедрены в эксплуатацию установки утилизации тепла, использующие тепло отходящих дымовых газов

для нагрева компонентов технологического процесса – газа и воздуха горения перед подачей их в воздухонагреватели.

Технологически проблема решается путем установки специальных теплообменников. По этой схеме отходящие от воздухонагревателей дымовые газы с температурой около 270°C поступают по трубопроводам в теплообменник доменного газа и нагревают поступающий туда из заводского коллектора газ до температуры около 180°C . Одновременно отходящие дымовые газы поступают в теплообменник для подогрева воздуха горения и нагревают поступающий туда от станции подачи воздуха горения холодный воздух также до температуры около 180°C . Затем нагретые газ и воздух подаются в газовую горелку воздухонагревателя.

Дымовые газы после отдачи тепла направляются в дымовую трубу для выброса в атмосферу. При необходимости отключения теплообменников дымовые газы направляются прямо в дымовую трубу, минуя установку утилизации.

Конструктивно установка представляет собой достаточно сложную систему трубопроводов, соединяющих дымопровод, теплообменники, дымовую трубу, газопровод доменного газа и воздухопровод воздуха горения.

Учитывая связанную со стесненностью компоновки значительную жесткость системы, работающей в условиях высоких температур, трубопроводы снабжены большим количеством дисковых компенсаторов, которые воспринимают ее температурные перемещения. Система опор трубопроводов и типы их креплений в сочетании с компенсаторами выбираются с учетом ограниченной возможности передачи значительных горизонтальных усилий на конструкции теплообменников.

В связи с этим для снижения жесткости системы трубопроводы предпочтительно опирать на опоры скользящего типа.

Газопровод доменного газа и воздухопровод воздуха горения после теплообменника, а также дымопровод до теплообменника выполняют изолированными.

Установленная на трубопроводах запорная арматура регулирует поступление дымовых газов в теплообменники и в дымовую трубу.

ГЛАВА 6 ТРУБА ДЛЯ ВЗЯТИЯ ПЕЧИ «НА ТЯГУ»

§ 6.1. Назначение, компоновка

Труба для взятия печи «на тягу» предназначена для быстрой продувки и охлаждения внутреннего объема доменной печи перед проведением ремонтных работ. Технологический процесс удаления из печи горячих газов и воздуха происходит за счет естественной тяги установки.

Ранее для создания такой тяги использовался ближайший к печи воздухонагреватель. Однако после проведения ряда продувок было обнаружено оплавление и образование трещин футеровки из-за быстрого ее охлаждения. При дальнейшей эксплуатации воздухонагревателя через трещины проходил горячий воздух, вызывая перегревы металла кожуха, что, в конечном итоге, выводило воздухонагреватель из строя.

В связи с этим для организации быстрого охлаждения внутреннего объема печи и возможности доступа персонала для ремонтных работ внутри доменной печи стали устанавливать отдельную вытяжную трубу, высотой, обеспечивающей за счет естественной тяги необходимое разрежение.

§ 6.2. Основные конструктивные решения

Труба для взятия печи «на тягу» входит в общую систему воздухопровода горячего дутья и соединена с ним специальным подводящим отводом, на котором установлен шибер. При решении общей системы воздухопровода горячего дутья с компенсаторами на отводе воздухопровода к трубе постановки печи «на тягу» также устанавливается компенсатор. Общая компоновочная схема зависит от места расположения трубы и условий генерального плана. Один из примеров компоновки показан на рис. 6.1. Вытяжная труба соединена с прямым воздухопроводом горячего дутья специальным подводящим воздухопроводом, снабженным шиберной задвижкой, открывающей и закрывающей подачу воздуха в трубу, и компенсатором. Узел входа подводящего воздухопровода в трубу располагается на уровне воздухопровода горячего дутья.

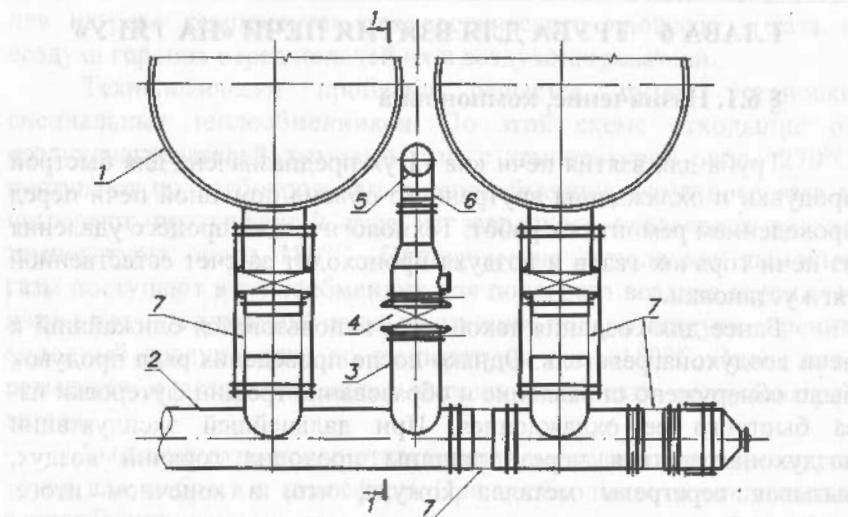


Рис. 6.1. Схема расположения трубы для взятия печи «на тягу»:

- 1 – воздухонагреватели; 2 – прямой воздухопровод горячего дутья;
3 – отвод к трубе взятия печи на «тягу»; 4 – клапан горячего дутья;
5 – труба для взятия печи «на тягу»; 6 – компенсатор на отводе
к трубе взятия печи на «тягу»; 7 – компенсаторы на прямом
воздухопроводе горячего дутья и на штуцерах

Жесткая связь подводящего воздухопровода с общей системой воздухопровода горячего дутья при отсутствии компенсаторов приводит к значительным усилиям, передающимся через узлы опирания трубы на фундамент и на горизонтальные связи. Поэтому при размещении трубы следует предусматривать возможность установки на подводящем воздухопроводе компенсатора осевых и угловых перемещений. При проектировании прямого воздухопровода горячего дутья и отводов к воздухонагревателям с компенсаторами система в целом становится более гибкой и может воспринять температурные перемещения.

Конструктивно труба для взятия печи «на тягу» решается в большинстве случаев как отдельно стоящая самонесущая конструкция. Она опирается стволом на фундамент и закрепляется горизонтальными связями к расположенным рядом конструкциям эстакады блока воздухонагревателей, доменной печи и т.п. (рис.6.2).

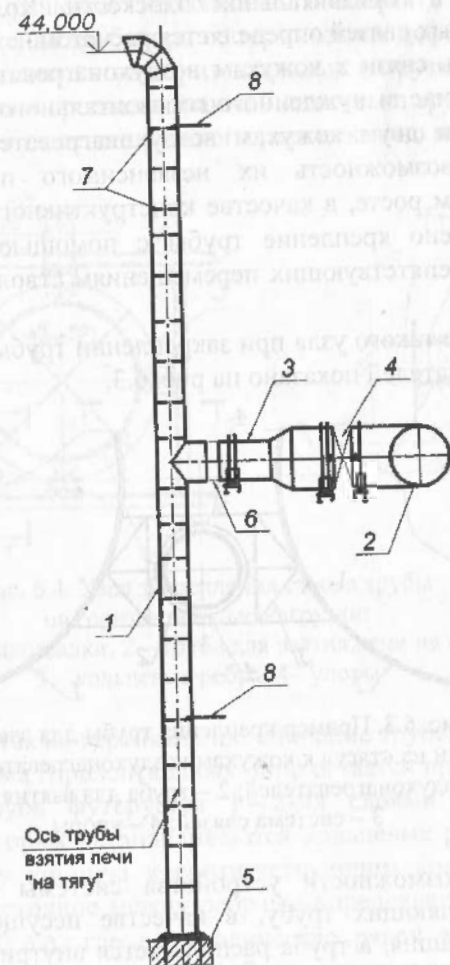


Рис. 6.2. Установка с отдельно стоящей трубой:

- 1 – труба; 2 – прямой воздухопровод горячего дутья; 3 – отвод к трубе
взятия печи на «тягу»; 4 – клапан горячего дутья; 5 – фундамент;
6 – компенсатор; 7 – ребра для опирания футеровки; 8 – уровни
горизонтальных связей

При решении трубы в виде самонесущей конструкции необходимо предусмотреть место для ее расположения и возможного

закрепления в горизонтальной плоскости. Количество уровней горизонтальных связей определяется расчетом.

Крепить связи к кожухам воздухонагревателей не рекомендуется. В случае вынужденного горизонтального крепления трубы к одному или двум кожухам воздухонагревателей следует предусмотреть возможность их независимого перемещения при температурном росте, в качестве конструктивного решения может быть применено крепление трубы с помощью горизонтальных упоров, не препятствующих перемещениям ствола в вертикальной плоскости.

Решение такого узла при креплении трубы к двум кожухам воздухонагревателей показано на рис. 6.3.

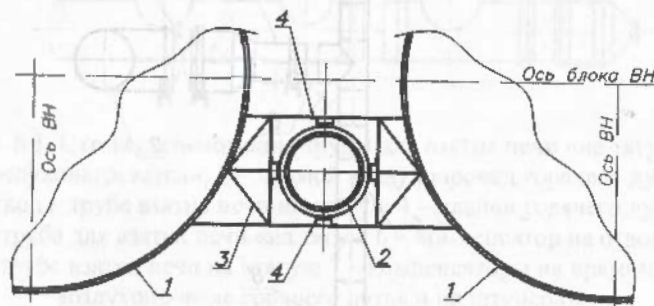


Рис. 6.3. Пример крепления трубы для взятия печи на «тягу» к кожухам воздухонагревателей:

1 – кожухи воздухонагревателей; 2 – труба для взятия печи на «тягу»;
3 – система связей; 4 – упоры

При невозможности устройства системы горизонтальных связей, закрепляющих трубу, в качестве несущей конструкции используется башня, а труба располагается внутри нее. При таком компоновочном решении вертикальные и горизонтальные опоры трубы располагаются на конструкциях башни и труба на фундамент может не опираться.

Вертикальное опирание трубы при такой схеме выполняется на балках площадок на одном из уровней башни, а закрепления на горизонтальные нагрузки от воздействия ветра и усилий температурного расширения располагаются по высоте башни на расстояниях, определяемых расчетом. Дополнительных горизонтальных связей к смежным конструкциям не требуется.

При таком решении необходимо обеспечить возможность свободного скольжения трубы при ее термических деформациях. Для этого трубы закрепляются на горизонтальные нагрузки с помощью упоров, допускающих проскальзывание в них ствола трубы.

Конструктивное решение такого узла показано на рис. 6.4 [76].

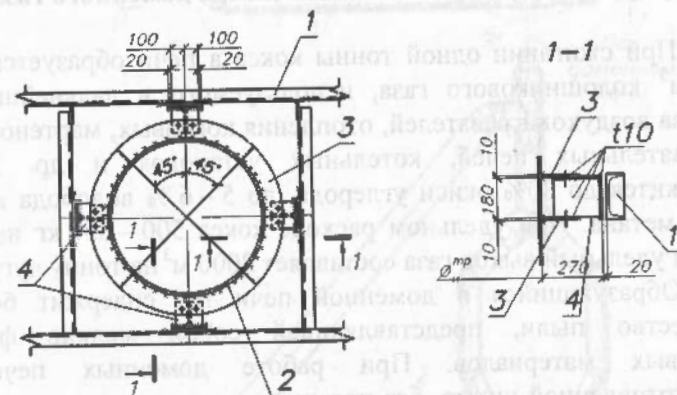


Рис. 6.4. Узел крепления ствола трубы на горизонтальные нагрузки:

1 – балка площадки; 2 – труба для взятия печи на «тягу»;
3 – кольцевые ребра; 4 – упоры

Возможно также вертикальное опирание трубы на отдельный фундамент, а схема горизонтальных опор остается прежней.

Внутри труба футеруется 1–2-мя слоями кирпича, для поддержания которых устанавливаются кольцевые ребра с шагом, кратным размеру кирпича и соответствующим количеству швов между ними. Расстояние между ребрами определяется по формуле $L_{\text{кр}} \approx n(K + 2) + 10 + \Delta$, где n – количество рядов кирпича между ребрами; K – толщина кирпича, мм; 2 – толщина шва между рядами кирпича, мм; 10 – толщина ребра, мм; Δ – компенсационный зазор (принимается 10–15 мм), и не должно превышать 1800–2000 мм. При большем расстоянии футеровка создает чрезмерную нагрузку, которую плоским ребром воспринять невозможно. Поскольку монтаж трубы, как правило, осуществляется вместе с футеровкой обязательно устанавливаются ребра на расстоянии не более 200 мм от концов монтажных марок трубы.

ГЛАВА 7 ОТВОД ИЗ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ КОЛОШНИКОВОГО ГРЯЗНОГО ДОМЕННОГО ГАЗА И ГРУБАЯ ЕГО ОЧИСТКА

§ 7.1. Технологическая схема отвода доменного газа

При сжигании одной тонны кокса в печи образуется около 5000 м^3 колошникового газа, используемого в дальнейшем для нагрева воздухонагревателей, отопления коксовых, мартеновских и нагревательных печей, котельных установок и др. В нем содержится до 30% окиси углерода, до 5–6% водорода и около 0,5% метана. При удельном расходе кокса 500–550 кг на тонну чугуна удельный выход газа составляет 2000 м^3 на тонну чугуна.

Образуемый в доменной печи газ содержит большое количество пыли, представляющей собой мелкие фракции шихтовых материалов. При работе доменных печей на неподготовленной шихте, без повышения давления газа в рабочем пространстве, содержание пыли в газе составляет 50–60 г/м³, а иногда достигает 100 г/м³. Использование такого загрязненного газа приводит к снижению теплоты его сгорания, ускорению износа агрегатов. Подготовка шихты к плавке, уменьшение скорости газа при повышении его давления на колошнике снижают содержание пыли в газе до 15–30 г/м³.

Для устранения отрицательного воздействия пыли и возможности использования газа в качестве топлива его предварительно очищают в специальных пылеулавливающих агрегатах.

Скапливающийся в районе купола печи газ через систему вертикальных и нисходящих газопроводов грязного доменного газа отводится в пылеуловитель, входящий в комплекс сооружений центрального узла доменной печи (рис. 7.1), где происходит первая грубая очистка газа сухим способом до содержания в нем пыли не более 1–3 г/м³.

После пылеуловителя газ направляется по газопроводу в аппараты отдельного блока газоочистки на дальнейшую полутонкую и тонкую очистку.

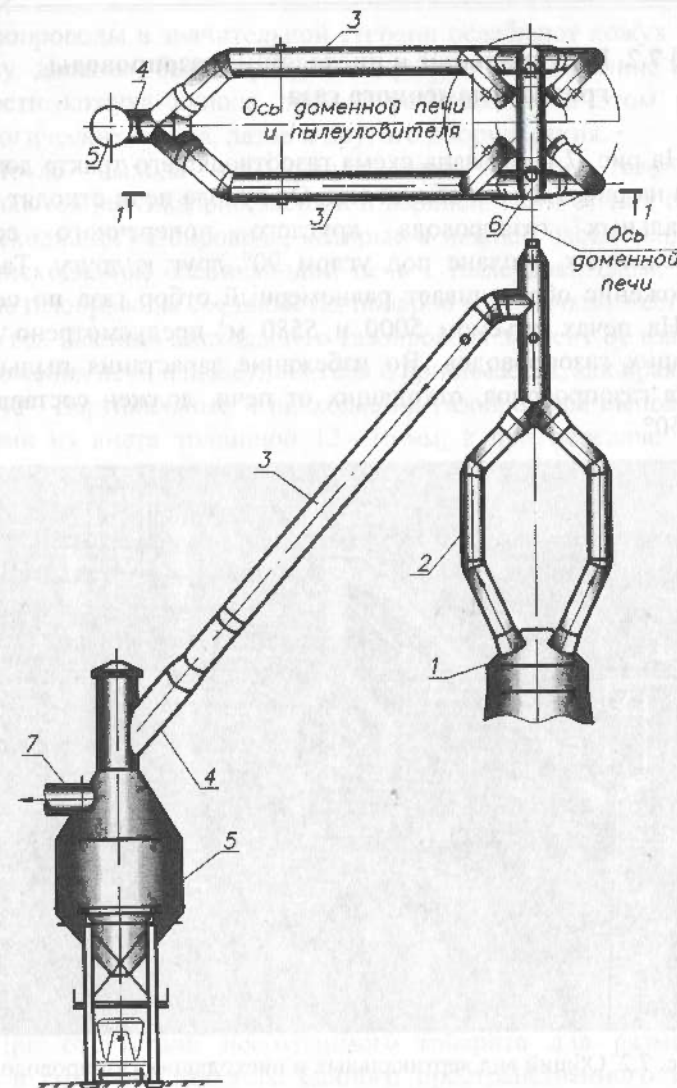


Рис. 7.1. Размещение пылеуловителя и системы газоотводящего тракта:
1 – купол доменной печи; 2 – вертикальные газопроводы грязного газа;
3, 4 – нисходящие газопроводы грязного газа; 5 – пылеуловитель;
6 – горизонтальная распорка между вертикальными газопроводами;
7 – газопровод к газоочистке

§ 7.2. Вертикальные и нисходящие газопроводы грязного доменного газа

На рис. 7.1 показана схема газоотводящего тракта доменной печи, а на рис. 7.2 – их общий вид. От купола печи отходят четыре вертикальных газопровода круглого поперечного сечения, расположенных в плане под углом 90° друг к другу. Такое их расположение обеспечивает равномерный отбор газа по сечению печи. На печах объемом 5000 и 5580 м³ предусмотрено восемь отводящих газопроводов. Во избежание зарастания пылью угол наклона газопроводов, отходящих от печи, должен составлять не менее 50° .

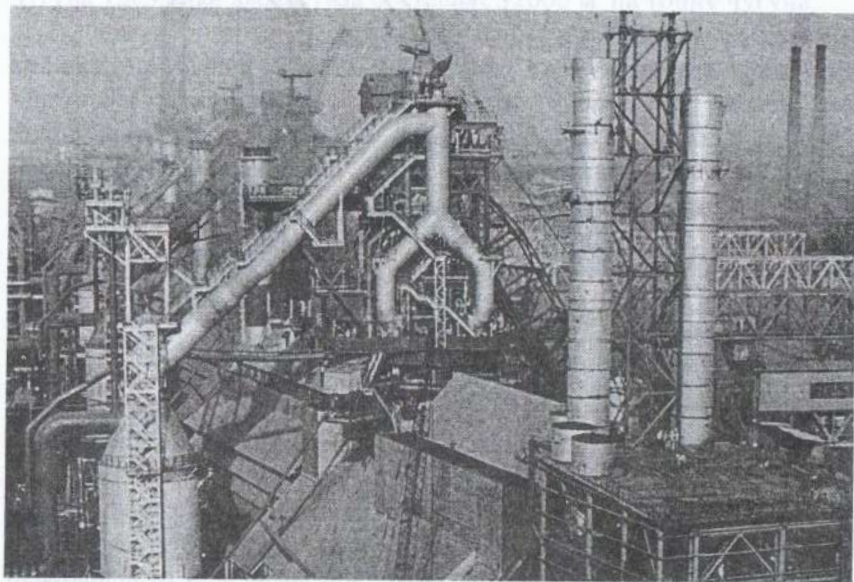


Рис. 7.2. Общий вид вертикальных и нисходящих газопроводов

Площадь сечения газопроводов принимается конструктивно максимально возможной, чтобы не увеличивать скорость газа и, соответственно, вынос пыли из доменной печи. В месте примыкания к печи суммарная площадь газопроводов должна составлять 0,4 – 0,5 площади колошниковой части печи. Отверстия

под газопроводы в значительной степени ослабляют кожуру печи и поэтому должны быть приняты меры по обеспечению общей прочности кожуха купола печи и размещению в этом районе технологических люков, лазов и другого оборудования.

После выхода из купола печи четыре газопровода поднимаются вертикально вверх и в верхней части от них отходят два нисходящих газопровода, которые в нижней части сводятся в один нисходящий, соединяющий печь с пылеуловителем. Вертикальные газопроводы соединяются попарно перемычкой жесткости.

Угол наклона нисходящего газопровода зависит от взаимного расположения печи и пылеуловителя и принимается, как правило, не менее 40° . Вертикальные и нисходящий газопроводы выполняются сварными из листа толщиной 12 – 16 мм, а при передаче на них дополнительных вертикальных нагрузок, а также в местах примыкания газопроводов к доменной печи и в других местах возможной концентрации напряжений их толщина увеличивается.

При отсутствии колошникового копра, в случае использования вертикальных газопроводов в качестве несущих конструкций для опирания монтажной балки, площадок и других конструкций колошникового устройства, принимаются специальные меры по обеспечению работы газопроводов на вертикальные и горизонтальные нагрузки как несущих конструкций.

Учитывая пространственный наклон газопроводов, выходящих из купола печи, возникает проблема восприятия распорных усилий от действия на них вертикальных нагрузок. С целью снижения усилий на купол доменной печи выходящие из него вертикальные газопроводы целесообразно соединять между собой системами вертикальных связей (рис. 7.3, а), обеспечивающими общую пространственную жесткость системы и воспринимающими горизонтальный распор и другие реактивные усилия.

При отсутствии необходимого габарита для размещения связей и создания жесткого единого пространственного каркаса возможно использование конструкций площадок. Основные балки площадок, прикрепленные к газопроводам, выполняют функцию затяжек, воспринимая нагрузку от температурного расширения газопроводов и распора, возникающего от массы опирающихся на газопроводы конструкций и оборудования (рис. 7.3, б).

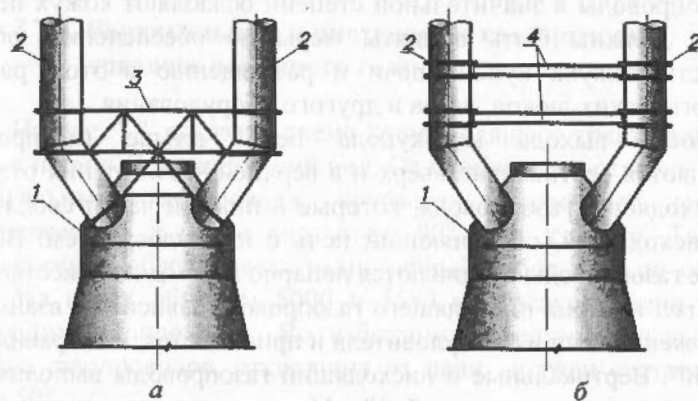


Рис. 7.3. Усиление вертикальных газопроводов:
а – стержневой системой; б – балками; 1 – купол доменной печи;
2 – вертикальные газопроводы грязного газа; 3 – стержневая связевая система; 4 – балочная связевая система

Крепление площадок к газопроводам осуществляется при помощи жестких кольцевых ребер-шпангоутов, распределяющих усилия по окружности поперечного сечения газопроводов. Толщина стенки газопроводов в местах примыкания связей и балок-затяжек увеличивается до 25–30 мм. Кроме того, в связи с большой вертикальной нагрузкой, передающейся газопроводами на купол печи, целесообразно их дополнительно опирать на цилиндрическую часть кожуха колошника печи, например, с помощью вертикальных ребер, расположенных по образующей кожуха колошника печи, частично разгружая ослабленный купол (рис. 7.4). Это позволяет в значительной степени снизить усилия, передающиеся на купол печи.

На куполах некоторых доменных печей в местах примыкания газопроводов установлены дополнительные усиливающие листы.

Из-за высокой температуры проходящих газов и абразивных воздействий выносимой пыли газопроводы внутри футеруются огнеупорным кирпичом, а места поворотов защищаются от истирания пылью литыми плитами из марганцовистой стали. Для поддержания футеровки внутри вертикальных и нисходящих газопроводов устанавливаются кольцевые ребра жесткости из стального листа толщиной 10 мм с расстоянием между их осями

$l = n(K + 2) + 10 + \Delta$, но в большинстве случаев не более 1760 мм (n – число рядов кирпичей; K – длина кирпича, мм; 2 мм – толщина шва между кирпичами; 10 мм – толщина ребра; Δ – 15–20 мм компенсационный зазор).

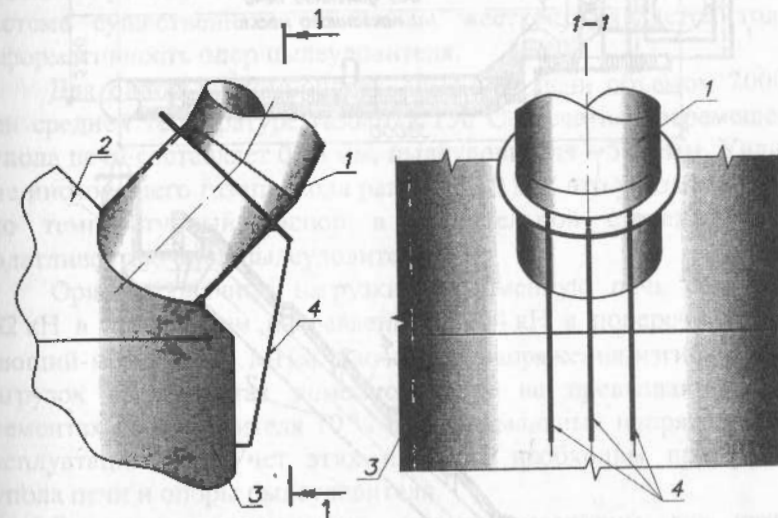


Рис. 7.4. Узел опирания вертикальных газопроводов на купол печи:
1 – вертикальный газопровод грязного газа; 2 – купол печи;
3 – кожух колошника печи; 4 – опорные ребра

Монтируются газопроводы, как правило, в футерованном состоянии.

Для удержания футеровки во время монтажа на расстоянии не более 200 мм от концов монтажных марок трубы устанавливаются ребра.

Стык монтажных марок газопроводов выполняется на бандажах, причем на один конец марки приваривают верхнюю часть бандажа, а на другой – нижнюю, на которые затем устанавливают следующую марку газопровода.

Вдоль всего нисходящего газопровода для возможности ремонта кладки и стальных конструкций расположен ряд лазов и маршевые лестницы с переходными площадками, соединяющие площадки пылеуловителя с площадками колошниковой доменной печи (рис. 7.5).

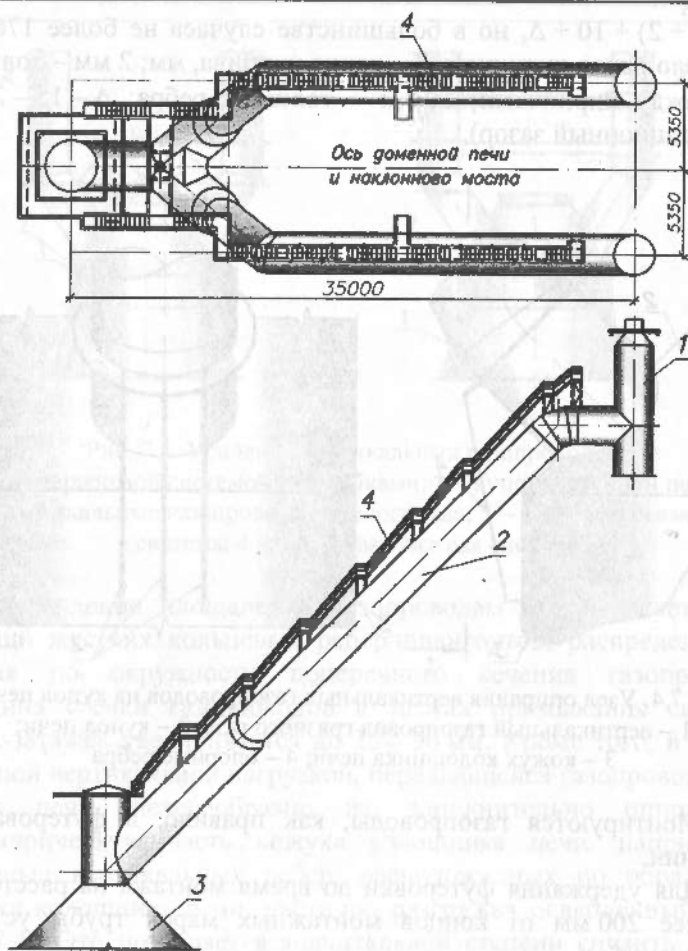


Рис. 7.5. Лестницы и площадки на нисходящих газопроводах:

1 – вертикальный газопровод грязного газа; 2 – нисходящие газопроводы грязного газа; 3 – пылеуловитель; 4 – лестницы

Вертикальные и нисходящий газопроводы соединяют между собой пылеуловитель и доменную печь, создавая достаточно сложную пространственную систему, воспринимающую комплекс разнохарактерных нагрузок и воздействий. Важнейшими из них являются вертикальные нагрузки и термические воздействия,

вызывающие в системе реактивный горизонтальный распор, величина которого зависит от длины нисходящего газопровода общей жесткости системы. Поскольку газоходы футерованы, жесткость узлов их сопряжения достаточно высока. Поэтому в этой системе существенным снижением жесткости является только деформативность опор пылеуловителя.

Для одной из компоновок доменной печи объемом 2000 м^3 при средней температуре газохода 150°C расчетное перемещение купола печи составляет $0,93 \text{ мм}$, пылеуловителя – $50,7 \text{ мм}$. Удлинение нисходящего газопровода равно $55,89 \text{ мм}$, что указывает на то, что температурный распор в значительной степени гасится податливостью опор пылеуловителя.

Ориентировочные нагрузки на доменную печь составляют 282 кН в продольном направлении и 154 кН в поперечном, изгибающий момент $486 \text{ МН}\cdot\text{м}$. Расчетные напряжения изгиба от этих нагрузок в элементах доменной печи не превышают 2% , в элементах пылеуловителя 10% от максимальных напряжений при эксплуатации [9]. Учет этих нагрузок необходим при расчете купола печи и опоры пылеуловителя.

Величины приведенных нагрузок различны для каждой доменной печи и зависят, как отмечалось, от расстояния между пылеуловителем и доменной печью, а также от других факторов. Для их снижения достаточно эффективным решением является установка компенсаторов на вертикальных и нисходящих газопроводах грязного газа. Такие печи успешно эксплуатируются на ряде зарубежных предприятий, но установка компенсаторов связана с необходимостью устройства конструкций для опирания газопроводов, расчлененных компенсаторами, восприятия неуравновешенного внутреннего давления, температурных перемещений собственно газопроводов и системы «пылеуловитель – доменная печь». На отечественных доменных печах такая конструкция пока не нашла широкого применения.

Однако переход на доменные печи с самонесущими кожухами и снижение воздействия на купол печи вызывают необходимость компенсировать температурные перемещения элементов системы и уменьшить факторы их взаимодействия.

Заслуживает внимания схема постановки компенсаторов на одной из печей Украины, приведенная на рис. 7.6. Компенсаторы

размещены на 4-х вертикальных газопроводах у входа в купол доменной печи и в двух местах нисходящего газопровода — в районе входа в пылеуловитель и на специально установленном «хвостовике». Для поддержания вертикальных газопроводов, разрезанных компенсаторами, выше компенсаторов установлены дополнительные опоры газопроводов на колошниковую площадку доменной печи, а для поддержания нисходящего газопровода предусмотрена специальная опора на раму литейного двора. Опоры вертикальных газопроводов одновременно воспринимают усилия от внутреннего давления.

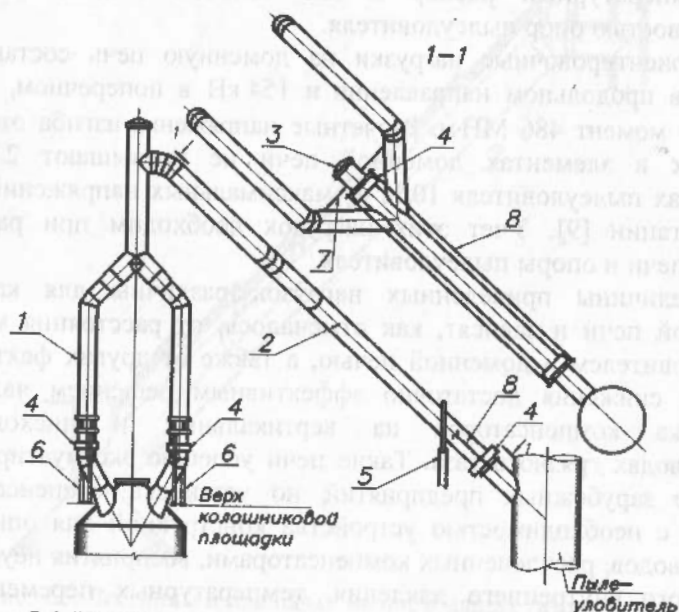


Рис. 7.6. Установка компенсаторов на газопроводах грязного газа:

- 1 — вертикальные газопроводы грязного газа; 2 — нисходящий газопровод грязного газа; 3 — «хвостовик»; 4 — компенсаторы; 5 — опора на литейный двор; 6 — опоры вертикальных газопроводов на колошниковую площадку; 7 — опора «хвостовика»; 8 — тяги

Так как компенсаторы установлены на вертикальных газопроводах следует обратить внимание на необходимость обеспечения восприятия этими газопроводами горизонтальных

нагрузок, в том числе и ветровых, и передачи их на колошниковую площадку печи.

Вдоль нисходящего газопровода расположены продольные тяги между специально образованным «хвостовиком» и пылеуловителем, замыкающие оба компенсатора и воспринимающие усилия от неуравновешенного внутреннего давления. Компенсатор, установленный перед «хвостовиком», предназначен для компенсации упругого удлинения тяг.

§ 7.3. Пылеуловитель

Традиционный радиальный пылеуловитель наиболее применим в качестве аппарата грубой очистки газа. Он располагается около доменной печи и входит в состав ее центрального узла.

Технологически пылеуловитель радиального типа (рис. 7.7) представляет собой вертикальный резервуар цилиндрической формы диаметром до 12 м с коническим дном и куполом. Запыленный газ поступает в пылеуловитель из доменной печи по нисходящему газопроводу через вертикальную трубу, заведенную внутрь пылеуловителя по его вертикальной оси. При переходе газа из трубы меньшего сечения в цилиндр большего сечения происходит увеличение объема газа и снижение его скорости. Газ и пыль движутся с различной скоростью по расширяющемуся патрубку, что несколько снижает гидравлический удар потока газа и уменьшает взмучивание уже осевшей в нижнем конусе колошниковой пыли. Под действием силы тяжести и сил инерции пылинки выпадают из потока газа. При входе в пылеуловитель резко снижается скорость движения газа, так как он попадает в сосуд большего сечения и делает поворот на 180° в сторону отводящего патрубка. Поэтому наиболее тяжелые и крупные пылинки не могут удержаться в потоке газа и оседают в нижний конус, а газ поднимается вверх и уходит по газопроводу для дальнейшей очистки. По мере накопления пыль из нижнего конуса пылеуловителя через выпускные отверстия — пылевые клапаны, выгружается в железнодорожные вагоны, устанавливаемые под пылеуловителем между колоннами его опоры.

В вертикальной трубе над входом в пылеуловитель размещен отсекающий клапан, служащий для отключения доменной печи от газовой магистрали во время ее остановок. Эту трубу иногда

называют кожухом отсекающего клапана. При остановке доменной печи литой конус клапана перемещается внутри него и в нижнем положении упирается в «седло», препятствуя движению газа. Кожух отсекающего клапана грязного газа имеет съемную крышку.

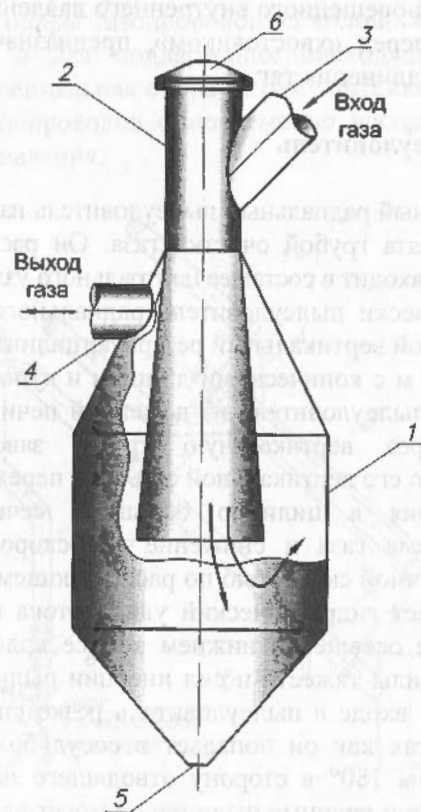


Рис. 7.7. Схема движения газа в пылеуловителе:

1 – пылеуловитель; 2 – кожух трубы отсекающего клапана; 3 – нисходящий газопровод грязного газа из доменной печи; 4 – выходной газопровод на газоочистку; 5 – клапан выпуска пыли; 6 – крышка кожуха трубы отсекающего клапана

Конструктивно кожух пылеуловителя представляет собой сложную симметричную оболочку вращения, центральная часть

которой является цилиндром, а верхняя и нижняя – конусами. На рис. 7.8 показан общий вид сосуда. Цилиндрическая часть кожуха, конические днище и купол собираются из отдельных листов, соединяемых стык, как правило, ручной сваркой с расположением стыков вразбежку.

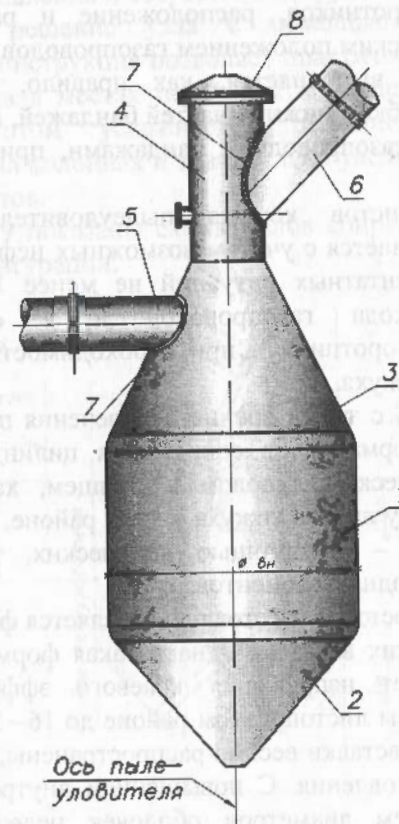


Рис. 7.8. Кожух пылеуловителя:

1 – цилиндрическая часть; 2 – днище; 3 – купол; 4 – кожух трубы отсекающего клапана; 5 – выходной газопровод на газоочистку; 6 – нисходящий газопровод грязного газа из доменной печи; 7 – усиленный воротник; 8 – крышка кожуха трубы отсекающего клапана

К куполу пылеуловителя и к кожуху отсекающего клапана присоединены два патрубка: наклонный — для присоединения нисходящего газопровода и приема грязного колошникового газа и горизонтальный — для выхода скапливающегося под куполом прошедшего первую очистку газа. Оба узла сопряжения решаются с установкой воротников, расположение и размеры которых связаны с фактическим положением газопроводов. Стык патрубков с газопроводами выполняется, как правило, на бандажах с приваркой к патрубкам нижних частей бандажей, на которые затем устанавливаются газопроводы с бандажами, приваренными к их верхней части.

Толщина листов кожуха пылеуловителя определяется расчетом и принимается с учетом возможных неформализованных воздействий и нештатных ситуаций не менее 16 мм. В местах расположения входа газопроводов и в опорных узлах устанавливаются воротники и при необходимости увеличивается толщина листов кожуха.

Особую роль с точки зрения обеспечения прочности играет конструктивная форма узлов сопряжения цилиндрической части оболочки с коническим куполом и днищем, характер которых определяет толщину листов кожуха в этом районе. Существуют три формы переходов — с помощью конических, тороидальных и сферических переходных элементов.

Наиболее простой в изготовлении является форма перехода с помощью конических вставок. Однако такая форма в наименьшей степени сглаживает напряжения краевого эффекта и требует увеличения толщины листов в этом районе до 16–20 мм. Несмотря на это, конические вставки весьма распространены, что объясняется простотой их изготовления. С повышением внутреннего давления газа и увеличением диаметров оболочек целесообразность их применения снижается.

Применение тороидальных вставок в большей степени улучшает общую картину напряженного состояния в узле сопряжения оболочек с учетом усилий, вызванных краевым эффектом. Расчетная толщина листов перехода на 20–25 % меньше, чем при конических вставках. Изготовление таких элементов более трудоемко и требует специального оборудования для их вальцовки в

двух направлениях в виде так называемой «бочки». На ряде заводов имеется такая «бочка» с радиусом вальцовки 676 мм. Однако, несмотря на общую эффективность, такое решение узлов сопряжения оболочек не нашло широкого применения из-за сложности изготовления и отсутствия оборудования.

Известно решение узла с помощью полусферической вставки. Такая конструкция позволяет практически не увеличивать толщину металла в местах переходов и упростить изготовление. Однако при этом усложняется решение опорного узла пылеуловителя на колоннах и значительно увеличиваются размеры опорных элементов.

На рис. 7.9 показаны схемы узлов сопряжений с вставками различной конфигурации.

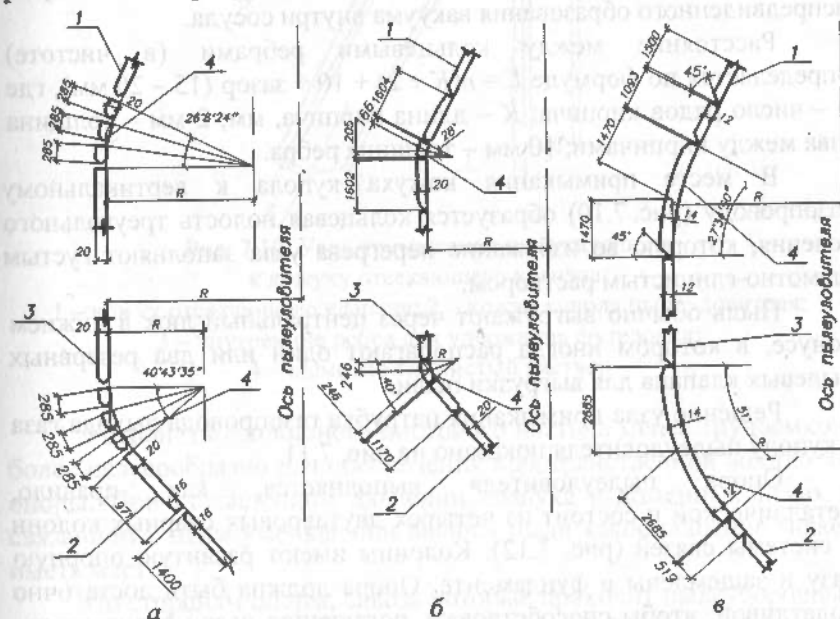


Рис. 7.9. Типы узлов сопряжений частей кожуха:

а — конический переход; б — тороидальный переход; в — сферический переход; 1 — купол; 2 — днище; 3 — цилиндрическая часть; 4 — переходные элементы

В связи с относительно высокой температурой проходящих газов и абразивным воздействием выносимой пыли кожух пылеуловителя внутри футеруется огнеупорным кирпичом.

С целью удержания футеровки и обеспечения прочности кожуха при нештатных технологических операциях, приводящих к образованию вакуума, например, при пропаривании, внутри пылеуловителя устанавливается металлический каркас. Вертикальные элементы в цилиндрической части и в верхнем конусе выполняются из двутавров № 14, а в нижнем – из полосы 110×10 мм, а горизонтальные кольцевые ребра толщиной 8 мм. Ребра располагаются примерно через 30° так, чтобы площадь футеровки не превышала 7,5 м², а ее высота – 2,5 м. Образованный жесткий каркас одновременно обеспечивает местную устойчивость оболочки в случае непредвиденного образования вакуума внутри сосуда.

Расстояние между кольцевыми ребрами (в чистоте) определяется по формуле $L = n(K + 2) + 10$ + зазор (15 – 20 мм), где n – число рядов кирпича; K – длина кирпича, мм; 2 мм – толщина шва между кирпичами; 10 мм – толщина ребра.

В месте примыкания кожуха купола к вертикальному газопроводу (рис. 7.10) образуется кольцевая полость треугольного сечения, которую во избежание перегрева узла заполняют густым шамотно-глинистым раствором.

Пыль обычно выгружают через центральный люк в нижнем конусе, в котором иногда располагают один или два резервных пылевых клапана для выгрузки пыли.

Решение узла примыкания патрубка газопровода выхода газа к куполу пылеуловителя показано на рис. 7.11

Опора пылеуловителя выполняется, как правило, металлической и состоит из четырех двутавровых сварных колонн и системы связей (рис. 7.12). Колонны имеют развитую опорную базу и заземлены в фундаменте. Опора должна быть достаточно податливой, чтобы способствовать погашению части горизонтального распора от температурного расширения системы «доменная печь – нисходящие газопроводы – пылеуловитель». По вертикали опора разбита на два яруса рабочей площадкой, служащей для установки на ней пылеуловительного оборудования и выполняющей одновременно роль горизонтальной диафрагмы этой прост-

ранственной конструкции. Жесткость площадки обеспечивается горизонтальными связями при решетчатом настиле, который предпочтителен с точки зрения исключения скопления пыли.

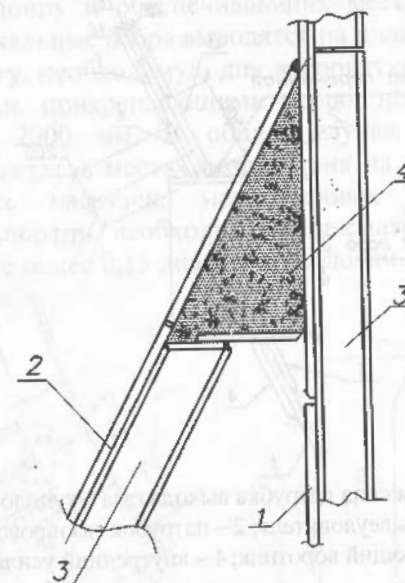


Рис. 7.10. Узел примыкания кожуха купола к кожуху отсекающего клапана:

- 1 – кожух отсекающего клапана; 2 – кожух купола пылеуловителя;
- 3 – внутренние ребра для удержания футеровки;
- 4 – шамотно-глинистый раствор

Устройство сплошного листового настила менее трудоемко и более целесообразно для обеспечения пространственной жесткости опоры. При повышенном давлении воздуха в доменных печах и связанном с этим уменьшении выноса пыли такое решение может иметь место.

По сторонам опоры, сквозь которые проходит пылеуловительный железнодорожный путь, устраивается рамный безсвязевой участок для прохождения железнодорожного состава необходимых габаритов. При этом фундаменты и базы колонн, как правило, заглубляются ниже уровня земли.

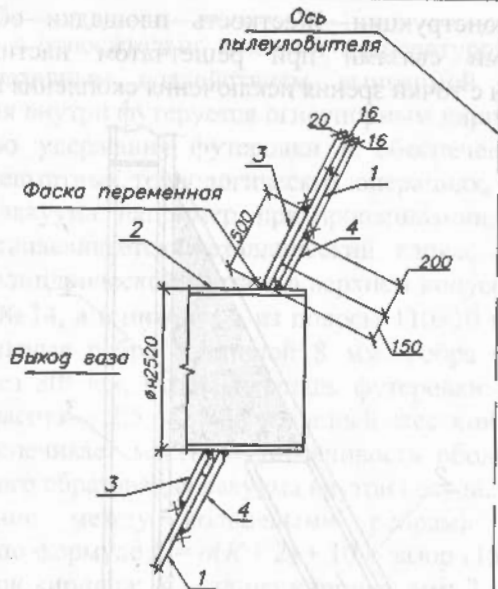


Рис. 7.11. Узел сопряжения патрубка выхода газа с куполом пылеуловителя:
1 – кожух купола пылеуловителя; 2 – патрубок газопровода выхода газа;
3 – наружный усиливающий воротник; 4 – внутренний усиливающий воротник

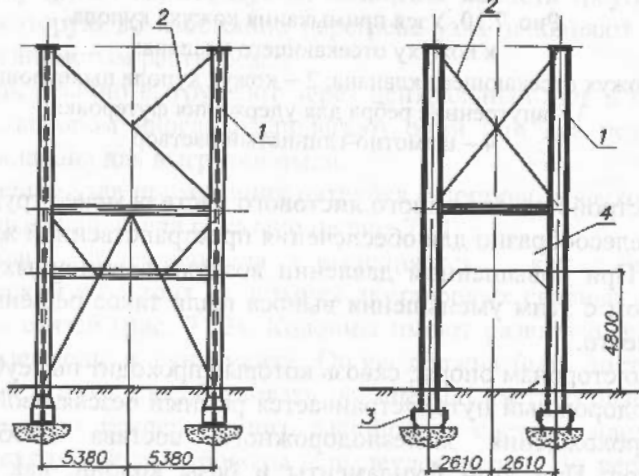


Рис. 7.12. Опора пылеуловителя:

1 – опорные колонны; 2 – связи между колоннами;
3 – башмак колонны; 4 – безсвязевой участок для пропуска вагонов

Узел опирания кожуха пылеуловителя на колонны (рис. 7.13) решается с помощью опорной плиты толщиной 40–45 мм и системы наружных вертикальных и внутренних ребер, передающих нагрузку на колонну и обеспечивающих местную устойчивость оболочки. Вертикальные ребра выводятся на цилиндрическую часть кожуха на высоту, необходимую для восприятия опорной реакции сварными швами, прикрепляющими ребро, но, как правило, не менее чем на 2000 мм. В общем случае для обеспечения устойчивости кожуха в местах воздействия на него значительных сосредоточенных нагрузок, направленных по образующей, например, над опорами, необходимо предусматривать продольные ребра высотой не менее 0,15 диаметра оболочки.

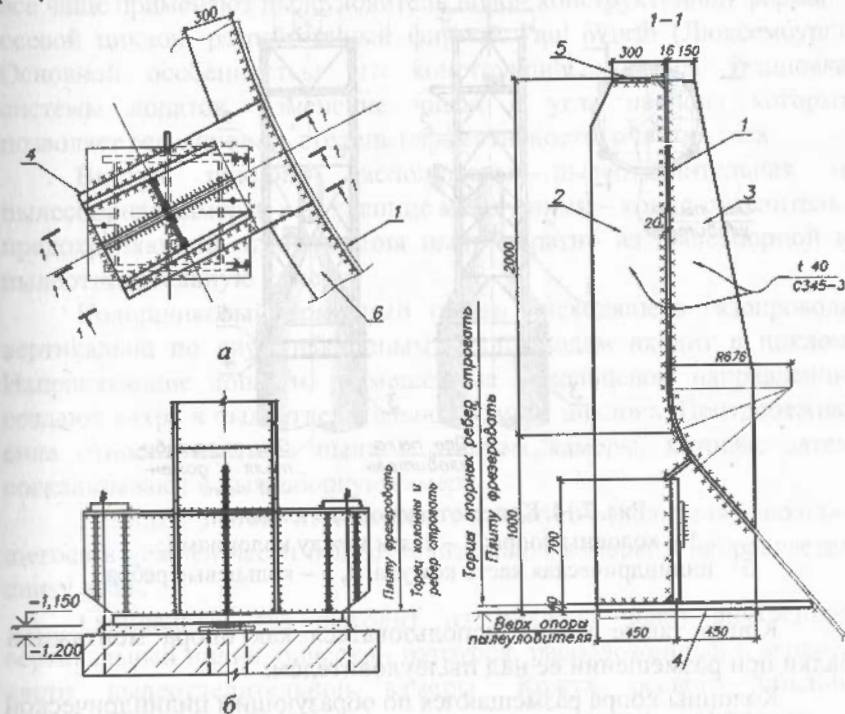


Рис. 7.13. Опора кожных пылеуловителя:

а — узел опоры кожуха; б — конструкция башмака колонны;
1 — цилиндрическая часть кожуха; 2, 3 — вертикальные наружные и
внутренние ребра соответственно; 4 — опорная плита; 5, 6 — верхнее и
нижнее кольцевые ребра соответственно

По верху этих ребер, снаружи кожуха, приваривается сплошное горизонтальное ребро из полосы. Нижние опорные плиты также соединяются кольцевым ребром с опорными плитами и привариваются к кожуху снаружи.

Для управления и обслуживания отсекающего клапана, смены его седла, а также для опирания монтажной балки на корпус пылеуловителя устанавливается специальная опорная конструкция — копер (рис. 7.14), состоящий из четырех колонн, соединенных системами связей и технологическими площадками. К нему крепится система блоков для канатов управления отсекающим клапаном и тележки монтажной балки.

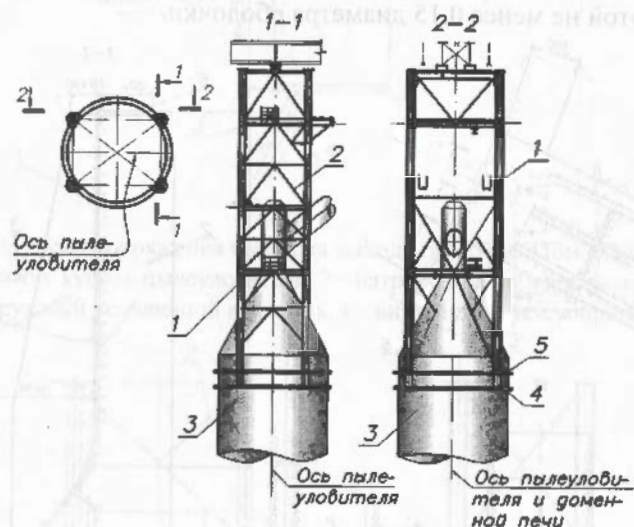


Рис. 7.14. Копер отсекающего клапана:

- 1 — колонны копра; 2 — связи между колоннами;
3 — цилиндрическая часть кожуха; 4, 5 — кольцевые ребра

Копер также может использоваться как опора монтажной балки при размещении ее над пылеуловителем.

Колонны копра размещаются по образующим цилиндрической части кожуха и опираются на кожух через балку, состоящую из двух кольцевых ребер и части кожуха пылеуловителя. Размеры ребер расчетные и зависят от величины опорных реакций копра. Как правило, при грузоподъемности монтажной балки до 100 т размеры

верхнего и нижнего ребер принимаются 300×20 мм. Опорная реакция колонн копра передается вертикальными ребрами, приваренными к кожуху в районе сопряжения купола с цилиндрической частью. Длина ребер определяется расчетом согласно условию восприятия опорной реакции сварными швами, приваривающими ребро к кожуху. В местах опирания колонн копра на кожух в верхнем кольцевом ребре размещается листовая вставка толщиной 32–36 мм.

Эффективность традиционных пылеуловителей составляет примерно 50 %, поэтому с целью повышения степени очистки газа все чаще применяют пылеуловитель новой конструктивной формы — осевой циклон, разработанный фирмой Paul Wurth (Люксембург). Основной особенностью его конструкции является установка системы лопаток, изменение числа и угла наклона которых позволяет регулировать степень (эффективность) очистки газа.

Внутри циклона расположены пылеотделительная и пылесборная камеры, а на границе между ними — конус-отделитель, предохраняющий от попадания пыли обратно из пылесборной в пылеотделительную камеру.

Колошниковый доменный газ из нисходящего газопровода вертикально по двум наклонным газопроводам входит в циклон. Направляющие лопасти, размещенные в кольцевом направлении создают вихрь в пылеотделительной камере циклона. Центробежная сила относит частицы пыли к стенкам камеры, которые затем соскальзывают в пылесборную камеру.

Газовый поток отражается от конуса-отделителя, находящегося в нижней части пылеотделительной камеры, и направляется снизу вверх.

Очищенный газ выходит из циклона через внутренний вертикальный цилиндрический патрубок, расположенный в верхней части пылеотделительной камеры. Кожух осевого циклона (рис. 7.15) выполнен в виде ряда соосных оболочек — цилиндрической, нижней конической и купола в виде части сферы. Узел сопряжения с нижним конусом выполнен в виде переходной конической поверхности, узел сопряжения с куполом — в виде сопряженных конической и торообразной поверхностей.

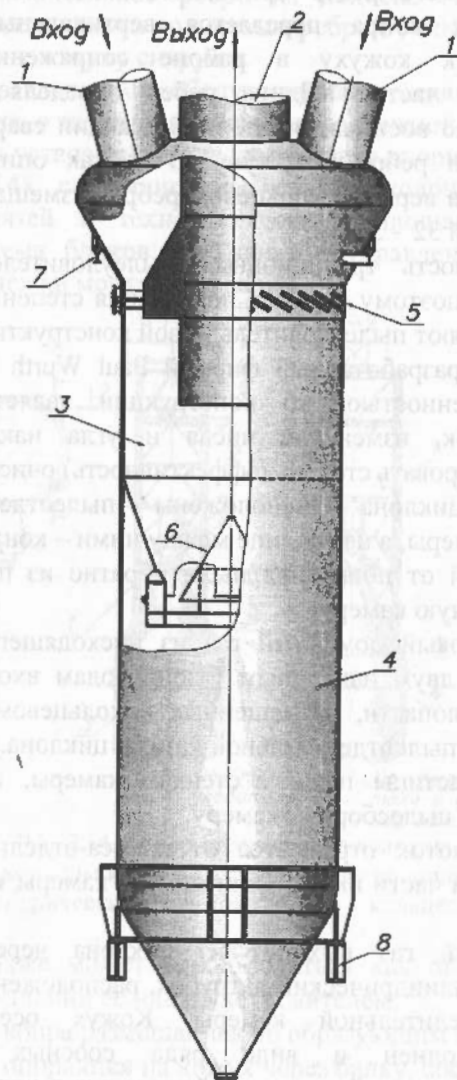


Рис. 7.15. Осевой циклон:

- 1 – вход газопроводов грязного газа; 2 – выход газопровода
получистого газа; 3, 4 – пылеотделительная и пылесборная камеры
соответственно; 5 – лопатки; 6 – апекс-конус; 7 – кольцевой монорельс;
8 – опорные балки

Толщина стенки кожуха осевого циклона принята 20 мм в его цилиндрической и нижней конической части и 30 мм в зонах сопряжения с нижним конусом и куполом. Толщина купольной части обычно принимается 40 – 60 мм в зоне сферы и тора и 40 мм в конической зоне.

В верхней части кожуха перед сопряжением цилиндрической части с купольной расположен участок кожуха с наклонными отверстиями для направляющих лопаток. Над лопатками для возможности их обслуживания располагается кольцевой монорельс, прикрепленный к кожуху циклона.

В купольной части кожуха имеются два отверстия для примыкания газопроводов грязного газа и отверстие по оси циклона для выхода газопровода получистого газа к скрубберу.

Внутри кожуха в его цилиндрической части расположен апекс-конус из листов толщиной 16 мм.

ГЛАВА 8 МОНТАЖНАЯ БАЛКА

§ 8.1. Назначение, конструктивные формы

Монтаж и замена механизмов и оборудования доменной печи осуществляются с помощью тележки грузоподъемностью до 150 т, передвигающейся по монтажной балке. Балка расположена над доменной печью и обеспечивает подъем с железнодорожных платформ и спуск укрупненных узлов конструкций, загрузочного устройства и другого оборудования. Схема опирания балки должна обязательно предусматривать возможность расположения крюка тележки по оси доменной печи.

Монтажная балка представляет собой комплексную конструкцию, состоящую из двух отдельных вертикальных балок, по которым передвигается грузоподъемная тележка, горизонтальной и вертикальной систем связей, воспринимающих боковые воздействия и обеспечивающих общую устойчивость балок, а также площадок. В зависимости от схемы опирания балки бывают двух типов – консольные и двухопорные.

§ 8.2. Балки консольного типа

Балки консольного типа, применявшиеся на печах старой конструкции, находились в верхней части колошникового копра и выступали за его грань на величину, определяемую расположением железнодорожного пути, с которого поднимается груз. Для уменьшения вылета консоли использовали оттяжку, отклоняющую груз. Балки со стороны консоли опирались на подвески к ригелю передней рамы копра, а второй их конец – на заднюю раму или на балку площадки.

§ 8.3. Двухопорные балки

С увеличением массы заменяемых узлов оборудования и конструкций, вызванным необходимостью сокращения простоев печи на ремонте, проявились недостатки консольных балок. Прежде всего, это недостаточный вылет консоли, требующий оттяжки груза при его подъеме, и ограниченная грузоподъемность.

Балка была продлена в сторону пылеуловителя, который, при его расположении в створе с печью, использовали как опору (рис. 8.1). При другой планировке печи и ином расположении пылеуловителя для балки предусматривались специальные опоры. На рис. 8.2 показана монтажная балка, опирающаяся на пьескую опору, а на рис. 8.3 – на пространственную опору.

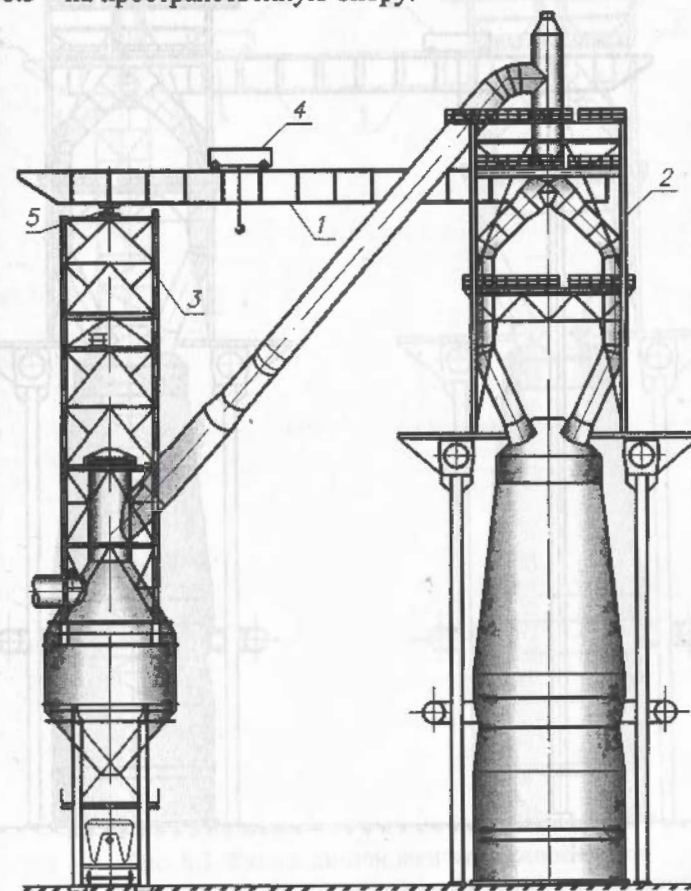


Рис. 8.1. Схема компоновки монтажной балки с опиранием на копер пылеуловителя:

- 1 – монтажная балка; 2 – колошниковый копер; 3 – копер пылеуловителя; 4 – тележка монтажной балки; 5 – катковая опора монтажной балки

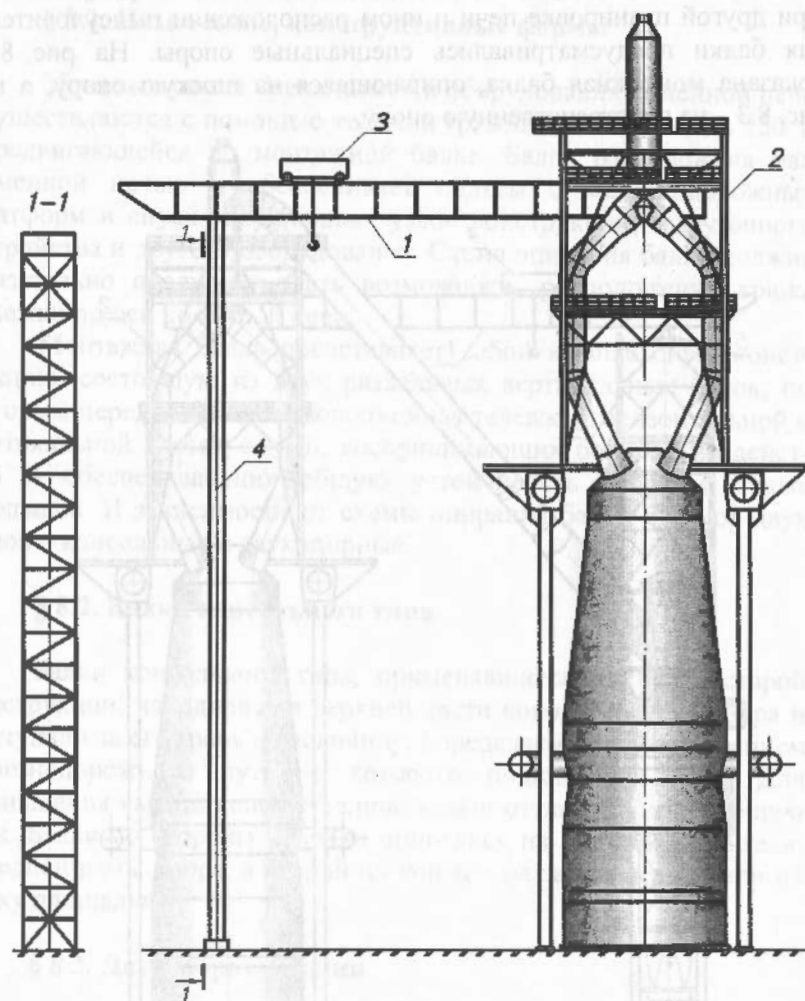


Рис. 8.2. Схема компоновки монтажной балки с опиранием на отдельную плоскую опору:
1 – монтажная балка; 2 – колошниковый копер; 3 – тележка монтажной балки; 4 – плоская опора

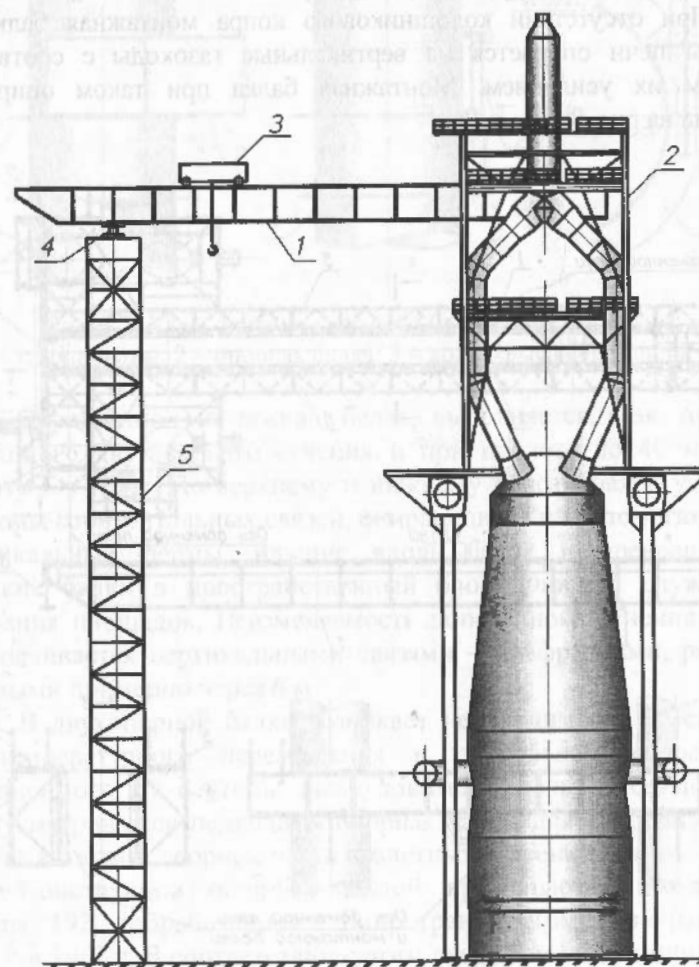


Рис. 8.3. Схема компоновки монтажной балки с опиранием на отдельную пространственную опору:
1 – монтажная балка; 2 – колошниковый копер; 3 – тележка монтажной балки; 4 – катковая опора монтажной балки; 5 – пространственная опора

При установке монтажной балки на плоскую опору особое внимание следует уделять обеспечению ее устойчивости из плоскости.

При отсутствии колошникового копра монтажная балка со стороны печи опирается на вертикальные газопроводы с соответствующим их усилением. Монтажная балка при таком опирании показана на рис. 8.4.

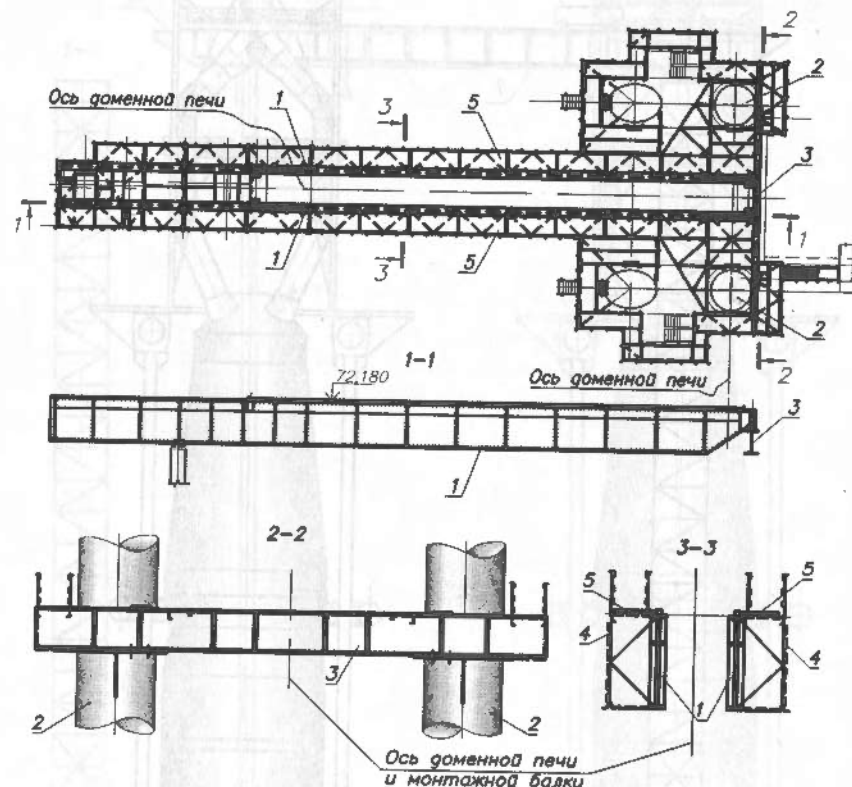


Рис. 8.4. Схема монтажной балки при опирании на вертикальные газопроводы:

- 1 - монтажная балка; 2 - газопроводы; 3 - опорная несущая балка;
4 - вспомогательные фермы; 5 - горизонтальные связевые фермы

Узлы опирания балки на газопроводы показаны на рис. 8.5.

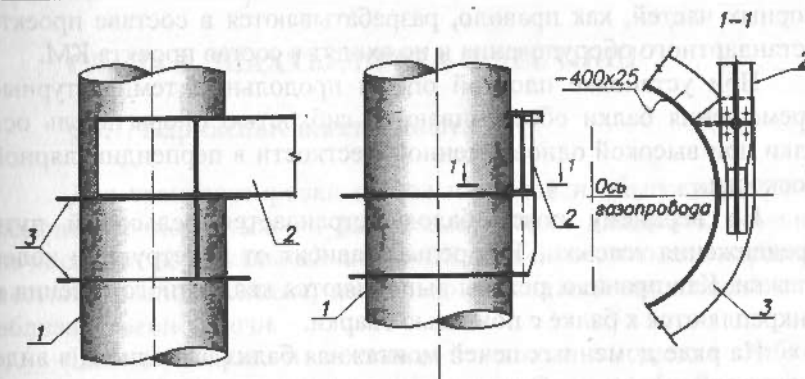


Рис. 8.5. Узлы опирания опорной балки к газопроводам:
1 - газопроводы; 2 - опорная балка; 3 - кольцевые ребра-шпангоуты

Собственно монтажная балка выполняется, как правило, сплошного двутаврового сечения и при пролете до 40 м имеет высоту 3 - 3,2 м. По верхнему и нижнему поясам балок устроены системы горизонтальных связей, опирающиеся на вспомогательные вертикальные фермы, идущие вдоль балок и превращающие плоские балки в пространственный блок. Они же служат для опирания площадок. Неизменяемость поперечного сечения блоков обеспечивается вертикальными связями - диафрагмами, расположенными примерно через 6 м.

В двухопорной балке возникает необходимость обеспечения ее температурного перемещения в продольном направлении, независимого от системы пылеуловитель - печь, в связи с чем предусматривается подвижная опорная часть, для которой используются катковые опорные части пролетных строений мостов.

Конструкции опорных частей применяются по альбому шифра 192, разработанному Гипротрансмостом Минтрансстроя СССР в 1962 г. В соответствии с этим альбомом унифицированные опорные части, применяемые для опирания монтажных балок, могут быть однокатковыми и двухкатковыми.

Критерием для выбора типа опорной части являются величины опорной реакции балки и расчетного перемещения, а также геометрических параметров узла опирания. Чертежи

опорных частей, как правило, разрабатываются в составе проекта нестандартного оборудования и не входят в состав проекта КМ.

При установке плоской опоры продольные температурные перемещения балки обеспечиваются гибкостью опоры вдоль оси балки при высокой одновременной жесткости в перпендикулярной плоскости.

По верхнему поясу балок устраивается рельсовый путь передвижения тележки. Тип рельса зависит от конструкции колес тележки. Как правило, рельсы выполняются квадратного сечения и прикрепляются к балке с помощью сварки.

На ряде доменных печей монтажная балка выполнена в виде стержневой фермы. Однако конструкции ее многодельны в изготовлении и в большей степени подвержены коррозионному износу.

Конструкция двухопорной балки позволила решить проблемы ремонта и замены оборудования в значительно более широком диапазоне и полностью вытеснила консольные балки.

ГЛАВА 9 ШАХТЫ ЛИФТА И ЛЕСТНИЦ

§ 9.1. Каркасные шахты лифта

Для транспортировки грузов и доставки обслуживающего и ремонтного персонала на различные уровни площадок доменной печи служат вертикальный лифтовый подъемник и шахта маршевых лестниц, расположенные, насколько позволяет генеральный план, вблизи доменной печи.

Шахты лифта и лестниц относятся к весьма гибким, достаточно многодельным в изготовлении и малоунифицированным конструкциям.

Для увеличения общей жесткости и экономии места на генеральном плане шахты лифта и лестниц объединяют в единый пространственный блок с общей системой связей (рис. 9.1).

Наиболее распространенное конструктивное решение блока — это два стержневых связевых каркаса, соединенных между собой, внутри одного из которых расположена шахта для движения кабины лифта, а внутри другого — маршевые лестницы. Каркасы шахты лифта и шахты лестниц решены в виде прямоугольных в плане пространственных конструкций. Размеры шахт находятся в пределах, допускающих при экономической целесообразности их транспортировку в полной заводской готовности в собранном виде.

Каркас шахт решается в виде четырех стоек из уголков или двутавров, соединенных по граням вертикальной решеткой, воспринимающей поперечные силы от ветровой нагрузки. Шахты объединяются между собой горизонтальными элементами — рамками жесткости, выполняющими роль диафрагм в общем пространственном каркасе.

Конструкция каркасов шахт лифта и лестниц в основном зависит от отметок остановок кабины лифта и расположения переходных площадок с лифта на смежные сооружения. Эти параметры не формализованы и определяются в каждом конкретном случае в зависимости от общей компоновки конструкций. В частности, места устройства остановок лифта и выходов связаны с отметками площадок печи, которые при удаленном от лифта расстоянии соединены с ним переходными мостами. Отметки площадок печи определяются в свою очередь компоновкой

холодильников доменной печи. Мосты могут иметь уклон не более 5% и не должны иметь ступенек. Разбивку остановок лифта выполняют с учетом максимальной унификации лестничных маршей, используя допустимый уклон переходных мостов. Компонировка блока шахт лифта и лестниц может быть осуществлена только после общей увязки сооружений центрального узла печи.

В местах проемов в гранях каркаса для обеспечения прохода и выноса груза на остановках лифта и выхода на переходные мосты связевая решетка заменяется рамными конструкциями.

Конструкция блока обеспечивает передвижение кабины лифта, поэтому предъявляются достаточно высокие требования к сооружению по жесткости в целом и, соответственно, к допускам по установке направляющих кабины. Проблема осложняется тем, что пространственный блок шахт, как отмечалось, представляет собой достаточно высокое и гибкое сооружение, подверженное значительным перемещениям от воздействия ветровой нагрузки.

С увеличением объемов доменных печей и, соответственно, их размеров высота лифта была увеличена до площадки балансиров колошниковоу устройства. Это привело к удлинению консольной части каркасов лифтовой шахты и блока лестниц, что потребовало ее дополнительного опирания. Одним из решений была установка на кожухе ближайшего к лифту воздухонагревателя специальной пространственной надстройки, к которой были прикреплены шахта лифта и шахта лестниц. В дальнейшем конструкция надстройки была заменена пирамидальной трубчатой треногой, опирающейся на купол воздухонагревателя по касательной, что позволило отказаться от опорных колец.

К недостаткам таких решений следует отнести искусственную связь сооружений с разным температурным режимом и, соответственно, разными перемещениями, а также крепление элементов конструкций к кожуху воздухонагревателя, находящегося в сложных условиях двухосного напряженного состояния. В дальнейшем использование кожухов воздухонагревателей и других оболочек технологических агрегатов для каких бы то ни было опор смежных конструкций было признано недопустимым, и такие схемы исключены из применения. Каркас лифта и шахты лестниц прикреплялся системами связей к расположенным вблизи сооружениям – рамам литейного двора, колошниковой площадке и другим смежным сооружениям.

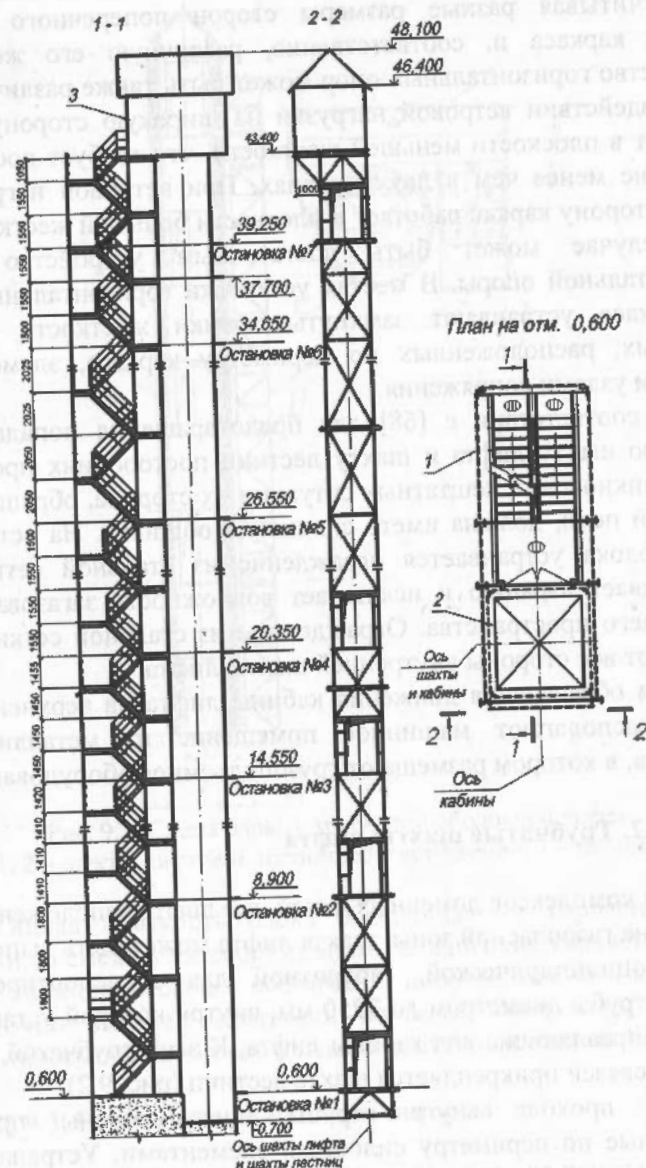


Рис. 9.1 Схема блока лифта с каркасными шахтами:
1, 2 – шахты лестниц и лифта соответственно

Учитывая разные размеры сторон поперечного сечения общего каркаса и, соответственно, различную его жесткость, количество горизонтальных опор может быть также различно. Так, при воздействии ветровой нагрузки на широкую сторону каркас работает в плоскости меньшей жесткости, что требует постановки связей не менее чем в двух уровнях. При ветровой нагрузке на узкую сторону каркас работает в плоскости большей жесткости и в этом случае может быть достаточным устройство одной горизонтальной опоры. В местах установки горизонтальных опор на каркасе устраивают замкнутые рамки жесткости в виде наружных, расположенных по периметру каркаса, элементов с рамными узлами сопряжения.

В соответствии с [68] для предотвращения попадания во внешнюю шахту лифта и шахту лестниц посторонних предметов при возникновении нештатных ситуаций их сторона, обращенная к доменной печи, должна иметь сплошную обшивку. На остальных гранях блока устраивается ограждение из стальной сетки, что обеспечивает аэрацию и исключает возможность загазованности внутреннего пространства. Ограждением из стальной сетки также закрывают все стороны внутренней шахты лифта.

Для обеспечения движения кабины лифта на верхней части шахты располагают машинное помещение из металлических элементов, в котором размещают грузоподъемное оборудование.

§ 9.2. Трубчатые шахты лифта

Для комплексов доменных печей, где лифт расположен вдали от печи вне газоопасной зоны, шахта лифта может быть выполнена из круглоцилиндрической, габаритной для транспортирования стальной трубы диаметром до 3250 мм, внутри которой устанавливаются направляющие для кабины лифта. К этой трубчатой шахте системой связей прикрепляется шахта лестниц (рис. 9.2).

Для прохода внутрь трубы предусмотрены проемы, окаймленные по периметру силовыми элементами. Устраиваются также окна-иллюминаторы, обеспечивающие аэрацию внутреннего пространства.

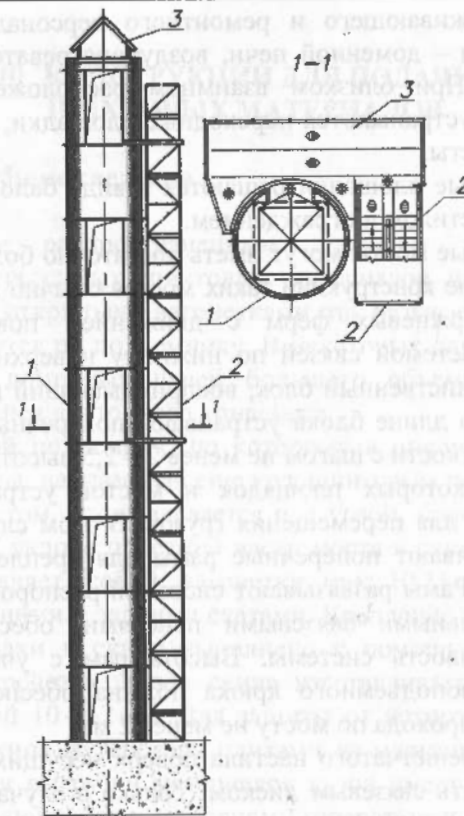


Рис. 9.2. Схема блока с трубчатой оболочкой лифта:
1, 2 – шахты лифтов и лестниц соответственно; 3 – площадки

Общая жесткость блока обеспечивается горизонтальными связями со смежными сооружениями аналогично каркасной шахте. Для цилиндрической оболочки шахты лифта характерна достаточно высокая жесткость во всех плоскостях, что дает возможность ограничиться только одной горизонтальной связью.

§ 9.3. Переходные площадки и мосты

На отметках остановок лифта и выходов из шахты лестниц к каркасу примыкают переходные мосты, связывающие его с площадками и предназначенные для подачи из лифта грузов и

прохода обслуживающего и ремонтного персонала к объектам комплекса печи – доменной печи, воздухонагревателям и другим сооружениям. При близком взаимном расположении лифта и объектов печи устраиваются переходные площадки, при дальнем – переходные мосты.

Переходные площадки решаются в виде балочных клеток с решетчатым настилом и ограждением.

Переходные мосты могут иметь достаточно большую длину – до 30 м. Несущие конструкции таких мостов обычно выполняются в виде двух стержневых ферм с движением поверху. Фермы соединяются системой связей по нижнему и верхнему поясам и создают пространственный блок, воспринимающий все нагрузки и воздействия. По длине блока устраивают поперечные стержневые диафрагмы жесткости с шагом не менее 2 – 2,5 высоты фермы.

Вдоль некоторых площадок и мостов устраивают моно-рельсовый путь для перемещения грузов. В этом случае по длине моста устанавливают поперечные рамы для крепления несущего элемента пути. Рамы развязывают системой распорок и одной или двумя вертикальными связевыми панелями, обеспечивающими общую устойчивость системы. Высота рам с учетом отметки положения грузоподъемного крюка должна обеспечить необходимый габарит прохода по мосту не менее 2 м.

Наличие решетчатого настила поверх несущих конструкций не может служить связевым диском. Только в случае применения сплошного настила из листового проката, приваренного по длине сплошным швом к элементам верхнего пояса фермы, может быть рассмотрен вопрос об исключении связей в этой плоскости. При этом надо иметь в виду возможное скопление пыли и снега на сплошном настиле и соответствующее увеличение нагрузки.

При проектировании переходных мостов опорные узлы должны обеспечить их температурные перемещения и возможность независимого температурного роста сооружений, на которые опирается мост.

ГЛАВА 10 КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ПОДАЧИ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

§ 10.1. Общие сведения

Наиболее распространенным способом загрузки печи является подача сырых шихтовых материалов на ее колошник специальными открытыми вагонетками, так называемыми скипами, которые движутся по подъемнику. В некоторых случаях, особенно для загрузки доменных печей большого объема, применяется наклонная галерея ленточного конвейера.

Скиповый подъемник, по которому в циклическом режиме двигаются скипы, называемый еще колошниковым подъемником или наклонным мостом, устанавливается под углом, примерно 50 – 60° к горизонту, при уклоне проезжей части моста в скиповой яме – 60°. Скип представляет собой вагонетку (рис. 10.1) с удлиненным кузовом, передними и задними скатами. Крепление тяговых канатов скиповой лебедки к скипу выполнено с помощью специального упряжного устройства. Кузов скипа изготавливается из листовой стали толщиной 10 – 12 мм. Для защиты от истирания внутренняя поверхность скипа футерована плитами из марганцовистой стали. Для облегчения выгрузки материалов кузов имеет клинообразную форму, расширяющуюся к выходному отверстию и суживающуюся к торцу.

Передвижение скипа осуществляется по рельсам, уложенным на несущих конструкциях моста, посредством тросов специальной скиповой лебедкой с тяговым усилием более 40 тс. Емкость скипа зависит от объема печи и достигает 20 м³, собственная масса скипа доходит до 30 – 35 т, а масса груженого скипа – до 70 – 75 т. В то время как по одному пути наклонного моста поднимается груженный скип, по другому – скип, свободный от груза, опускается в скиповую яму для загрузки, чем создает дополнительное тяговое усилие в канате подъема груженого скипа.

Верхняя часть путей наклонного моста является разгрузочным участком и называется опрокидывающим устройством. На этом участке рельсовый путь раздваивается на две криволинейные ветви: нижнюю – для передних и верхнюю – для задних колес скипа. Форма

разгрузочных кривых должна обеспечивать плавный выход скипа на разгрузочный участок минимальной длины.

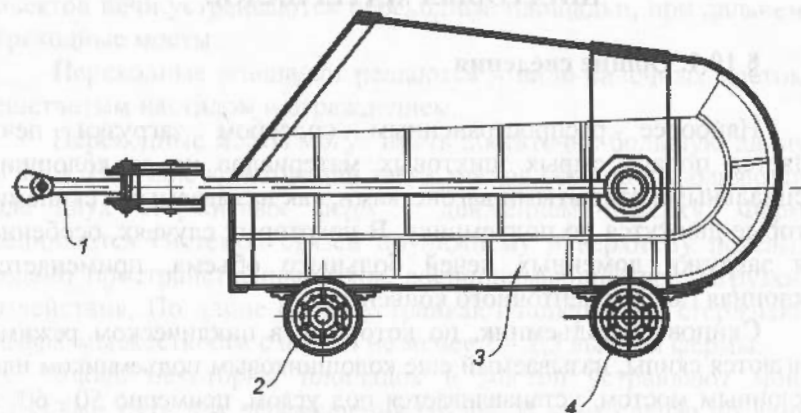


Рис. 10.1. Скиповая тележка:

1 – упряжь для крепления тяговых канатов; 2, 4 – передние и задние скаты соответственно; 3 – кузов

Ранее по всей длине движения скипа устанавливались направляющие – контррельсы, препятствующие его схождению с рельсов. В последнее время контррельсы устанавливают только в местах загрузки скипов – в скиповой яме и разгрузки – на опрокидывающем устройстве.

Передние и задние скаты скипа отличаются между собой только бегунками. В переднем скате бегунки имеют внутреннюю реборду, а реборда бегунков заднего ската расположена посередине обода. Внутренней своей частью бегунки заднего ската катятся на протяжении почти всего пути по тем же рельсам, что и передний скат. Только при переходе на разгрузочные кривые бегунки своей внешней частью начинают катиться по дополнительным наружным рельсам разгрузочного (опрокидывающего) участка. В это же время бегунки переднего ската продолжают движение по внутренним рельсам, что приводит к опрокидыванию скипа в верхней части моста и сыпанию материалов в приемную воронку загрузочного устройства (рис. 10.2.). В этот момент на конце моста и в канатах подъема груженого скипа возникает динамическая сила, связанная с почти мгновенной разгрузкой скипа. Эта сила по величине близка к

массе шихты в скипе, но направлена вверх. Поэтому скиповые шкивы для тросов располагают на самом мосту, а не на копре печи, как было ранее, чтобы не передавать динамические воздействия от тросов на копер в момент разгрузки скипа и, тем самым, не подвергать раскачиванию штанги подвесных конусов печи.

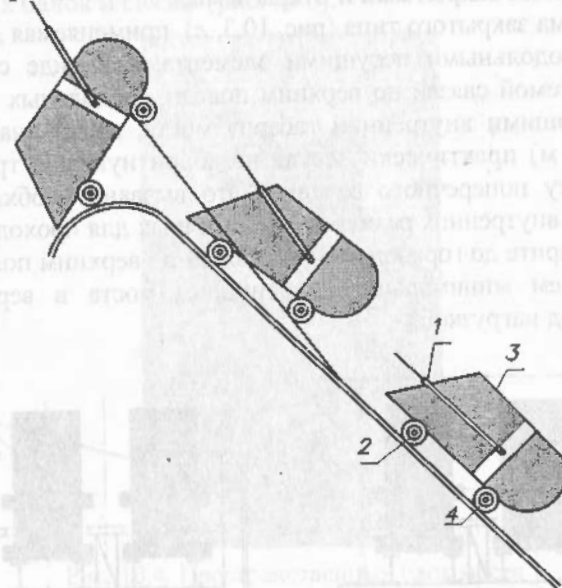


Рис. 10.2. Схема движения скипа вверх:

1 – упряжь для крепления тяговых канатов; 2, 4 – передние и задние скаты соответственно; 3 – кузов

Для доменных печей объемом более 3000 м^3 , эксплуатация которых требует большого объема шихтовых материалов, скиповые подъемники не в состоянии обеспечить необходимый объем загрузки печи. Для доменной печи объемом 3200 м^3 была разработана и осуществлена схема подачи сырых шихтовых материалов на колошник печи двумя скиповыми подъемниками, расположенными в плане под углом друг к другу, но, несмотря на успешную эксплуатацию, широкого применения она не нашла.

В дальнейшем для доменных печей объемом 5000 и 5580 м^3 была применена подача шихтовых материалов на колошник печи непрерывным ленточным конвейерным транспортером.

§ 10.2. Скиповые подъемники

Одним из признаков классификации наклонных мостов (скиповых подъемников) является тип их поперечных сечений, которые бывают закрытыми и открытыми.

Система закрытого типа (рис. 10.3, а), применяемая длительное время, с продольными несущими элементами в виде стержневых ферм, с системой связей по верхним поясам продольных элементов, ограничивающими внутренний габарит моста, имеет значительную (до 5,0 – 5,5 м) практически всегда негабаритную для транспортировки высоту поперечного сечения. Это вызвано необходимостью обеспечения внутренних размеров, достаточных для прохода скипов и тросов в габарите до горизонтальных связей по верхним поясам ферм, и требованием минимальных деформаций моста в вертикальной плоскости под нагрузкой.

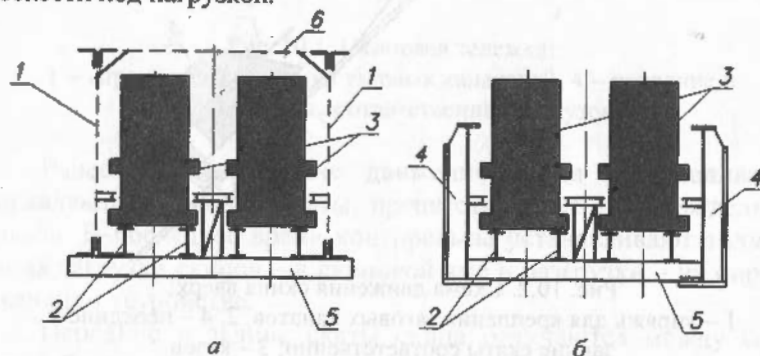


Рис. 10.3. Поперечные разрезы наклонных мостов:
а – закрытого типа; б – открытого типа; 1 – несущие фермы пролетных строений; 2 – продольные подрельсовые балки; 3 – скипы; 4 – несущие балки пролетных строений; 5 – поперечные балки проезжей части; 6 – система связей

Система открытого типа (рис. 10.3, б) с продольными элементами в виде габаритных для транспортировки сплошностенчатых балок, нашедшая широкое применение, требует при компоновке комплекса определенных условий для установки одной или двух опор моста, с целью уменьшения пролетов балок и обеспечения габаритной для транспортировки высоты. На рис. 10.4 показан пространственный блок такого моста в стадии монтажа.

По конструктивной форме в поперечном сечении наклонный мост представляет собой пространственную систему, состоящую из двух несущих продольных элементов в виде сплошностенчатых балок, соединенных между собой в уровне нижнего пояса поперечных балок и связей (рис. 10.5).



Рис. 10.4. Пространственный блок моста открытого типа в стадии монтажа

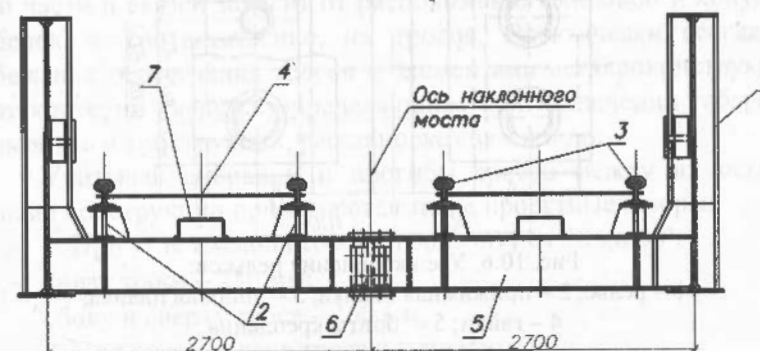


Рис. 10.5. Конструктивная форма наклонного моста открытого типа:
1 – несущие продольные балки; 2 – подрельсовые ездовые балки;
3 – рельсы; 4 – стяжные элементы; 5 – поперечная балка;
6 – монтажный стык поперечной балки; 7 – скобы для прохода по мосту

По поперечным балкам устраивается проезжая часть моста в виде продольных подрельсовых балок с установленными на них железнодорожными рельсами, по которым перемещаются скипы. Для сохранения постоянного расстояния между рельсами через 2 м устраивают тяжи, соединяющие попарно продольные балки.

Крепление рельсов, как правило, типа КР-80, выполняется в соответствии с ГОСТ 24741-81 с учетом необходимости их рихтовки и замены после износа (рис. 10.6). Для устойчивости продольных балок и предотвращения опрокидывания они закрепляются в поперечном направлении в узлах опирания.

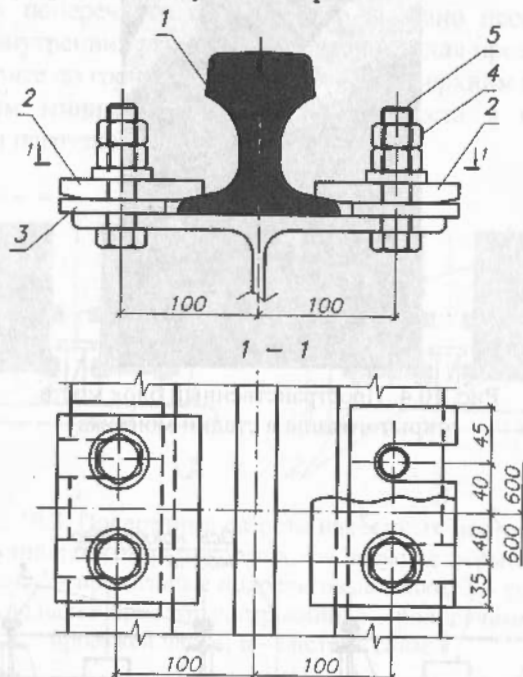


Рис. 10.6. Узел крепления рельсов:

1 – рельс; 2 – прижимная планка; 3 – упорная планка;
4 – гайки; 5 – болты крепления

Пространственная жесткость моста закрытого типа обеспечивается системами связей по верхним и нижним поясам продольных ферм и замкнутыми поперечными рамами, а моста

открытого типа – незамкнутыми поперечными рамами, образованными поперечными балками, жестко прикрепленными к вертикальным ребрам главных балок.

Снизу мост закрывают листом толщиной 4–6 мм для защиты пространства под ним от случайного выпадения материала из скипа. Для передвижения обслуживающего персонала по этому наклонному настилу к нему между путями скипов привариваются ступени, в большинстве случаев в виде скоб.

Ширина моста зависит от габарита скипа и размеров задней рамы колошниковой копра, между колоннами которой проходит мост. Для обеспечения свободного прохода скипа с учетом возможного зимнего намерзания льда принимаются следующие проектные зазоры между крайними точками кузова скипа и ближайшими точками конструкций:

- сбоку скипа на всем пути движения по мосту – 150 мм;
- сбоку скипа на пути движения по опрокидывающему устройству – 50 мм;
- сверху скипа – 250 мм.

С учетом возможной неточности изготовления конструкций зазор между продольными несущими элементами моста и гранями колонн копра принимается 150 мм.

Компоновка несущих конструкций моста, элементов проезжей части и связей зависит от расположения скиповой и конусной лебедок и, соответственно, их тросов. Практически всегда, во избежание пересечения тросов с элементами металлоконструкций, этот критерий является определяющим при назначении габаритов элементов и конструкций, расстановке связей и пр.

Учитывая вибрации и прогибы тросов между их осью и гранью конструкции принимаются такие проектные зазоры:

1. При угле наклона троса к горизонту от 20 до 60°:
 - снизу троса – 250 мм;
 - сбоку и сверху троса – 150 мм.
2. При угле наклона троса к горизонту 90°:
 - снизу, сбоку и сверху троса – 150 мм.
3. При промежуточных значениях углов наклона тросов величина зазоров определяется с помощью интерполяции.

Указанные величины зазоров приведены для точек тросов вдали от мест их закрепления, вблизи таких мест размеры зазоров могут быть уменьшены.

На главных баках моста для опирания канатных шкивов устанавливаются так называемые подшкивные устройства – этажерки с опорными балками и площадками.

Для прохода к этим площадкам вдоль моста с двух сторон устраиваются лестницы с переходными площадками, которые крепятся к продольным несущим элементам моста достаточно часто, учитывая вибрации.

§ 10.3. Основные схемы мостов скиповых подъемников

По статической схеме мосты бывают статически определимые – разрезные и статически неопределимые – неразрезные.

По конструктивной схеме опирания наклонные мосты бывают однопролетные, как правило, с консолью, двухпролетные неразрезные с консолью и двухпролетные разрезные с консолью (рис. 10.7).

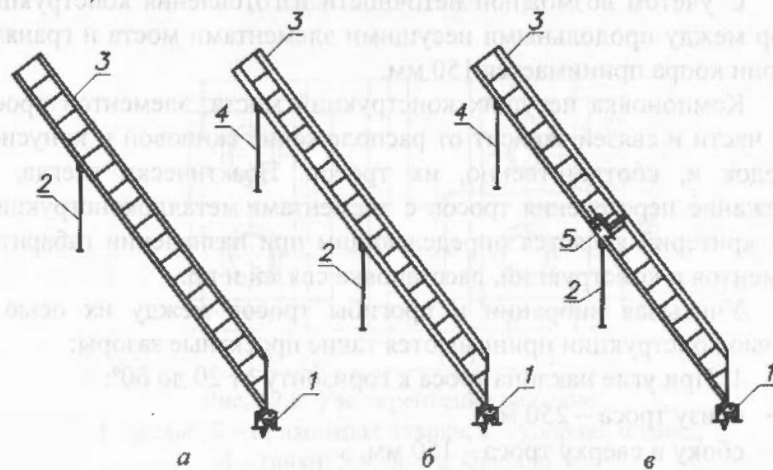


Рис. 10.7. Конструктивные схемы мостов:

а – однопролетный с консолью; б – двухпролетный неразрезной с консолью; в – двухпролетный разрезной с консолью; 1 – опора моста на стенку скиповой ямы; 2, 4 – нижний и верхний пилоны соответственно; 3 – пролетное строение моста; 5 – шарнир

При однопролетной схеме (рис. 10.7, а) несущие продольные элементы опираются нижним концом на стенку скиповой ямы и в верхней части пролета на плоскую опору – пилон. Далее до колошниковой копра и загрузочного устройства несущие продольные элементы являются консольными.

При двухпролетной схеме (рис. 10.7, б) продольные элементы опираются дополнительно на верхнюю опору, установленную на колошниковой площадке или на конструкциях четырехколонника, расположенных в этом районе. Промежуточная опора сдвигается ближе к опоре на скиповой яме и опирается, как правило, на литейный двор, а от верхней опоры до приемной воронки загрузочного устройства располагается небольшая консоль моста.

Учитывая относительно небольшую высоту пилонов и с целью максимального приближения их к работе по шарнирной схеме, узлы опирания пилонов на опорные конструкции могут решаться с помощью специальных центрирующих прокладок благодаря которым пилоны воспринимают только нормальные и поперечные силы без передачи изгибающих моментов (рис. 10.8). Аналогично решаются узлы опирания главных балок на стенку скиповой ямы.

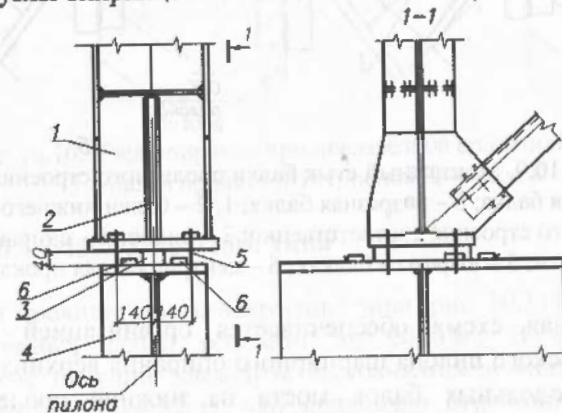


Рис. 10.8. Шарнирный узел опирания пилона:

1 – стойка пилона; 2 – прорезь в стенке стойки пилона; 3 – центрирующая прокладка; 4 – опорная конструкция; 5 – стяжные болты; 6 – упоры

При неблагоприятных грунтовых условиях и возможных неравномерных осадках фундаментов или при необходимости компенсации температурных деформаций высоких опор моста

продольные двухпролетные балки выполняются разрезными статически определимыми.

Стык главной балки при неразрезной схеме решается с опорной плоскостью на нижней балке, на которую опирается верхняя балка (рис. 10.9, а).

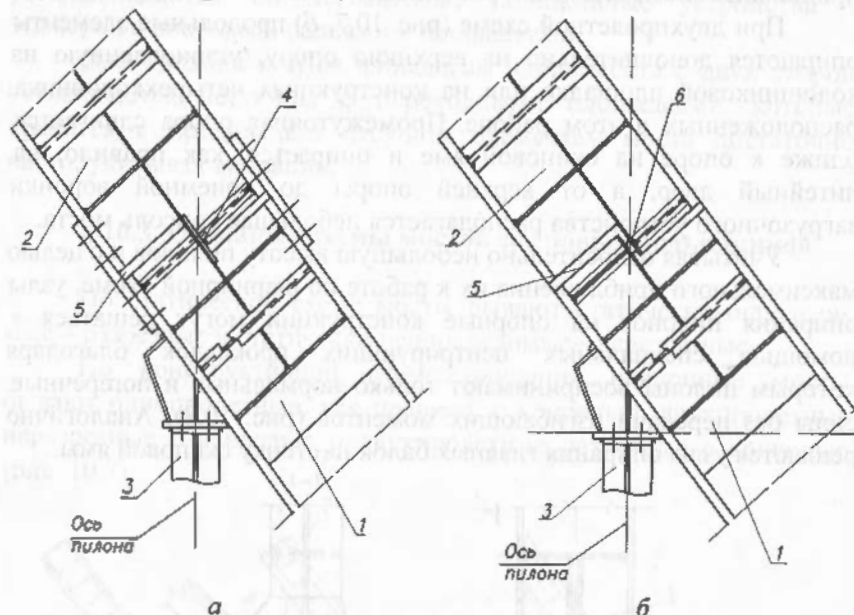


Рис. 10.9. Монтажный стык балки пролетного строения:
а – неразрезная балка; б – разрезная балка; 1, 2 – балки нижнего и верхнего пролетного строения соответственно; 3 – пилон; 4 – опирание по плоскости; 5 – вырезы в балках; 6 – центрирующая прокладка

Разрезная схема обеспечивается организацией в районе среднего плоского пилона шарнирного опирания верхних пролетов несущих продольных балок моста на нижние пролеты через центрирующую подкладку (рис. 10.9, б).

В зависимости от соотношения пролетов балок опирание может быть также решено по плоскости без такой прокладки. В узле необходимо предусмотреть специальные упоры для передачи на нижнюю опору составляющей вертикальных сил, направленную вдоль моста.

При неразрезной схеме возможно также устройство непрерывных продольных балок моста без разрыва их на плоском пилоне (рис. 10.10).

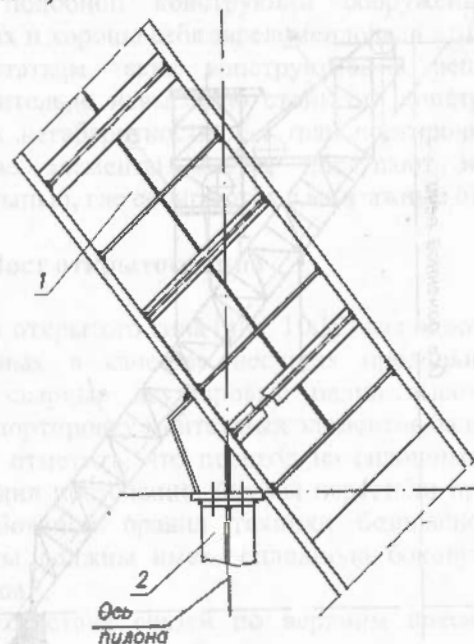


Рис. 10.10. Узел опирания при неразрезной сплошной балке:
1 – балка пролетного строения; 2 – пилон

§ 10.4. Мост закрытого типа

Как правило, мосты закрытого типа (рис. 10.11) применялись для доменных печей объемом до 2000 м³. В таких мостах продольные несущие элементы выполнялись в виде стержневых ферм высотой 5,0–5,5 м, что позволяло ограничить их максимальный прогиб не более 1/800 пролета или, для консольной схемы, двойного вылета консоли. При таких габаритах также обеспечивалась возможность пропуска канатов. Проезжая часть и пути движения скипов решались как обычно в виде балочной клетки, расположенной в уровне нижнего пояса несущих ферм. Проезжая часть имела вид фермы с раскосами связей и стойками, роль которых выполняли поперечные балки. Такая ферма

обеспечивала общую горизонтальную жесткость моста и воспринимала горизонтальные усилия, возникающие в уровне нижнего пояса несущих продольных ферм.

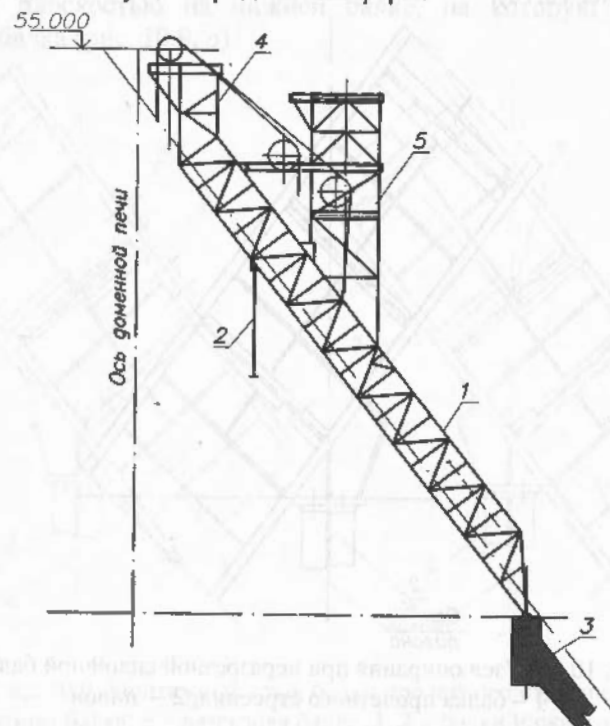


Рис. 10.11. Мост закрытого типа:

- 1 — продольные фермы; 2 — пилон; 3 — стенка скиповой ямы;
4 — устройство для опрокидывания скипа; 5 — подшивное устройство

По всей длине моста с шагом, примерно, равным высоте ферм, устраивались поперечные вертикальные рамы, в состав которых входили поперечные балки, стойки продольных ферм и распорки связей по верхнему поясу. Эти рамы за счет собственной жесткости, создаваемой узлами сопряжения поперечных балок со стойками ферм, обеспечивали устойчивость из плоскости верхних поясов продольных ферм и создавали равномерное распределение горизонтальных сил, передавая их на нижнюю ферму.

Сечения поясов ферм моста и раскосов решетки обычно выполняются из двух уголков с добавочными листами на

отдельных наиболее нагруженных участках. Стойки, входящие в состав поперечных рам, выполняются из элементов, способных воспринимать изгибающие моменты в системе рамы.

Мосты подобной конструкции сооружены на многих доменных печах и хорошо себя зарекомендовали в эксплуатации.

К недостаткам таких конструктивных решений следует отнести относительно невысокую стойкость конструкций против коррозии и их негабаритность для транспортировки — основные конструктивные элементы мостов поступают на монтажную площадку россыпью, где собираются в монтажные блоки.

§ 10.5. Мост открытого типа

В мостах открытого типа (рис. 10.12) как однопролетных, так и двухпролетных в качестве несущих продольных элементов применяются сварные двутавровые балки высотой, обеспечивающей транспортировку монтажных элементов балок в собранном виде. Следует отметить, что переход на сплошные балки вместо ферм происходил постепенно. Фермы перестали применять после введения требований правил техники безопасности, согласно которым мосты должны иметь сплошную боковую обшивку из стальных листов.

Из-за отсутствия связей по верхним поясам продольных балок одной из основных проблем мостов открытого типа является их поперечная устойчивость. Так как верхние пояса балок имеют большую длину, их устойчивость поперек моста не может быть обеспечена без промежуточных закреплений, функции которых в мостах закрытого типа выполняла система связей по верхним поясам главных ферм.

В мостах открытого типа устанавливаются поперечные открытые (без верхнего ригеля) рамы. Нижним ригелем рамы является поперечная балка проезжей части моста, а стойками — двутавровые в поперечном сечении элементы, образованные вертикальными тавровыми ребрами главных балок и примыкающими к ним частями стенок (см. рис. 10.5). Эти рамы являются упруго-податливыми опорами поперек моста для верхнего пояса продольных балок. Жесткость рам обеспечивается жесткостью узлов сопряжения поперечных балок проезжей части — ригелей рам с вертикальными стойками рам — ребрами, которые определяют расчетную подат-

ливость стоек рам. Расстояние между рамами принимается равным, примерно, высоте продольной балки. Такие рамы устанавливаются также в местах опирания главных балок на опоры.

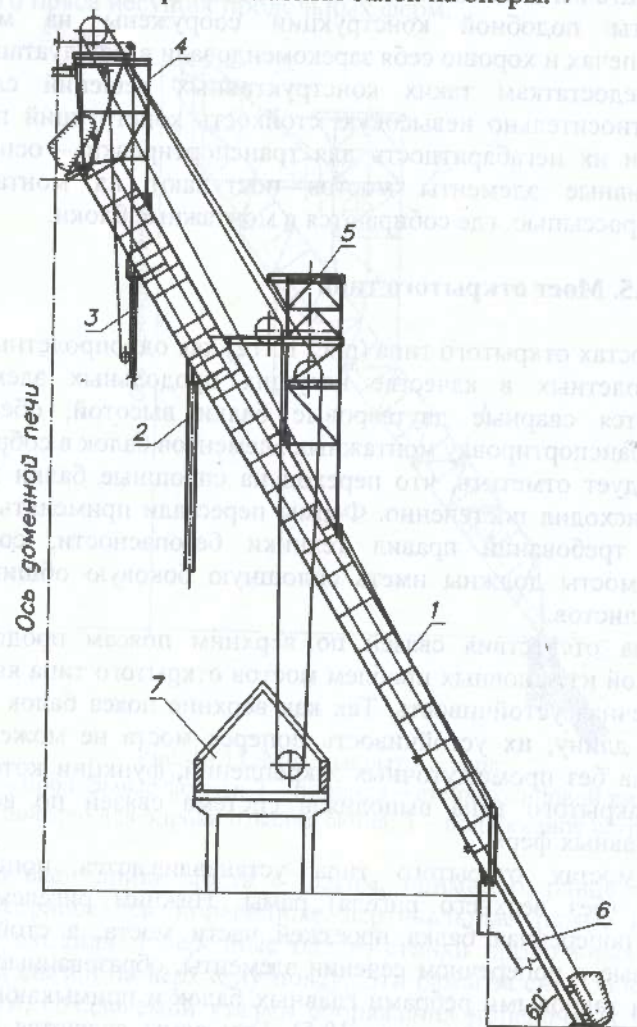


Рис. 10.12. Мост открытого типа:

- 1 – балки пролетного строения; 2, 3 – пилоны;
4 – устройство для опрокидывания скипа; 5 – подшкивное устройство;
6 – стенка скиповой ямы; 7 – здание лебедок

Учитывая высокую ответственность этих узлов, следует стремиться к их полному заводскому изготовлению совместно с продольными балками, что, прежде всего, зависит от разбивки поперечных балок на монтажные марки. Здесь возможны три варианта.

1. Стык поперечных балок выносят за границы рамных узлов, объединяя в единую отправочную марку короткий участок поперечной балки и стойки главной балки, обеспечивая их габаритность для транспортировки. Рамный узел выполняется в заводских условиях (рис. 10.13, а).

К недостаткам схемы можно отнести невозможность монтажа проезжей части блоками в виде двух пар балок со связями и рельсами совместно с поперечными балками и сложность транспортировки главных балок с частью поперечных балок.

2. При невозможности организации рамного узла в заводских условиях и транспортировки такой монтажной марки его выполняют на месте строительства. В зависимости от условий транспортировки поперечная балка может транспортироваться целиком (рис. 10.13, б) или предусматривается ее стык посередине (рис. 10.13, в). При этом монтаж проезжей части осуществляется блоками полной готовности.

3. Достаточно широкое распространение получила компоновка, при которой поперечная балка имеет стык посередине, а к ее краям на заводе-изготовителе присоединяют элементы стойки главной балки моста (рис. 10.13, г). В процессе монтажа их соединяют между собой, образуя жесткий узел (рис. 10.14).

Горизонтальная жесткость моста обеспечивается горизонтальной фермой в уровне нижнего пояса продольных балок.

Несмотря на широкое распространение таких мостов, следует отметить их значительно меньшую жесткость по сравнению с мостами закрытого типа, особенно против кручения и крутильных колебаний.

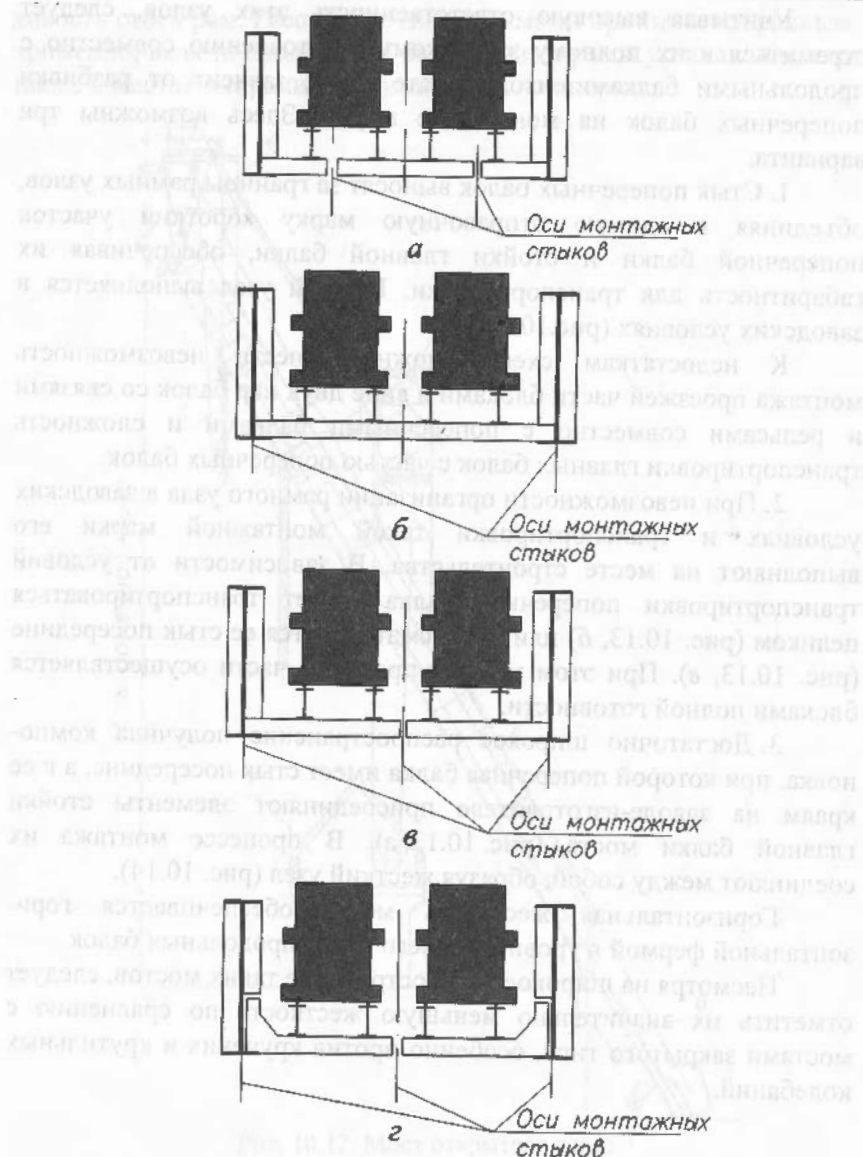


Рис. 10.13. Разбивка проезжей части на отправочные марки:
а, б, в, г – варианты расположения стыков поперечных балок

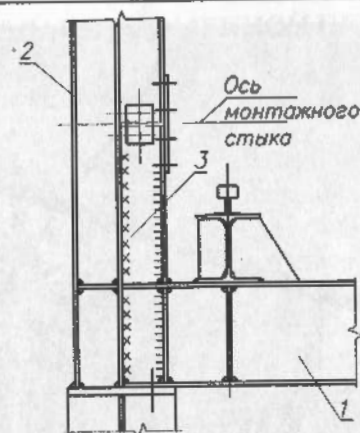


Рис. 10.14. Узел рамного соединения балки проезжей части с балкой пролетного строения:

1 – поперечная балка проезжей части; 2 – вертикальное ребро продольной балки пролетного строения; 3 – участок, поставляемый на монтаж вместе с поперечной балкой

§ 10.6. Конвейерная подача материалов

Несущие конструкции моста под конвейер могут быть различными. Для доменных печей объемом 5000 и 5580 м³ пролетные строения выполнены в виде круглоцилиндрической оболочки (см. рис. 10.14), диаметр которой рассчитывается, исходя из возможных максимальных величин пролетов. Благодаря увеличению пролетов до 60 м появилась возможность полностью использовать несущую способность оболочки как изгибаемой балки и свести количество опор галереи и, соответственно, их фундаментов к минимуму. В связи с насыщенностью железнодорожными путями района центрального узла доменной печи такое решение позволяет улучшить его планировку.

Внутри оболочки (рис. 10.15) расположено перекрытие, на котором установлен ленточный конвейер. Пространство оболочки под перекрытием в ряде случаев может использоваться для подачи воздуха из приточной станции на объекты доменной печи.

Для естественной аэрации в оболочке устроены поворотные окна круглой формы – иллюминаторы и патрубки вентиляции.

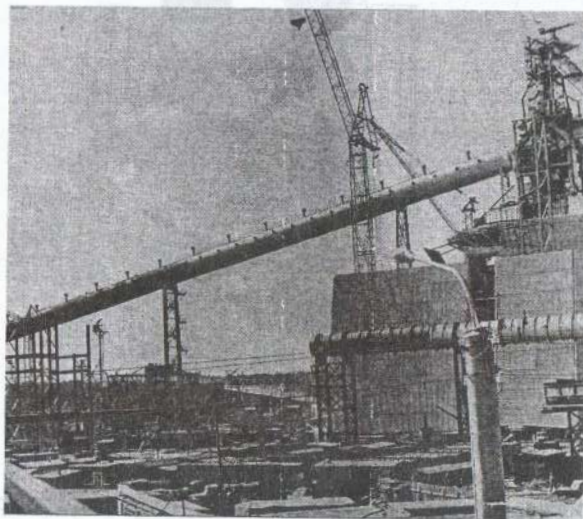


Рис. 10.15. Общий вид галереи подачи на колошник

Негабаритная для транспортировки оболочка поставляется на монтажную площадку чаще всего в виде рулона и после его разворота на стенде, последующего укрупнения и установки перекрытия и других внутренних конструкций монтируется на системе опор.

Неподвижная опора системы устраивается в самой нижней точке галереи – на стенке скиповой ямы. Все остальные опоры выполняются плоскими, не препятствующими перемещению галереи от климатических температурных воздействий вдоль своей оси. Опираение оболочки осуществляется через кольцевые ребра жесткости, которые одновременно обеспечивают ее устойчивость в районах максимальных поперечных сил. Поперечные балки пола опираются на промежуточные кольцевые ребра жесткости, которые одновременно обеспечивают устойчивость оболочки и неизменяемость формы ее поперечного сечения. Эти ребра должны быть расположены с шагом не более двух диаметров поперечного сечения оболочки.

При опасности смерзания шихтовых материалов галерея проектируется утепленной.

ГЛАВА 11 ЗДАНИЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

§ 11.1. Общие сведения

Для организации процесса разливки и транспортирования продуктов плавки, а также размещения оборудования для управления и обслуживания доменной печи вокруг нее сооружается здание, так называемый литейный двор.

В зависимости от количества и расположения выпускных леток чугуна и шлака здание выполняется по одну сторону доменной печи или с обеих ее сторон. По длине здание условно делится на части: одна или две боковые, в которых происходит разливка чугуна и шлака – литейные дворы и средняя, непосредственно примыкающая к печи, – поддоменник.

Основным технологическим элементом здания служит рабочая площадка, на которой расположены желоба, принимающие из доменной печи чугун и шлак и транспортирующие их в чугуновозные и шлаковозные ковши, стоящие на постановочных путях под рабочей площадкой. Кроме того, на рабочей площадке располагается оборудование для открытия и закрытия леток.

Рабочая площадка, как правило, состоит из сборных железобетонных плит, уложенных по железобетонной или металлической балочной клетке, опирающейся на железобетонные или металлические колонны. Для установки желобов с необходимым уклоном укладывается достаточно высокий слой песка, внутри которого располагаются желоба. Поверх песка устраивается пол из кирпича, положенного «на ребро».

Участки рабочей площадки в районе размещения качающихся или поворотных желобов выполняются в металле.

Конструкция рабочей площадки, в основном, зависит от размеров, типа и расположения желобов. Одной из проблем компоновки современной рабочей площадки является выполнение ее плоской с возможностью передвижения механизированного транспорта.

Стационарные желоба в виде разветвленной сети проходят от доменной печи до сливных носков, расположенных над местом стоянки каждого ковша, и требуют значительных размеров рабочей

площадки для их размещения. Один из примеров расположения желобов показан на рис. 11.1.

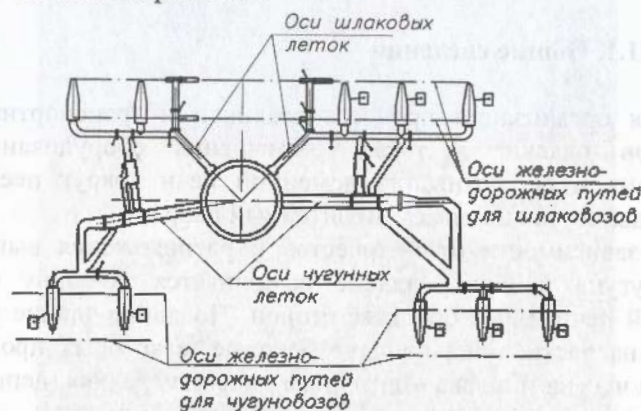


Рис. 11.1. План расположения желобов чугуна и шлака

Более рациональной является разливка чугуна и шлака через один сливной носок стационарного желоба с применением подвижных — качающихся или поворотных желобов. Такой метод разливки дает возможность уменьшить длину стационарных желобов на 70 — 80 %, а также площадь литейного двора.

При использовании качающегося желоба чугун или шлак направляется по стационарному желобу небольшой длины к качающемуся, который наклоняют в сторону порожнего чугуновоза или шлаковоза. После его наполнения желоб поворачивается в вертикальной плоскости в сторону следующего ковша.

На рабочей площадке размещаются машины, предназначенные для закрытия чугунной летки, называемые электропушками. Через пушку подается леточная огнеупорная масса, заполняющая канал летки после очередного выпуска продуктов плавки. Пушки имеют электрический привод и крепятся к колонне, опирающейся на фундамент, расположенный на рабочей площадке.

Вскрытие чугунных леток производится с помощью сверлильной машины, устанавливаемой на рабочей площадке аналогично пушке.

Шлаковые летки закрываются шлаковыми стопорами, рабочий орган которых — пробка закрывает отверстие шлаковой

фурмы. При открытии шлаковой летки стопор-пробка извлекается из нее. Стопор устанавливается над шлаковой леткой и крепится к металлоконструкциям печи.

Над рабочей площадкой располагается каркас самого здания, предназначенный для укрытия рабочей площадки, размещения мостового крана, других грузоподъемных средств и вспомогательных конструкций. Учитывая большие тепловыделения продуктами плавки и собственно печью, конструктивно здание выполняется неутепленным с кровлей под углом 40° , что при увеличении металлоемкости сооружения решает две задачи — самопроизвольное удаление с крыши большого количества пыли и увеличение внутреннего объема здания, улучшая его общую аэрацию.

В связи с переводом печей на повышенное давление газа под колошником и, соответственно, сокращением выноса пыли в атмосферу были попытки применения малоуклонной кровли со стропильными фермами с уклоном 1:10, например, для типовой доменной печи объемом 2700 м^3 . Однако из-за скопления на кровле больших объемов колошниковой пыли кровля была переделана на крутоуклонную с углом наклона 40° .

При проектировании здания доменной печи необходимо учитывать близкое расположение к конструкциям железно-дорожных путей движения жидких продуктов плавки с высокотемпературными излучениями и имеющими место брызгами раскаленных продуктов. Воздействие лучистого тепла в сочетании с одновременным выделением агрессивного газа, попадание брызг и выплесков горячего продукта из ковшей вызывает пережоги, коробление и коррозию элементов, что ведет к разрушению конструкций. Поэтому в таких зонах предусматривается защита колонн и балок площадок литейного двора специальными экранами.

Экраны для защиты балок и горизонтальных поверхностей площадок, конструкций перекрытий, переходов и т.п., расположенных на высоте менее 5 м от верха ковша, устанавливаются в местах возможной длительной остановки ковшей с горячими продуктами плавки для защиты. Экраны, как правило, состоят из несвязанных между собой элементов в виде металлических или чугунных плит площадью не более 4 м^2 . Оба типа экранов имеют существенные недостатки: металлические листы деформируются

от термических воздействий, а подвесные чугунные плиты имеют значительный вес и весьма материалоемкие. Кроме того, экраны из стального листа недолговечны. Они коробятся, нередко попадают в габарит движения состава и разрушаются.

Поэтому наибольшее распространение получили экраны из подвесных чугунных плит. На рис. 11.2 показан пример экранирования балки рабочей площадки. Для подвески чугунных плит к низу конструкции крепятся специальные чугунные профили таврового сечения, на полках которых располагаются плоские чугунные плиты.

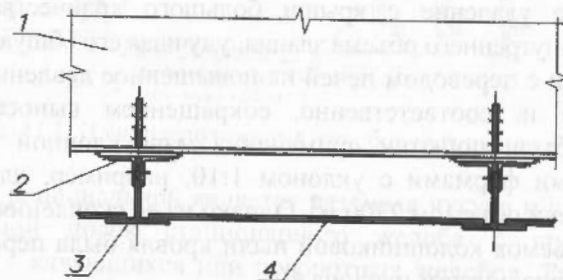


Рис. 11.2. Экранирование балок рабочей площадки:
1 – экранируемая балка; 2 – крепежные элементы; 3 – чугунный профиль таврового сечения; 4 – плоский чугунный лист

Элементы таврового сечения и плоские плиты изготавливаются из жаропрочного чугуна, например, марки Ж4Х-08 по ГОСТ 7769-82.

§ 11.2. Особенности конструктивных форм

Наибольшее распространение получили прямоугольные здания литейных дворов. Каркас здания выполняется в виде сплошнотенчатых рам с ломаным ригелем полигонального очертания (рис. 11.3). Выше уровня мостового крана, вне его габаритов располагается затяжка, воспринимающая распорные усилия наклонных ригелей. Колонны и ригель выполняются сварными двутаврового сечения. В районе поддоменника рамы проектируются Г-образными, с опиранием ригеля на колонны печи или специальный подстропильный элемент.

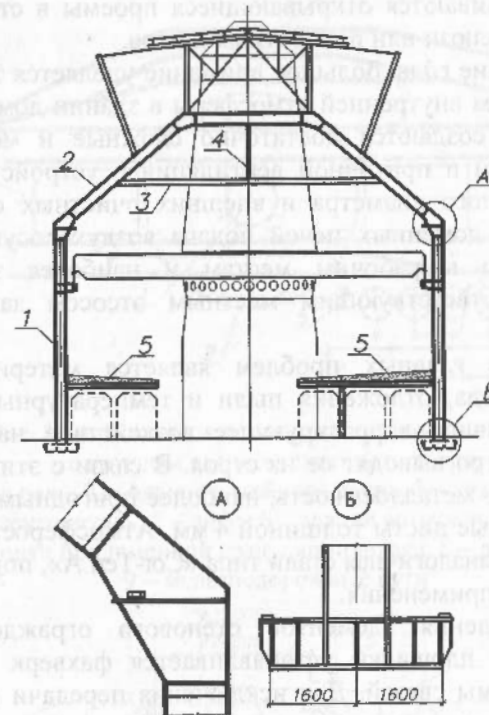


Рис. 11.3. Поперечная рама прямоугольного здания литейного двора:
1 – колонна рамы; 2 – наклонный ригель рамы; 3 – затяжка рамы;
4 – подвеска затяжки; 5 – рабочая площадка

Между колоннами устанавливаются продольные связи, обеспечивающие жесткость здания в этом направлении. Поперечная жесткость рам достигается жестким сопряжением ригеля с колонной и защемлением колонн в фундаментах с помощью повышенных башмаков.

Подкрановые балки опираются на консоли, прикрепленные к колоннам.

При опирании пилон наклонного моста на здание между колоннами поперечных рам поддоменника предусматривается специальная опорная балка.

В коньке здания имеется аэрационный фонарь с ветроотбойными стенками. Для притока воздуха на уровне рабочей

площадки устраиваются открывающиеся проемы в стенах в виде управляемых жалюзи или поворотных щитов.

В последние годы большое внимание уделяется требованиям санитарных норм внутренней атмосферы в здании доменной печи. С этой целью создаются достаточно сложные и металлоемкие системы аэрации и приточной вентиляции с устройством трубопроводов большого диаметра и внешних очистных сооружений. Для некоторых доменных печей подача воздуха осуществляется непосредственно к рабочим местам и наиболее запыленным участкам с соответствующим местным отсосом загрязненного воздуха.

Одной из главных проблем является материал кровли. Агрессивная среда, отложения пыли и температурные перепады оказывают активное коррозирующее воздействие на кровлю и достаточно быстро выводят ее из строя. В связи с этим, несмотря на значительную металлоемкость, наиболее пригодным для кровли являются стальные листы толщиной 4 мм. Атмосферостойкая сталь марки 10ХНДП, аналогичная стали типа «Cor-Ten A», пока не нашла здесь широкого применения.

Для крепления элементов стенового ограждения выше уровня рабочей площадки устанавливается фахверк из колонн, ригелей и системы связей. Для исключения передачи на колонны фахверка нагрузки от покрытия они прикрепляются к рамам с помощью листового шарнира. Вдоль торцов здания устанавливаются связи и горизонтальные площадки, уменьшающие пролет колонн при работе на ветровую нагрузку.

Дальнейшим развитием конструктивной формы здания литейного двора можно считать создание круглых в плане зданий, естественно повторяющих очертания доменной печи, повышающих уровень обслуживания и механизации трудоемких работ и создающих одинаковые условия эксплуатации со всех сторон печи, особенно при двухстороннем расположении леток.

Для одной из крупнейших доменных печей объемом 5000 м^3 , с целью обеспечения свободного пространства для размещения оборудования и обслуживания, в 1974 г. впервые было возведено здание литейного двора в виде круглого пространственного шатрового каркаса диаметром 76,4 м и высотой более 40 м. Общая его компоновка показана на рис. 11.4, а конструктивное решение каркаса – на рис. 11.5 [60].

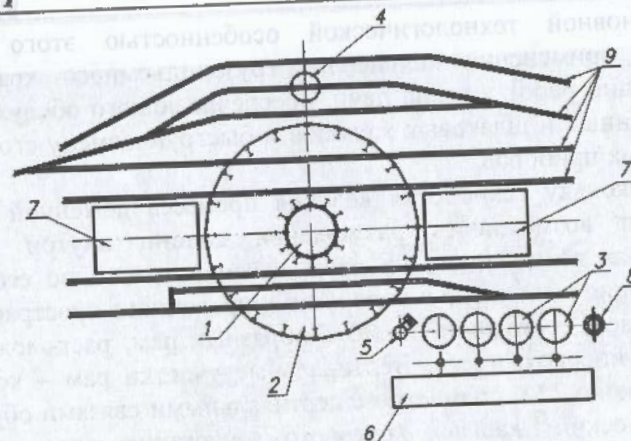


Рис. 11.4. Компоновка сооружений доменной печи с круглым зданием литейного двора:

- 1 – доменная печь; 2 – здание литейного двора; 3 – воздухоподогреватели; 4 – пылеуловитель; 5 – лифт; 6 – здание воздухоподогревателей; 7 – установки грануляции шлака; 8 – дымовая труба; 9 – железнодорожные пути

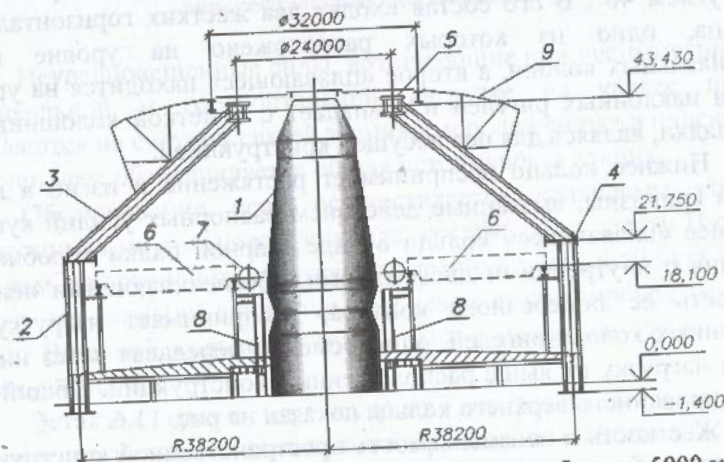


Рис. 11.5. Рама круглого здания доменной печи объемом 5000 м^3 :

- 1 – доменная печь; 2 – вертикальная колонна рамы; 3 – наклонный ригель рамы; 4 – нижнее опорное кольцо; 5 – верхнее «плавающее» кольцо; 6 – круговой мостовой кран; 7 – кольцевой воздуховод горячего дутья; 8 – опорная эстакада для опирания мостового крана и воздуховода горячего дутья; 9 – аэрационный фонарь

Основной технологической особенностью этого здания является применение кольцевого грузоподъемного крана для механизации работ у горна печи, обеспечивающего обслуживание всех чугунных и шлаковых желобов и быструю замену сгоревших фурменных приборов.

Поскольку технология ведения процесса доменной плавки исключала возможность размещения колонн внутри здания, ограничивая возможность их расположения только по его периметру, здание выполнено в виде комбинированного пространственного каркаса, состоящего из 20 Г-образных рам, расположенных через 18° по окружности. Вертикальные участки рам – колонны высотой около 22 м совместно с вертикальными связями образуют цилиндрический каркас кругового очертания, на который опирается шатер-купол такой же высоты, представляющий собой единую пространственную конструкцию, которая воспринимает весь комплекс действующих усилий.

Купол решен в виде усеченного конуса, в котором наклонные ригели расположены по образующей, наклоненной к горизонту под углом 40° . В его состав входят два жестких горизонтальных кольца, одно из которых расположено на уровне верха вертикальных колонн, а второе «плавающее» находится на уровне верха наклонных ригелей и совпадает с отметкой колошниковой площадки, являясь для нее несущей конструкцией.

Нижнее кольцо воспринимает растяжение и изгиб в плоскости кривизны, вызванные действием распорных усилий купола. Верхнее «плавающее» кольцо в виде сварной балки коробчатого сечения с внутренними диафрагмами, обеспечивающими неизменяемость ее поперечного контура, воспринимает нагрузку от наклонных колонн-ригелей, одновременно передавая через них на купол нагрузку от выше расположенных конструкций. Общий вид смонтированного верхнего кольца показан на рис. 11.6.

Жесткость и неизменяемость пространственной конструкции покрытия обеспечивают системы вертикальных связей, переходящих в плоскость кровли и фонаря.

Радиус расположения и шаг рам определяются технологическими требованиями, исходя из возможности применения для заполнения стен стандартных существующих ограждающих конструкций.

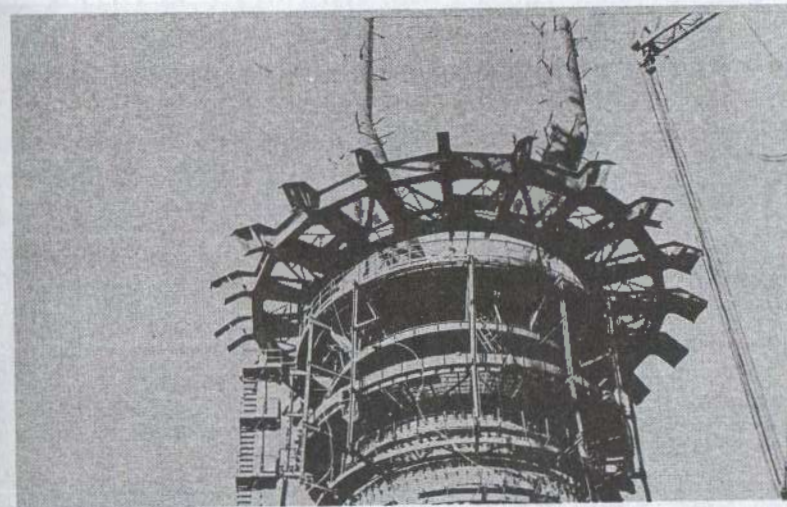


Рис. 11.6. Общий вид смонтированного верхнего «плавающего» кольца

Неуравновешенные силы, возникающие при несимметричной вертикальной и горизонтальной нагрузке на каркас шатра, передаются на систему связей здания, расположенных в плоскостях его стен, чем обеспечивается общая устойчивость здания.

Обслуживание печи осуществляется кольцевым краном, движущимся по кольцевой эстакаде, состоящей из шести П-образных рам, на которой расположен внутренний кольцевой путь крана. На эту же эстакаду опирается кольцевой воздухопровод горячего дутья. Внешний кольцевой путь крана расположен на основных колоннах здания.

Эстакада кроме вертикальных воспринимает и горизонтальные нагрузки от торможения крана и воздействия воздухопровода горячего дутья. Стойки эстакады также используются для опирания балок рабочей площадки.

Общий вид комплекса сооружений доменной печи объемом 5000 м^3 с круглым литейным двором показан на рис. 11.7

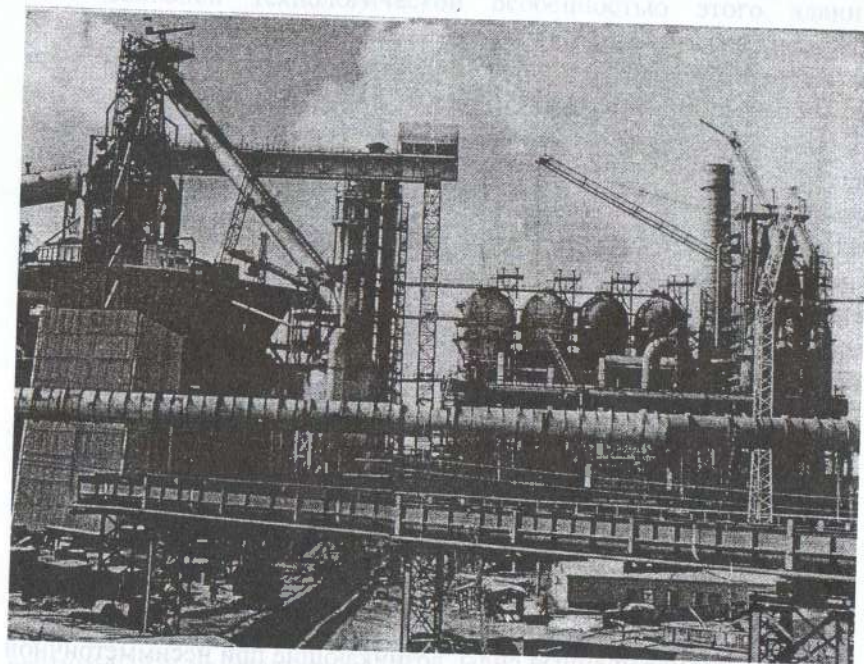


Рис. 11.7. Общий вид комплекса доменной печи большого объема с круглым литейным двором

ГЛАВА 12 ГАЗООЧИСТКА ДОМЕННОГО ГАЗА

§ 12.1. Назначение, состав сооружений

Как уже отмечалось, колошниковый газ после грубой очистки в пылеуловителе проходит последующие стадии очистки для возможности его дальнейшего использования.

Очистка газа происходит в технологических агрегатах, сблокированных в единую установку – газоочистку. Располагается она за пылеуловителем, из которого через специальный соединительный газопровод поступает газ. Агрегаты газоочистки объединены между собой системой газопроводов, включающей большое количество запорно-измерительного оборудования и технологических площадок для его эксплуатации и обслуживания [80].

Компоновка газоочистки зависит от принятой технологической схемы и количества ступеней очистки. Как правило, после грубой очистки в пылеуловителе газ проходит еще две стадии очистки – полутонкую и тонкую [71].

Полутонкая очистка осуществляется в так называемом скруббере, принцип действия которого основан на взаимодействии улавливаемых частиц пыли с каплями или пленкой орошающей воды. Скруббер является аппаратом мокрой очистки и снижает содержания пыли до $0,3 - 0,5 \text{ г/м}^3$ (рис.12.1).

Внутренний объем скруббера орошается водой, разбрызгиваемой специальными форсунками, расположенными в его верхней части. В скруббере постоянно движутся два встречных потока: доменный газ снизу вверх и распыленная форсунками вода сверху вниз. При этом в результате перемешивания газа с мелко разбрызгиваемой водой улавливаются частички колошниковой пыли и одновременно происходит эффективный теплообмен между газом и водой, приводящий к охлаждению газа.

Тонкая очистка происходит в электрофильтрах, тканевых фильтрах, в трубах-распылителях (трубы Вентури) и установках дроссельных групп. Тонкая очистка снижает содержание пыли в газе до $0,005 - 0,01 \text{ г/м}^3$.

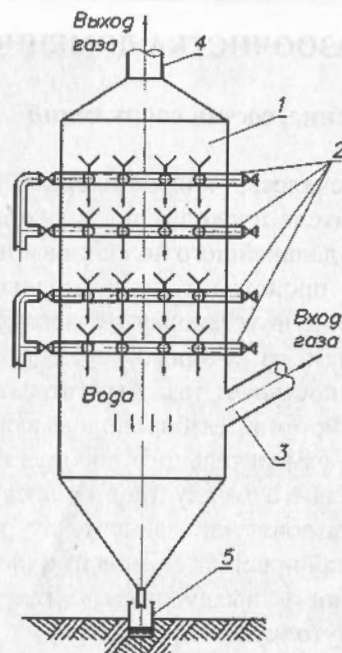


Рис. 12.1. Технологическая схема работы скруббера:

- 1 – корпус скруббера; 2 – кольцевые брызгальные форсунки;
3 – патрубок газопровода входа грязного газа; 4 – патрубок газопровода выхода очищенного газа; 5 – лоток для сбора шлама

Как правило, за скруббером устанавливают трубу-распылитель. Эти трубы являются турбулентными промывателями газа и представляют собой простые, универсальные и эффективные газоочистные аппараты. Их действие основано на резком увеличении скорости проходящего газа за счет изменения площади сечения его прохода. Поток газа, чтобы преодолеть установленное сопротивление, необходимо затратить дополнительную энергию, на что расходуется потенциальное давление газа. В месте пережима трубы скорость потока резко возрастает, что делает поток турбулентным и совместно с поступающей сюда орошающей водой обеспечивает необходимую степень очистки от механических примесей.

Трубы Вентури могут обеспечить необходимую очистку газа вплоть до тонкой – с конечным пылесодержанием не выше 5 мг/м^3 . Они не являются самостоятельным газоочистным устройством, а служат лишь для предварительного укрупнения пыли, обеспечивая весьма эффективное ее улавливание в последующих газоочистных аппаратах. Накопителями пыли для них служат, например, каплеуловители.

Практически всегда в состав установки газоочистки включается дроссельная группа, представляющая собой комплекс сгруппированных в одном агрегате параллельно расположенных клапанов. Основное ее назначение – создание повышенного давления газа под колошником доменной печи путем уменьшения проходного сечения дроссельной группы в результате закрытия части дросселей, т.е. в газовом тракте искусственно создается сопротивление проходу газа, что вызывает его подпор на колошнике доменной печи. Дроссельную группу обычно устанавливают горизонтально сразу за скруббером, поэтому в нее попадает увлажненная пыль с незначительными абразивными свойствами. При повышении давления газ очищается аналогично процессу очистки в трубах-распылителях.

В систему тонкой очистки газа иногда включаются электрофилтры, после которых газ должен иметь пылесодержание не выше $5 - 10 \text{ мг/м}^3$ и температуру до 35°C .

Очистка газа в электрофилтрах основана на свойстве пыли приобретать электрический заряд и под его действием выводиться из потока газа. Основная часть электрофилтра – пылеулавливающая система – состоит из осадительных и коронирующих электродов, расположенных внутри аппарата, на которых осаждаются заряженные частицы пыли.

Перед дроссельной группой расположен водоотделитель, а за ней каплеуловитель для сбора шламовой воды и отделения от газа капельной влаги. Эти аппараты основаны на том, что при изменении направления и скорости газового потока происходит отделение и сепарация капелек воды. Этот процесс механический, инерционный – так как капельки воды тяжелее газа, то они по инерции ударяются о сепарационные поверхности и стекают по ним.

Водоотделитель представляет собой цилиндрический аппарат колонного типа с двумя расположенными на куполе отверстиями для входа и выхода газа. Такой водоотделитель оказывает

незначительное сопротивление прохождению газа, что является его преимуществом.

Большое распространение получили каплеуловители-циклоны. Эти аппараты наиболее просты, однако обеспечивают достаточную степень осушки газа. Газ к каплеуловителю подводится тангенциально, в результате чего поднимающийся вверх поток приобретает вращательное движение. Развиваемая при этом центробежная сила отбрасывает взвешенные капельки воды на стенки, по которым она стекает в бункер-отстойник.

§ 12.2. Скруббер

Скруббер представляет собой цилиндрическую оболочку диаметром 6–8 м, высотой порядка 30–35 м, с коническим днищем и коническим либо сферическим куполом (рис. 12.2), способную воспринять внутреннее давление газа, поступающего из пылеуловителя, соответствующее его рабочему давлению под колошником доменной печи.

Сопряжение цилиндрической части скруббера с днищем и куполом выполняется с помощью конических поверхностей. Для снижения влияния краевого эффекта могут быть применены тороидальные или более многодельные в изготовлении сферические поверхности.

С учетом высокого коррозионного износа кожух скруббера выполняется из листов толщиной не менее 16 мм, с увеличением ее до 20–25 мм в зонах краевого эффекта – в районе сопряжения оболочек. Цилиндрическая и конические части кожуха собираются из отдельных листов, соединяемых встык, как правило, ручной сваркой, с расположением стыков вразбежку. Конус днища собирается и сваривается в опрокинутом положении.

Для входа газа в нижней части сосуда предусматривается наклонный, примерно, под углом 45° патрубок, к которому примыкает соединительный газопровод из пылеуловителя. Патрубок вводится внутрь скруббера и присоединяется к кожуху с установкой наружного и внутреннего усилительных колец (см. рис. 7.14). Выход очищенного газа осуществляется через газопровод, расположенный в куполе скруббера.

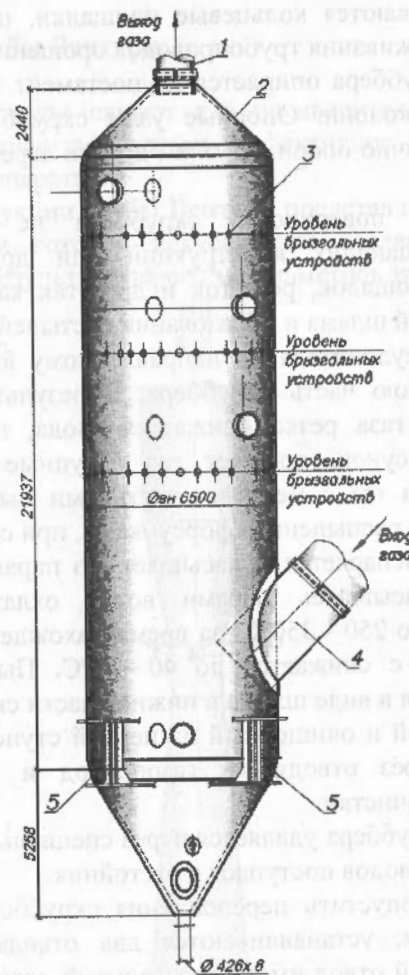


Рис. 12.2. Кожух скруббера:

- 1 – патрубок газопровода выхода очищенного газа; 2 – купол кожуха;
- 3 – кольцевые брызгальные форсунки; 4 – патрубок газопровода входа грязного газа; 5 – опоры скруббера

Снаружи в верхней цилиндрической части скруббера установлены несколько ярусов кольцевых водопроводных труб с введенными внутрь скруббера брызгальными форсунками. Вокруг

скруббера устраиваются кольцевые площадки, прикрепленные к кожуху для обслуживания трубопроводов орошения.

Корпус скруббера опирается на постамент из стальных или железобетонных колонн. Опорные узлы скруббера на колонны решаются аналогично опорным узлам других агрегатов, например, пылеуловителя.

Внутренняя поверхность скруббера не должна иметь излишних выступающих конструкций или других элементов (кронштейнов, площадок, решеток и др.), так как они являются очагами отложений шлама и образования настылей.

Газ от пылеуловителя по направленному вниз газопроводу подается в нижнюю часть скруббера. В результате увеличения объема скорость газа резко снижается. Вода, поступающая из брызгальных форсунок, орошает газ. Крупные частицы пыли оседают в воде, а газ с мелкими частицами пыли поднимается вверх. Вода, тонко распыленная форсунками, при соприкосновении с горячим газом испаряется и насыщает газ парами. Входящий в скруббер газ, насыщаясь парами воды, охлаждается и его температура (около $250 - 350^{\circ}\text{C}$) за время нахождения в скруббере в течение $10 - 20$ с снижается до $40 - 50^{\circ}\text{C}$. Пыль смачивается водой и осаждается в виде шлама в нижней части скруббера.

Охлажденный и очищенный на первой ступени газ выходит из скруббера через отводящий газопровод и направляется к агрегатам тонкой очистки.

Шлам из скруббера удаляется через специальный затвор и по системе шламопроводов поступает в отстойник.

Чтобы не допустить переполнения скруббера водой сверх расчетного уровня, устанавливаются два отвода — рабочий и резервный. Рабочий отвод имеет дроссельный клапан с поплавком на рабочем уровне воды, а резервный — на предельно высоком.

Учитывая значительную химическую агрессивность газа, иногда для корпуса скруббера применяют нержавеющую сталь. Однако, несмотря на длительную стойкость таких корпусов, их широкое распространение сдерживается высокой стоимостью нержавеющей стали и рядом конструктивных особенностей.

§ 12.3. Трубы Вентури

Трубы Вентури служат для предварительного укрупнения пыли, что обеспечивает весьма эффективное ее улавливание в последующих аппаратах.

По конструкции трубы Вентури представляют собой вставку в газопровод, в которой искусственно создано сопротивление прохождению газа в результате пережима диаметров трубы (рис. 12.3).

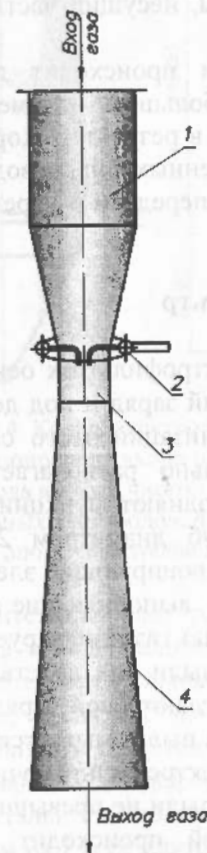


Рис. 12.3. Труба Вентури:

- 1 — конфузор трубы-распылителя; 2 — форсунки орошающей воды;
3 — горловина; 4 — диффузор

Очищаемый газ поступает в конфузор трубы-распылителя, где проходит через завесу (факел) орошающей воды, которая подается форсунками в пережим трубы (горловину) перпендикулярно направлению движения газа. Благодаря увеличению скорости газа из-за уменьшения сечения трубы в пережиме вода распыляется на мельчайшие капли, а давление в горловине снижается. Все это способствует лучшему смачиванию и улавливанию частиц пыли, размером в десятые доли микрометра. В диффузоре скорость газа уменьшается и происходит укрупнение (коагуляция) капель воды, несущих частицы пыли, что облегчает их отделение из газа.

В трубах Вентури происходит достаточно эффективное охлаждение газа. В небольшом объеме трубы, в котором газ находится доли секунды, в результате хорошего перемешивания и прямого контакта распыленных капель воды с потоком газа быстро проходят процессы теплопередачи и усреднения температуры газа и поступающей воды.

§ 12.4. Электрофильтр

Очистка газа в электрофильтрах основана на свойстве пыли приобретать электрический заряд и под действием его выводиться из потока газа. Для реализации этого свойства внутри корпуса электрофильтра вертикально располагается блок осадительных электродов, которые выполняют функции анодов и представляют собой ряд стальных труб диаметром 245 мм. Внутри них на изоляторах подвешены коронирующие электроды в виде стальных проволок диаметром 3 мм, выполняющие функции катодов. Благодаря высокому напряжению газ ионизируется, образуя электростатическое поле. Частицы пыли под действием полученного заряда направляются к аноду, отдают свой заряд и осаждаются на нем. Осажденная на электродах пыль смывается водой.

Газ, прошедший электрофильтр, очищается достаточно глубоко — содержание в нем пыли не превышает 10 мг/м^3 . Кроме того, одновременно с очисткой происходит и осушение газа, что исключает необходимость установки водоотделителей.

Наибольшее применение нашел типовой электрофильтр марки ДМ-316. Конструктивно кожух электрофильтра не отличается от

кожуха скруббера и также представляет собой цилиндрическую оболочку диаметром 6–8 м, высотой порядка 20 м, с коническим днищем и коническим либо сферическим куполом (рис. 12.4).

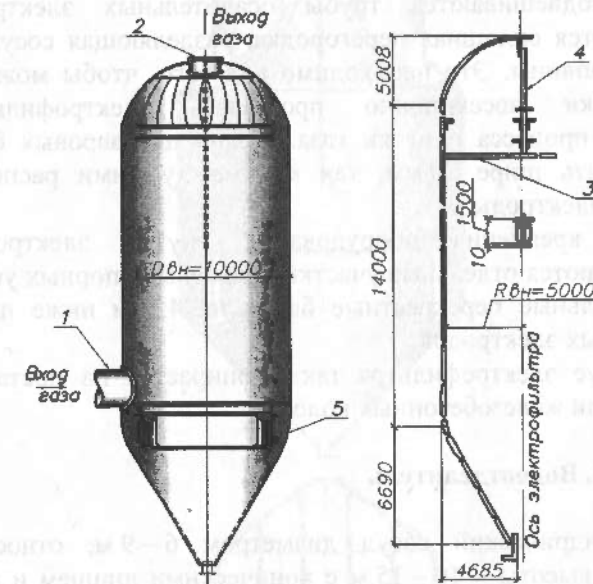


Рис. 12.4. Кожух электрофильтра:

- 1 — патрубок газопровода входа получистого газа;
2 — патрубок газопровода выхода чистого газа; 3 — площадка для подвески труб осадительных электродов; 4 — подвесная перегородка;
5 — опоры электрофильтра

Для подвески осадительных электродов внутри сосуда устраивается опорная площадка в виде балочной клетки и вертикальная металлическая перегородка. Осадительные электроды должны иметь вертикальное положение, в связи с чем предъявляются жесткие требования к горизонтальности опорных балок по всей их длине и соответствующие требования к их деформативности. Допускается отклонение от горизонтального положения балки под полной нагрузкой не более 0,5 мм на 1 м ее длины.

Получистый газ по газопроводу подводится в нижнюю часть аппарата, а очищенный газ по газопроводу, расположенному в его верхней части, уходит к потребителю.

Внутренняя площадка, расположенная в верхней части электрофилтра, состоит из сплошного настила в виде стального листа, укладываемого на балочную клетку из сварных двутавров, к которой подвешиваются трубы осадительных электродов и прикрепляется сплошная перегородка, разделяющая сосуд на две равные половины. Это необходимо для того, чтобы можно было периодически посекционно промывать электрофилтр, не прекращая процесса очистки газа. Полки двутавровых балок не должны быть шире 70 мм, так как между ними расположены трубчатые электроды.

Для крепления оборудования внутри электрофилтра устанавливаются отдельные участки кольцевых опорных уголков, а также отдельные перекрестные балки на 4,5 м ниже площадки осадительных электродов.

Корпус электрофилтра также опирается на постамент из стальных или железобетонных колонн.

§ 12.5. Водоотделитель

Цилиндрический сосуд диаметром 6–9 м, относительно небольшой высоты – 10–15 м с коническим дном и куполом (рис. 12.5). В купол входят два патрубка, к которым присоединяются газопроводы, по одному из которых поступает газ для осушения, а по второму – осушенный газ в соответствии с технологической схемой поступает либо к потребителю, либо на дальнейшее осушение.

Кожух водоотделителя выполняется из листов толщиной 16 мм, с увеличением до 20 мм в зонах сопряжения цилиндрической и конических оболочек. Узлы сопряжения и узлы опирания на колонны решаются аналогично узлам других аппаратов газоочистки.

Перегородка высотой 2,0–2,5 м, разделяющая верхнюю часть внутреннего объема сосуда, выполняется из листа толщиной 8 мм, укрепленного ребрами из уголков 90×8.

Бывают водоотделители, в которых газ поступает по горизонтальному газопроводу в нижнюю часть цилиндрического сосуда, а осушенный газ выдается через купол.

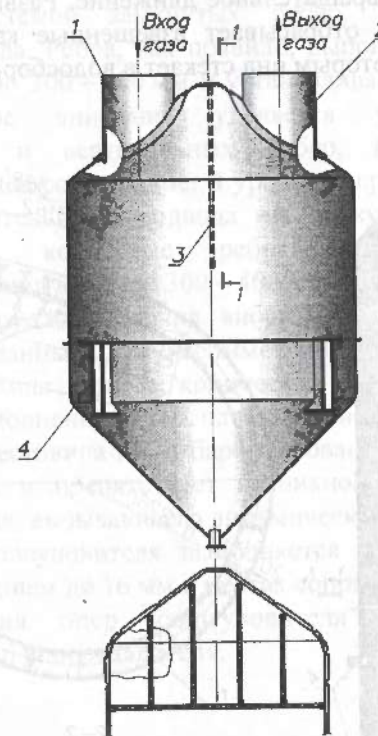


Рис. 12.5. Водоотделитель:

1, 2 – патрубки газопровода входа и выхода газа соответственно;
3 – перегородка; 4 – опоры водоотделителя

§ 12.6. Каплеуловитель-циклон

Наибольшее распространение получил центробежный циклон, который обеспечивает достаточно высокую степень осушения газа.

Каплеуловитель-циклон имеет цилиндрическую конструктивную форму диаметром порядка 6 м и высотой до 30 м. Основным отличием этой конструктивной формы является подача газа через газоход прямоугольного сечения, входящий в каплеуловитель тангенциально, т.е. по касательной к цилиндрической поверхности (рис. 12.6). В результате чего поднимающийся вверх

поток приобретает вращательное движение. Развиваемая при этом центробежная сила отбрасывает взвешенные капельки воды на стенки сосуда, по которым она стекает в водосборник.

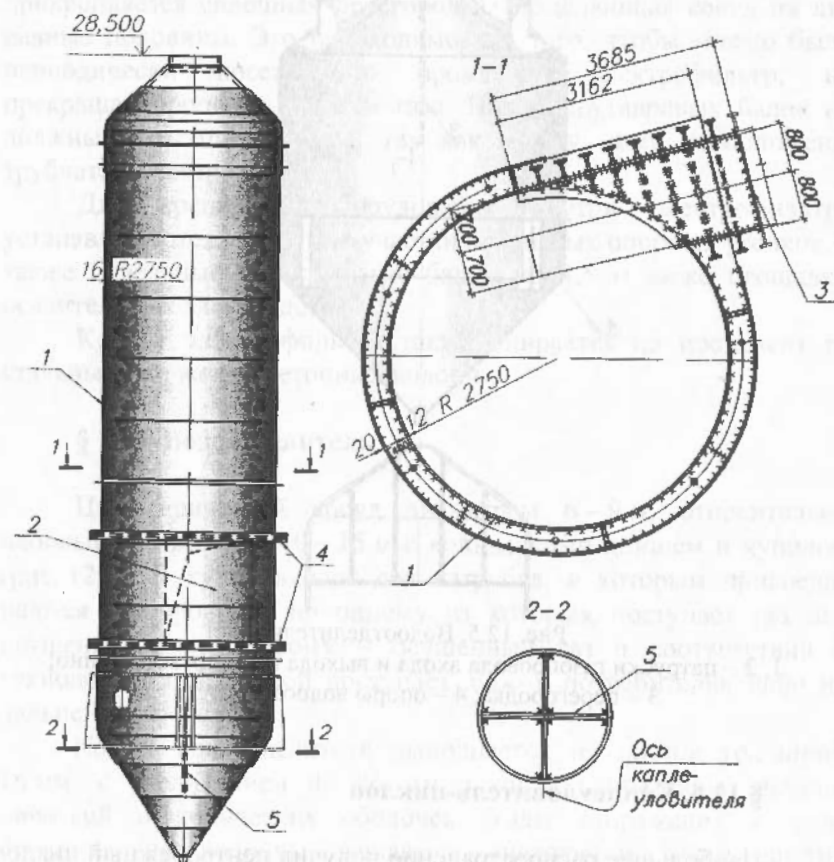


Рис. 12.6. Каплеуловитель-циклон:

1 – кожух циклона; 2 – вход касательного подвода; 3 – касательный подвод; 4 – кольцевые ребра; 5 – крестовина

Касательный подвод выполняется размерами ориентировочно 2400×1600 мм. В связи с возможностью возникновения внешних ситуаций и повышения давления газа до уровня

колошникового подвода рассчитывается на это давление и усиливается системой замкнутых ребер, установленных по периметру подвода. Ребра, как правило, выполняются из сварных тавров высотой до 300 – 400 мм и устанавливаются с шагом 400 – 500 мм. Особое внимание уделяется узлам соединения горизонтальных и вертикальных ребер, где должно быть обеспечено жесткое сопряжение. В уровнях верха и низа отверстия для входа касательного подвода на кожухе каплеуловителя устанавливаются кольцевые ребра жесткости таврового поперечного сечения высотой 300 – 400 мм.

С целью предотвращения вибрации и «раскачки» каплеуловителя, связанных с несимметричным, тангенциальным направлением входа газа, в коническом днище устанавливают крестовину, выполненную из плоских листов высотой 1500 – 2000 мм. Эта крестовина гасит барботирование (неорганизованное движение воды) и препятствует возникновению стационарного волнообразования, вызывающего динамические колебания.

Кожух каплеуловителя выполняется из листов толщиной 12 мм, с увеличением до 16 мм в местах сопряжения оболочек.

Конструкция опор каплеуловителя не отличается от конструкции опор водоотделителя.

ГЛАВА 13 СВЕЧА ДЛЯ ДОЖИГАНИЯ ИЗБЫТКОВ ДОМЕННОГО ГАЗА

§ 13.1. Назначение

Неравномерность потребления газа объясняется переменной нагрузкой агрегатов, их техническим состоянием, совершенствованием технологии, культурой эксплуатации и другими факторами. Как правило, расход газа в зимний период больше, чем в летний. Это объясняется увеличением теплопотерь и вводом дополнительных потребителей газа (отопительных котельных и др.).

Резкое изменение расхода газа может быть также связано с остановкой отдельных потребителей на ремонт, изменением объемов поступления газа на завод, которые могут колебаться в довольно широких пределах. Несбалансированное поступление и расход газа вызывает колебания его давления в сети газопроводов, приводящие, с одной стороны, к недопустимым возрастаниям давления, а с другой – также к недопустимым падениям давления при его недостатке. Все колебания для обеспечения нормального режима газоснабжения завода должны поглощаться и регулироваться так называемыми буферными потребителями.

Использование для этих целей газгольдеров, накапливающих избыток газа, ввиду незначительных его объемов и по ряду других причин пока не получило широкого применения из-за низкой эффективности. Для стабилизации верхнего допустимого предела давления доменного газа в сети завода в настоящее время предусматриваются автоматические сбросные свечи, в которых сжигают образовавшийся неформализованный избыток газа.

§ 13.2. Конструктивные формы свечей

Основным технологическим элементом свечи является система горелок, в которых происходит сжигание излишков доменного газа. Горелки устанавливаются на экологически безопасной высоте, как правило, 50–70 м, на специальных опорных конструкциях. Чаще всего они представляют собой конструкции башенного типа различных конструктивных форм.

Известна конструкция, в которой горелки и газопровод, подающий к ним доменный газ, поддерживаются решетчатой

опорной башней с квадратным или треугольным основанием (рис.13.1).

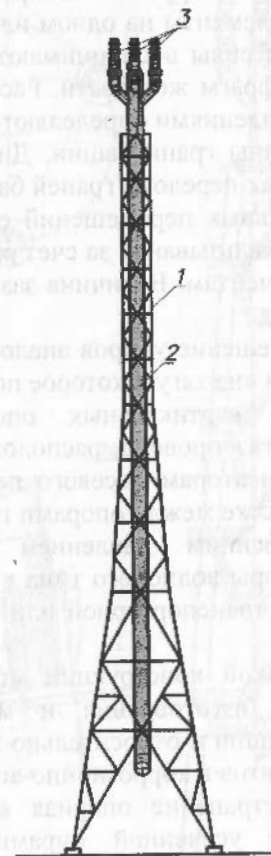


Рис. 13.1. Общий вид свечи в опорной башне:

1 – опорная башня; 2 – подающий газопровод; 3 – система горелок

Конструктивно она решается традиционно по типу опорных башен для газоотводящих стволов. К одной из конструктивных задач проектирования газоотводящих стволов в опорных башнях, как известно, относят решение узлов их опирания на несущие конструкции башни. Как правило, эти узлы выполняются раздельно для вертикальных и горизонтальных нагрузок, с учетом обеспечения возможных перемещений стволов в вертикальном направлении и деформаций поперечного сечения ствола.

Наибольшее распространение получило решение, согласно которому вертикальные нагрузки газопровода передаются на специальные опорные элементы на одном или нескольких уровнях башни. Горизонтальные силы воспринимаются упорами, расположенными в уровне диафрагм жесткости. Расстояния между этими горизонтальными закреплениями определяются расчетом, обычно в пределах 1,5–2,5 ширины грани башни. Диафрагмы обязательно устанавливаются в местах перелома граней башни.

Свобода вертикальных перемещений ствола обеспечивается возможностью его проскальзывания за счет расположения упоров с зазором к несущим элементам. Величина зазоров, как правило, не превышает 20 мм.

Конструктивное решение упоров аналогично используемому в трубах для взятия печи «на тягу», которое показано на рис. 6.4.

При нескольких вертикальных опорах температурные перемещения участков газопровода, расположенных между ними, воспринимаются компенсаторами осевого перемещения, установленными на каждом участке между опорами газопровода. В связи с незначительным внутренним давлением газа здесь могут применяться компенсаторы волнового типа в виде плоских дисков либо гибких вставок из транспортной или специальной компенсаторной ленты.

К недостаткам такой конструкции можно отнести значительную трудоемкость изготовления и монтажа стержневых конструкций опорной башни и относительно невысокую стойкость узлов сопряжения элементов в коррозионно-агрессивных средах.

Получила распространение опорная конструкция свечи в виде башни в форме усеченной пирамиды с треугольным основанием и с поясами из труб (рис. 13.2). Подача газа к горелкам осуществляется отдельным газопроводом, расположенным в центре пирамиды.

Существуют подобные конструкции, в которых один из трубчатых поясов совмещает в себе несущие и технологические функции и используется в качестве подающего газопровода. Опорная пирамида решается в рамном исполнении без решетки по граням. Общая устойчивость обеспечивается стержневыми диафрагмами и балочными клетками площадок, расположенными внутри пирамиды.

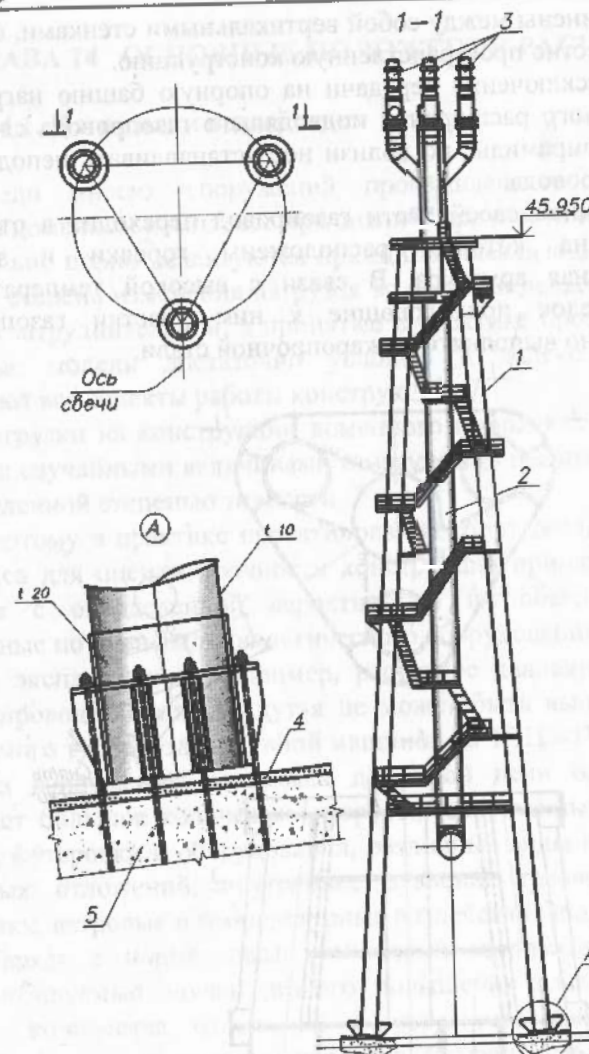


Рис. 13.2. Свеча в виде пирамиды:

1 – пояса из труб; 2 – подающий газопровод; 3 – система горелок
4 – подливка; 5 – фундамент

На ее верхушке (рис. 13.3) расположены две кольцевые диафрагмы из сплошного листа, окаймленные вертикальными ребрами и объединяющие пояса пирамиды и газопровод. Диаф-

рагмы соединены между собой вертикальными стенками, образующими совместно пространственную конструкцию.

Для исключения передачи на опорную башню нагрузок от температурного расширения подводящего газопровода следует за пределами пирамиды, но вблизи нее устанавливать неподвижную опору газопровода.

В верхней своей части газопровод переходит в отдельные патрубки, на которых расположены горелки и запорно-регулирующая арматура. В связи с высокой температурой в районе горелок примыкающие к ним участки газопроводов целесообразно выполнять из жаропрочной стали.

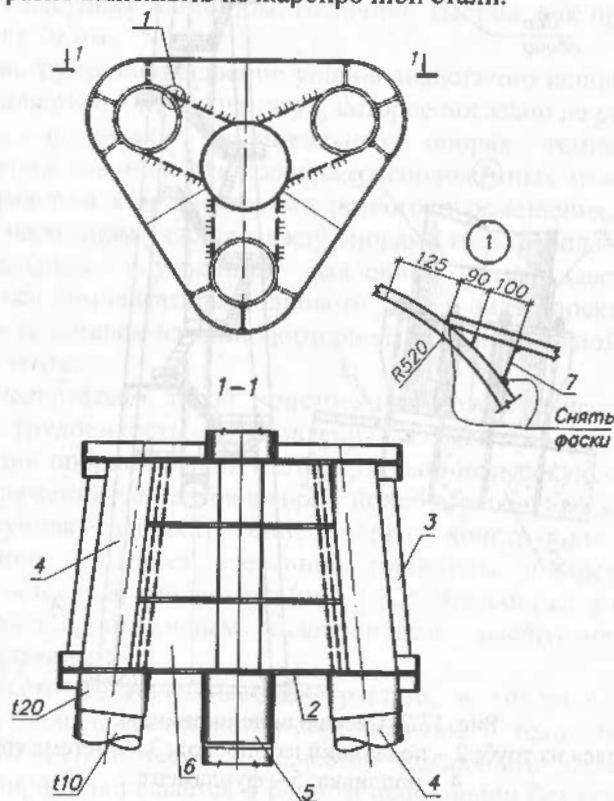


Рис. 13.3. Узел оголовка свечи:

- 1, 2 – верхняя и нижняя кольцевые диафрагмы соответственно;
3 – вертикальные ребра; 4 – пояса из труб; 5 – подающий газопровод;
6 – вертикальные стенки; 7 – элемент для приварки листа поз.6

ГЛАВА 14 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА

§ 14.1. Нагрузки и воздействия

Среди многих сооружений промышленного назначения именно в доменном комплексе при анализе прочности конструкций максимально полно реализуются принципы идеализации нагрузок. Высокая степень изменения нагрузок во времени делает их формализацию затруднительной, а принятые в практике проектирования расчетные модели достаточно условны и далеко не всегда учитывают все аспекты работы конструкций.

Нагрузки на конструкции доменного комплекса в основном являются случайными величинами и могут быть реализованы лишь с определенной степенью точности.

Поэтому в практике проектирования сооружений доменного комплекса для оценки прочности конструкции приняты значения нагрузок с определенной вероятностью их обеспечения или предельные по данным технологического оборудования и условиям ведения эксплуатации. Например, расчетное давление воздуха в воздухопроводе холодного дутья не может быть выше давления, образуемого турбовоздуходувной машиной на ТЭЦ – ПВС и т.п.

На сооружения комплекса доменной печи одновременно действует большое количество нагрузок: собственный вес конструкций, футеровки и оборудования, различные виды внутренних и наружных отложений, внутреннее давление газовой среды и футеровки, ветровые и температурные воздействия и др.

Наряду с нормальными условиями эксплуатации бывают непрогнозируемые случаи резкого повышения давления, температуры, количества отложений в результате изменений или нарушений технологического процесса. Особенность учета нагрузок состоит еще и в том, что практически все сооружения комплекса связаны между собой конструктивно и технологически и, имея неодинаковую жесткость, работают совместно при разных режимах. Поэтому при проверке несущей способности конкретного

сооружения достаточно трудно выделить определяющий вид нагрузки.

Так, в частности, анализ напряженно-деформированного состояния кожуха доменной печи затруднен неравномерным распределением нагрузок и воздействий от футеровки, холодильников и др. как в кольцевом, так и в меридиональном направлениях.

Все это вызывает различного характера локальные возмущения напряженного состояния, места которых прогнозировать не представляется возможным. В связи с этим расчетное напряженное состояние, в частности, кожуха доменной печи рассматривается только в идеализированном виде, в качестве критерия прочности которого принимается усредненный уровень напряжений.

В соответствии с действующими на территории Украины нормативами [21] все нагрузки и воздействия классифицируются следующим образом:

- по причине возникновения – основные и эпизодические;
- по изменчивости во времени – постоянные и переменные;
- по длительности непрерывного действия – длительные, кратковременные и эпизодические.

Нагрузки назначаются исходя из их характеристических значений, адекватных по величине полным значениям нормативных нагрузок по СНиП 2.01.07-85, и принимаются с учетом коэффициента надежности по ответственности γ_n по ГОСТ-27751-88, согласно которому все конструкции комплекса доменной печи, как обеспечивающие единый технологический процесс, следует отнести к I-му уровню ответственности с применением при расчете коэффициента надежности по ответственности $\gamma_n = 0,95$.

По характеру нагрузок и цели расчета расчетные значения нагрузок классифицируются следующим образом:

- предельное – значение нагрузки, аналогичное расчетному по СНиП 2.01.07-85, используемому для проверки предельных состояний первой группы;
- эксплуатационное – значение нагрузки аналогичное нормативному по СНиП 2.01.07-85, соответствующее нормальной эксплуатации конструкций, используемому для проверки предельных состояний второй группы;

– циклическое – используемое при расчете конструкций на выносливость;

– квазипостоянное – значение нагрузки с пониженным значением по СНиП 2.01.07-85, определяемое как уровень постоянного воздействия, эквивалентного случайному фактическому процессу нагружения.

При этом одни и те же нагрузки могут быть разной интенсивности и относиться к разным категориям. Так, например, внутреннее давление газовой среды при эксплуатации – это переменная длительная нагрузка, при испытании – кратковременная.

В таблице 14.1 приведена классификация нагрузок в соответствии с [21] на конструкции комплекса доменной печи, а в таблице 14.2 – возможные варианты сочетания нагрузок и соответствующие коэффициенты сочетаний.

Характеристические значения величин собственного веса трубопроводов приведены в таблице 14.3, веса материалов – в таблице 14.4, нагрузок на газопроводы от внешних отложений пыли – в таблице 14.5.

Характеристические значения величин нагрузок от внутренних отложений в трубопроводах следует принимать по данным технологических заданий и нормативных документов. При отсутствии этих материалов их можно принимать согласно таблице 14.6.

Значения центральных углов, соответствующих уровню заполнения отложениями трубопроводов при нормальном режиме эксплуатации и резком его нарушении, приведены в таблице 14.7.

Значения коэффициентов трения в скользящих опорных частях газо-воздухопроводов приведены в таблицах 14.8 и 14.9.

Характеристические значения величины нагрузки от шихты на колонны горна и другие конструкции, непосредственно воспринимающие эту нагрузку, приведены в таблице 14.10.

Таблица 14.1

Классификация нагрузок

Характер нагрузки		Вид нагрузки
1		2
Основные	Постоянные	Вес несущих и ограждающих конструкций, футеровки, насадки, постоянного оборудования (холодильные плиты, амбразуры и т.п.)
	Кратковременные	Вес стационарного оборудования и его воздействия (скипы, загрузочное устройство, сосуды, конвейеры и др.). Вес осадков, материалов и жидкостей в трубопроводах и сосудах. Вес осадков и отложений в трубопроводах. Вес отложений производственной пыли. Рабочее давление газовой среды. Гидростатическое давление жидкостей и сыпучих материалов. Температурные технологические воздействия при нормальной работе. Динамические нагрузки от оборудования. Нагрузка на колонны горна от шихты при нормальной работе. Подъем нормально загруженного скипа
	Длительные	Вес людей, ремонтных материалов на площадках с предельными или эксплуатационными расчетными значениями. Нагрузки от мостовых кранов и подвижных грузоподъемных средств и механизмов с предельными или эксплуатационными расчетными значениями. Нагрузки от стационарного оборудования, в т.ч. и динамические с предельными или эксплуатационными расчетными значениями, при его перегрузках, связанных с технологическим процессом, монтажом, ремонтами и пр. Испытательные нагрузки. Температурные климатические воздействия с предельными или эксплуатационными расчетными значениями. Нагрузка на колонны горна от шихты при ее запуске. Подъем перегруженного скипа. Температурные климатические воздействия. Ветровые, гололедные и снеговые нагрузки с предельными или эксплуатационными расчетными значениями

Окончание таблицы 14.1

1	2
Эпизодические	Нерегулярно возникающие нагрузки, связанные с нарушениями технологического процесса и поломкой оборудования, в т.ч. аварийного характера: застревание скипов и обрыв канатов, осадка шихты, аварийное динамическое воздействие конусов, переполнение пылью пылеуловителя при несвоевременной его выгрузке, переполнение трубопроводов конденсатом, водой до аварийного уровня, с учетом барботажа, из-за засорения водоотводчиков и сосудов газоочистки, температурные воздействия при разрушении футеровки или выходе из строя системы охлаждения; нагрузка на колонны горна от шихты при ее обрыве после зависания, застревание скипа при подъеме, обрыв каната перегруженного скипа. Вес осадков и отложений в трубопроводах и агрегатах при резком нарушении режима эксплуатации. Сейсмические воздействия

Таблица 14.2

Сочетания нагрузок

Типы нагрузок	Сочетания		
	Основное		Аварийное
	Коэффициенты сочетаний, ϕ , при вариантах комбинаций		
	I	II	I
Постоянные	1	1	0,9
Переменная длительная	0,95	0,95	0,95
Две переменные кратковременные	0,9		0,8
Три и более переменные кратковременные			
– наиболее влияющая		1	
– вторая		0,8	
– остальные		0,6	
Эпизодическая			1

Таблица 14.3

Характеристические значения
собственного веса трубопровода, кг/м

D, мм	Толщина стенки трубопровода t, мм									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
630	61,7	77,1	92,4	107,5	122,7	137,8	152,9	167,9	182,9	
720	70,1	88,2	105,6	123,1	140,5	157,8	175,1	192,3	209,5	
820	80,5	100,5	120,4	140,3	160,2	180,0	199,7	219,4	239,1	
920	90,4	112,8	135,2	157,6	179,9	202,2	224,2	246,6	268,7	
1020	100,2	125,1	150,0	174,9	199,6	224,4	249,1	273,7	298,3	
1120	110,1	137,5	164,8	192,1	219,4	246,6	273,7	300,8	327,9	
1220	119,9	149,8	179,6	209,4	239,1	268,8	298,4	328,0	357,5	
1320	129,8	162,1	194,4	226,7	258,8	291,0	328,0	355,1	387,1	
1420	139,7	174,5	209,2	243,9	278,6	313,2	347,7	382,2	416,7	
1520	149,5	186,8	224,0	261,2	298,3	335,3	372,4	409,3	446,2	
1620	159,4	199,1	238,8	278,4	318,0	357,5	397,0	436,5	475,8	
1720	169,3	211,5	253,6	295,7	337,7	379,8	421,7	463,6	505,4	
1820	179,1	223,8	268,1	313,0	357,5	401,9	446,3	490,7	535,0	
1920	189,0	235,1	283,0	330,2	377,2	424,1	471,0	517,8	564,6	
2020	198,9	248,4	298,0	347,5	396,9	446,3	495,7	547,0	594,2	
2120	208,7	260,8	312,8	364,7	416,7	468,5	520,3	572,1	623,8	
2220	218,6	273,1	327,6	382,0	436,4	490,7	545,0	599,2	653,4	
2320	228,4	285,4	342,4	399,3	456,1	512,9	569,6	626,3	683,0	
2420	238,3	297,8	357,2	416,5	475,8	535,1	594,3	653,5	712,6	
2520	248,2	310,1	372,0	433,8	495,6	557,3	619,0	680,6	742,2	
2620	258,0	322,4	386,8	451,1	515,3	579,5	643,6	707,7	771,8	
2720	267,9	334,8	401,6	468,3	535,0	601,7	668,3	734,8	801,4	
2820	277,8	347,1	416,4	485,6	554,8	623,9	692,9	762,0	830,9	
2920	287,6	359,4	431,2	502,8	574,5	646,1	717,6	789,1	860,5	
3020	297,5	371,7	446,0	520,1	594,2	668,3	742,3	816,2	890,1	
3120	307,4	384,1	460,7	537,4	613,9	690,5	766,9	843,3	919,7	
3220	317,2	396,4	475,4	554,6	633,7	712,6	791,6	870,5	949,3	
3320	327,1	408,7	490,3	571,9	653,4	734,8	816,2	897,6	978,9	
3420	337,0	421,1	505,1	589,2	673,1	757,0	840,9	924,7	1008,5	
3520	346,8	433,4	519,9	606,4	692,8	779,2	865,6	951,9	1038,1	
3620	356,7	445,8	534,7	623,7	712,6	801,4	890,2	979,0	1067,7	

Таблица 14.4

Характеристические значения собственного веса материалов футеровки

Материал	Вес единицы объема, кг/м³
Асбестовый картон	800 – 1200
Асбест распушенный	340
Асбестовермикулит	300
Бетон огнеупорный	1600 – 1900
Динас	1950
Динасовый легковес	1200
Кирпич огнеупорный в кладке	
шамотный класса А	2100
шамотный класса Б	1900
муллитовый МКО-72	2500
муллитовый НГО-50, НГО-62	2400
трепельный	600 – 700
магнезитовый	2500 – 2900
доломитовый	2600 – 2700
Каолиновый легковес	1300
Каолин	2300
Керамзит	500 – 900
Керамзитобетон	800 – 400
Каолиновые маты	150 – 300
Кокс	500
Коксовая мелочь	700
Руда железная сырая	2600 – 2700
Руда железная агломерат	1600

Таблица 14.5

Характеристические значения нагрузки от отложений пыли
на поверхности газопроводов

D трубы, мм	Нагрузка, Н/м	D трубы, мм	Нагрузка, Н/м
720	320	1820	810
820	360	2020	900
920	410	2220	990
1020	450	2420	1080
1120	500	2620	1170
1220	540	2820	1260
1320	590	3020	1350
1420	630	3220	1440
1520	680	3520	1580
1620	720		

Таблица 14.6

Характеристические значения нагрузки, Н/м, от веса отложений внутри газопровода на стадии нормальной эксплуатации

Диаметр газопровода, мм	Состояние газа					
	влажный очищенный		сухой очищенный	грязный доменный		
	Горизонтальные газопроводы	Местные пониженные участки	Горизонтальные газопроводы	Горизонтальные газопроводы воды (под углом 30°)	Наклонные газопроводы (под углом более 40°)	Газопроводы неблагоприятной конфигурации
1	2	3	4	5	6	7
620	750	800	150			
720	900	1000	200			
820	1050	1250	220			
920	1200	1500	250			
1020	1350	1750	270			
1120	1500	2000	300			
1220	1600	2200	350	2200	700	6000
1320	1770	2470	380	2400	870	7250
1420	1940	2740	420	3500	1040	8600
1520	2100	3000	450	4000	1200	10 000
1620	2260	3260	480	5000	1500	12 500
1720	2420	3520	510	6000	1800	15 000
1820	2580	3780	540	7000	2100	17 500
2020	2900	4300	600	8000	2400	20 000
2220	3220	4960	660	10 500	3300	26 000
2420	3540	5600	720	13 000	4200	33 000
2620	3860	6420	780	16 000	5000	40 000
2820	4180	7460	840	19 000	5800	1620
3220	4500	8500	900	22 500	6500	55 000

Окончание таблицы 14.6

1	2	3	4	5	6	7
3520	5400	12 000	1100	27 000	8000	67 000

Примечания: 1. Для газопроводов влажного и сухого очищенного газа, находящихся под углом 10° к горизонту, нагрузки принимают в размере 50% от соответствующих значений горизонтальных газопроводов, при углах наклона 0...10° – по линейной интерполяции.

2. Для газопроводов грязного доменного газа при углах наклона 30...40° нагрузку принимают по линейной интерполяции. Для газопроводов получистого доменного газа нагрузки принимают в размере 50 % соответствующих значений для грязного доменного газа.

3. Нагрузка от веса отложений внутри газопроводов при резком нарушении режима эксплуатации принимается в 2,5 раза больше соответствующей нагрузки на стадии эксплуатации, но не более веса отложений, занимающих 70% внутреннего объема газопровода.

Таблица 14.7

Значения центральных углов, соответствующих расчетному уровню заполнения газопроводов отложениями

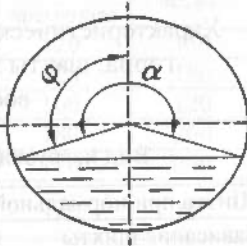
D, мм	При обычном технологическом процессе		При резком нарушении технологического процесса		Схема заполнения
	α , рад	α , град	α , рад	α , град	
630	1,959	112° 15'	1,306	74° 50'	
820	2,068	118° 29'	1,537	88° 04'	
1020	2,146	122° 57'	1,681	96° 19'	
1220	2,217	127° 01'	1,805	103° 25'	
1420	2,257	129° 19'	1,873	107° 19'	
1620	2,297	131° 36'	1,931	110° 38'	
1820	2,325	133° 13'	1,980	113° 27'	
2020	2,352	134° 46'	2,024	115° 58'	
2220	2,377	136° 12'	2,061	118° 05'	
2420	2,398	137° 24'	2,094	120° 00'	
2620	2,421	138° 43'	2,128	121° 56'	
2820	2,436	139° 34'	2,150	123° 11'	
3020	2,451	140° 26'	2,175	124° 37'	
3220	2,463	141° 07'	2,193	125° 39'	
3420	2,478	141° 59'	2,214	126° 51'	
3620	2,488	142° 33'	2,227	127° 36'	

Таблица 14.8

Коэффициенты трения μ в скользящих опорных частях

Тип опорной части	Значения μ
Скользящая: металл по металлу	0,3
Катковая одноярусная	
вдоль оси трубопровода	0,1
не вдоль оси трубопровода	0,3
Шариковая	0,1
Скользящая: полированный нержавеющий стальной лист по фторопласту (при нагрузках менее 100 кг/см ²)	0,1

Таблица 14.9

Коэффициенты трения μ в скользящих опорных частях с применением фторопласта при больших нагрузках

Среднее давление в опорных частях, МПа (кг/см ²)	Значения μ при скольжении полированного листа нержавеющей стали по фторопласту при температуре наиболее холодной пятидневки по СНиП 2.01.01-82			
	минус 10°C и выше		минус 50°C	
	$\mu_{\max}$	$\mu_{\min}$	$\mu_{\max}$	$\mu_{\min}$
9,81 (100)	0,085	0,030	0,120	0,045
19,6 (200)	0,050	0,015	0,075	0,030
29,4 (300)	0,035	0,010	0,060	0,020

Примечание. Для промежуточных значений температур и напряжений значения коэффициентов трения принимают по интерполяции.

Таблица 14.10

Характеристические значения нагрузки от шихты на колонны горна, шахты и другие конструкции, непосредственно воспринимающие эту нагрузку

Вид нагрузки	Тип нагрузки	Величина нагрузки
Шихта при нормальной работе	Переменная длительная	$0,5\gamma v_{\text{ш}}$
Зависание шихты	Переменная кратковременная	$\gamma v_{\text{ш}}$
Осадка (обрыв) шихты	Эпизодическая	$2\gamma v_{\text{ш}}$

γ – объемный вес шихты;
 $v_{\text{ш}}$ – объем шихты выше уровня приложения нагрузки;
 2 – коэффициент динамики.

Характеристическое значение величины изменения температур при технологическом или сезонном перепаде соответственно в теплое $\Delta_{\text{тв}}$ и холодное $\Delta_{\text{тс}}$ время года определяется по формулам

$$\Delta_{\text{тв}} = t_w - t_{0c};$$

$$\Delta_{\text{тс}} = t_c - t_{0w};$$

где t_w и t_c – характеристическое значение температуры конструкции при эксплуатации в теплое или холодное время года. При отсутствии технологической температуры для расчета принимается климатическая температура по [21];

t_{0w} и t_{0c} – начальные температуры конструкции в момент замыкания системы в теплое или холодное время года, принимаемые при неизвестном фактическом времени окончания монтажа соответственно $t_{0w} = 15$ и $t_{0c} = 0^\circ\text{C}$.

Характеристические значения температуры t_w для трубопроводов, транспортирующих газ повышенной температуры, принимают по технологическому заданию или при его отсутствии по таблице 14.11.

Характеристические значения величин полезных нагрузок на площадки и лестницы принимаются по таблице 14.12.

Нагрузки от отложений пыли на площадки учитываются при углах их наклона от 0 до 25° по таблице 14.13.

Таблица 14.11

Характеристические значения температуры металла оболочек агрегатов и трубопроводов

Конструкции	Температура, °C, для расчетных сочетаний нагрузок		
	Переменные		Эпизодическая
	длительная	кратковременная	
Кожух доменной печи	100	120	150
Кожух воздухонагревателя	100	120	150
Кожух пылеуловителя	80	100	120
Воздухопровод горячего дутья	140	180	200
Воздухопровод холодного дутья	140	170	200
Футерованный газопровод грязного газа до пылеуловителя	80	120	150
Футерованный газопровод грязного газа за пылеуловителем	50	75	100
То же нефутерованный	200	250	300
Газопровод чистого доменного газа	50	80	120
Газопровод коксового газа	75	90	140

Таблица 14.12

Характеристические значения полезных нагрузок на площадки и лестницы (вне мест непосредственного расположения оборудования)

Тип площадки	Нагрузка, кПа, для расчетных сочетаний нагрузок	
	Переменные	
	длительная	кратковременная
Рабочие площадки доменных печей и литейных дворов; площадка в уровне днища воздухонагревателя	10	30
Рабочие площадки зданий: колошникового подъемника, воздухонагревателей, пылеуловителей; рабочая площадка пылеуловителя, колошниковая площадка, площадка балансиров, площадки воздухонагревателей, на которых возможно складирование кирпича	4	10
Переходные площадки и лестницы	2	3
Площадки обслуживания оборудования	3	4

Таблица 14.13

Характеристические значения нагрузки от отложений пыли на площадки и внешние покрытия (вне мест непосредственного расположения оборудования)

Конструкции	Нагрузка, кПа
Колошниковая площадка	5
Другие площадки колошника	2
Все покрытия и прочие площадки	
– при расстоянии до 100 м от доменной печи	0,5
– при расстоянии от 101 – 500 м от доменной печи	0,25

При углах наклона к горизонту от 25° до 45° нагрузка определяется по интерполяции исходя из того, что при углах наклона к горизонту 45° и более нагрузка считается равной нулю. На лестницах и площадках с настилами из ребристого или просечно-вытяжного настила скопление пыли не учитывается.

Давление при испытании на прочность, учитываемое в качестве кратковременной нагрузки, принимается по таблице 14.14 в зависимости от сооружения и места его расположения в общей системе газовоздушного тракта.

Таблица 14.14

Величина внутреннего давления воздуха при испытании сосудов и трубопроводов на прочность

Конструкции	Расчетное внутреннее давление
Воздухонагреватели, воздухопроводы холодного и горячего дутья в пределах доменного цеха	$1,25 P_1$
Вертикальные и нисходящие газоотводы, пылеуловитель, соединительный газопровод грязного газа от пылеуловителя до скруббера, скруббер, газопровод получистого газа от скруббера до электрофильтра, электрофильтр, газопровод чистого газа от электрофильтра до дроссельной группы	$1,25 P_2$
Общезаводской коллектор чистого газа	$1,25 P_3$

P_1 – давление, создаваемое турбовоздуходувной машиной на ТЭЦ – ПВС;
 P_2 – давление под колошником доменной печи;
 P_3 – давление в заводской сети.

Несмотря на неординарность и высокий уровень нагрузок, характер их весьма специфичен. Так, наличие футеровки несколько смягчает эффект воздействия внутреннего давления. Это наглядно видно в процессе горения факелов, в результате проникания газа в образовавшиеся трещины. Выходящий газ проходит спокойно и не вызывает бурного разрушения. Внутреннее давление газа в разных зонах печи и в различные периоды ее кампании воздействует по-разному (табл. 14.15).

Нагрузка от распора шихты q^w , кПа, определяемая по эмпирическим формулам в зависимости от диаметра печи по футеровке D_w , приведена в таблице 14.16.

Нагрузку от гидростатического давления жидкого расплавленного чугуна можно определять по формуле

$$Q_{\text{чп}} = 7h,$$

где h – высота от рассматриваемого горизонта до оси фурменных приборов, м.

Таблица 14.15

Величина внутреннего давления газа

Зона печи	Состояние кладки	
	целая	разрушена
	Давление газа	
Лещадь	0	P_n
Горн, заплечики, распар	$0,5 P_n$	P_n
Верх шахты	P_n	P_n
Шахта	от 0 до $0,5 P_n$	P_n

Таблица 14.16

Величина давления шихты

Зона печи	Состояние кладки	
	целая	разрушена
	Давление шихты	
Заплечики	$5D$	$35D$
Распар	$5D$	$10D$

§ 14.2. Расчетные коэффициенты

При расчете конструкций сооружений комплекса доменной печи в соответствии с действующими нормативными документами [21] учитываются следующие расчетные коэффициенты.

14.2.1. Коэффициенты надежности по нагрузкам – приведены в таблице 14.17.

Таблица 14.17

Коэффициенты надежности по нагрузкам γ_f

Вид нагрузки	Значения
1	2
Собственный вес конструкций	
при усилиях от собственного веса меньше 50%	1,05
при усилиях от собственного веса равных или больше 50%	1,1
Вес термоизоляции	1,2
Внутреннее давление газовой среды	1,15
Внутреннее давление газовой среды при испытании	1,0

Окончание таблицы 14.17

1	2
Равномерно распределенные нагрузки на перекрытиях и покрытиях	
при характеристическом значении менее 2,0 кПа	1,3
при характеристическом значении 2,0 кПа и более	1,2
Вес стационарного оборудования	1,05
Вес футеровки, изоляции стационарного оборудования и трубопроводов	1,2
Вес внутренних отложений пыли, конденсата и т.п.	
при нормальном технологическом процессе	1,1
при нарушении технологического процесса	1,0
Работа оборудования	1,2
Гидростатическое давление	1,1
Воздействие ветра	
предельное значение нагрузки*	1,0
эксплуатационное значение нагрузки**	0,21
Гололедно - ветровые нагрузки*	1,0
Температурные климатические воздействия	
предельное значение температуры	1,1
эксплуатационное значение температуры	1,0
Снеговая нагрузка	
предельное значение нагрузки*	1,0
эксплуатационное значение нагрузки**	0,49
Термические воздействия	
при нормальном технологическом процессе	1,1
при нарушенном технологическом процессе	1,0
Действия кранов и других грузоподъемных средств	1,1
Все виды воздействий и нагрузок, уменьшающих силовое воздействие при расчете фундаментов и анкерных болтов	0,9
* При среднем периоде повторяемости 50 лет, соответствующему сроку службы сооружения.	
** При допускаемой доле времени нарушения условий второго предельного состояния 2%, рекомендуемой для сооружений массового строительства.	

При иных значениях периода повторяемости и допускаемой доле времени нарушения условий второго предельного состояния, определяемых заданием, коэффициенты надежности принимаются по таблице 9.3 [21].

14.2.2. Коэффициенты условий работы γ_c – приведены в таблице 14.18.

Таблица 14.18

Коэффициенты условий работы γ_c

Элементы конструкций	Значения γ_c
Кожухи доменных печей, пылеуловителей, трубопроводы	
а) при расчете на прочность в зонах краевого эффекта и локальных нагрузок	
с учетом концентрации упругих местных напряжений	1,25
без учета концентрации упругих местных напряжений	0,85
Кожухи воздухонагревателей	
с учетом концентрации упругих местных напряжений	1,0
без учета концентрации упругих местных напряжений	0,75
Прочие конструкции	
б) при расчете на устойчивость	0,65
Сжатые элементы ферм наклонного моста	0,9
Элементы и сооружения при расчете на особые нагрузки	1,0
Плоские анкеры кожухов воздухонагревателей	0,9

При поверочных расчетах кожухов существующих воздухонагревателей, оценки их технического состояния и определении условий дальнейшей эксплуатации следует учитывать также фактическое состояние металлоконструкций, устанавливаемое по результатам обследования. В зависимости от обнаруженных дефектов, их вида, места расположения и количества принимаются коэффициенты условий работы [24], значения которых приведены в таблице 14.19.

В связи с тем, что кожухи агрегатов находятся в условиях двухосного напряженного состояния величину расчетного сопротивления стали вне зон краевого эффекта следует принимать как

$$R_m = K_m \cdot R,$$

где $K_m = 1/\sqrt{1-\eta} + \eta^2$, при изменении значения η в пределах $1 \geq \eta = \sigma_1/\sigma_2 \geq -1$; σ_1 и σ_2 соответственно меньшее и большее (по абсолютному значению) главные напряжения, равные для плоско-напряженного состояния, при отсутствии изгибных напряжений, осевым (меридиональным и кольцевым) напряжениям.

Таблица 14.19

Коэффициенты условий работы для кожухов существующих воздухонагревателей γ_c

№ п/п	Описание обнаруженных дефектов	Значения γ_c
1.	Дефекты не обнаружены или имеются трещины только в районах штуцеров и по сварным швам местных вставок	0,85
2.	Трещины в районе штуцеров, в куполе, в цилиндрической части, примыкающей к куполу – высотой до 1 м, в сварных швах местных вставок и не более 5 трещин длиной до 500 мм на остальной поверхности кожуха	0,80
3.	Количество и протяженность трещин больше чем в п.2	0,7
4.	При устранении трещин пп.2 и 3 путем вырезки участков кожуха и установке вставок, а также реконструкции и ремонте футеровки в этих местах	0,85

Значения коэффициента η приведены на рис. 14.1

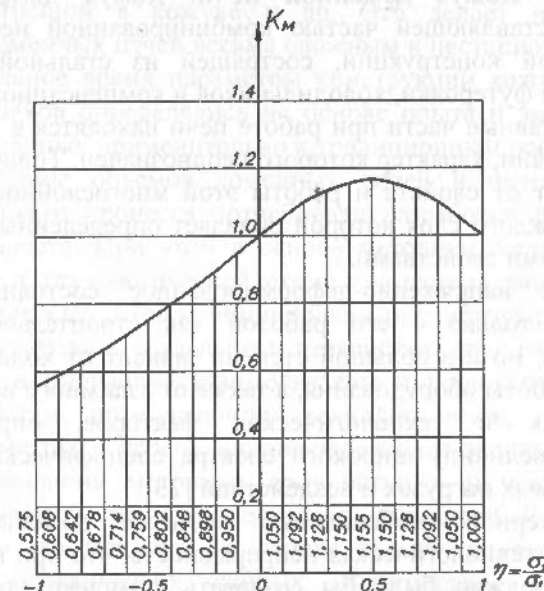


Рис. 14.1. Зависимость коэффициента η от соотношения осевых напряжений

При расчете конструкций проверяются величины их прогибов, предельные значения которых приведены в таблице 14.20. Прогибы определяются для наихудшего сочетания нагрузок при их характеристическом значении без учета коэффициентов динамичности и надежности по нагрузкам.

Таблица 14.20

Предельные относительные прогибы конструкций f/l

Элементы конструкций	Значения f/l
Балки монтажной тележки	1/500
Главные балки наклонного моста	1/800
Каркас лифта	1/400
Переходные площадки, лестницы, мостики	1/200
f – величина прогиба; l – длина пролета или удвоенная длина консоли.	

§ 14.3. Особенности расчета конструкций

14.3.1. Кожух доменной печи. Кожух доменной печи является составляющей частью комбинированной неоднородной многослойной конструкции, состоящей из стальной оболочки, огнеупорной футеровки, холодильников и компенсационных слоев. Все эти составные части при работе печи находятся в постоянном взаимодействии, характер которого неоднозначен. Толщина кожуха печи зависит от свойств и работы этой многослойной оболочки, материал каждого слоя которой обладает определенными физико-механическими свойствами.

Общее напряженно-деформированное состояние кожуха связано не только с его работой как строительной металлоконструкции, но и в большой степени зависит от хода доменного процесса, работы оборудования, а также от взаимного влияния всех строительных и технологических факторов, определяющих характер и величину широкого спектра специфических, трудно-формализуемых нагрузок и воздействий [23].

Характерной особенностью процесса доменной плавки является его технологическая непрерывность, что при нормальном ходе печи должно было бы создавать комплекс стационарных нагрузок, воспринимаемых кожухом в процессе эксплуатации.

Однако реальный доменный процесс, несмотря на его действительную технологическую непрерывность, носит весьма нестабильный характер, что, соответственно, приводит в процессе эксплуатации печи к нестационарному характеру основных нагрузок как по величине, так и по зоне их максимального воздействия.

Нестационарность технологического процесса в первую очередь связана с его основным противоречием, заключающимся в непрерывности доменной плавки, с одной стороны, и периодичности загрузки печи и выпуска жидких продуктов плавки – с другой. Это обстоятельство в значительной степени влияет на газодинамические и тепловые процессы внутри печи, изменяя нагрузки и воздействия по величине и району возникновения.

Технологические условия эксплуатации и конструктивные решения отдельных зон печи неодинаковы, переменны во времени и зависят от состояния конструкций – разгара кладки, работы системы охлаждения, возможного выхода из строя холодильников, появления трещин в кожухе и др. Это делает напряженное состояние доменных печей весьма сложным и нестационарным.

Длительное время параметры конструкций кожухов доменных печей цехов определялись на основе опыта и эмпирических формул, созданных применительно к традиционным решениям.

Увеличение объемов доменных печей и интенсификация технологического процесса потребовали разработки специальной методики расчета. При этом в основе методики была принята в статической и технологической схеме совместная работа отдельных составных элементов комбинированных конструкций, которые нельзя проектировать раздельно и независимо друг от друга. Эти элементы функционально взаимосвязаны и подчиняются общим закономерностям, определяющим технологические и конструктивные параметры, обеспечивающие надежность эксплуатации.

До появления методики прочностного расчета оболочки кожуха доменной печи существовал упрощенный подход к определению его толщины на основе только теплотехнического расчета и практических данных. Фактическое напряженно-деформированное состояние системы «кожух – холодильники – набойка – кладка» и усилия, вызываемые воздействием отдельных

ее элементов, не учитывались. В основу расчета был положен диаметр D кожуха в расчетном сечении и эмпирический коэффициент K , величина которого зависела от зоны печи.

По опыту эксплуатации и на основании общих заключений были сделаны попытки расчетных обоснований для кожуха доменной печи. При этом учитывались все комбинации нагрузок, включающие газовый удар, возникающий вследствие резкого смещения шихты в нижнюю часть шахты после ее подвешивания (так называемый «обрыв шихты»), а также неожиданные взрывы (хлопки) внутри печи, давление шихты и жидкого чугуна.

При указанных нагрузках кожух рассчитывался как оболочка с учетом ослабления отверстиями, достигающего в отдельных местах 40 – 50% площади поперечного сечения, а в фурменной зоне – до 65%.

Учитывая то, что ослабление вносит значительные изменения в поток напряжений, которые в оболочке растут пропорционально диаметру печи, а также основываясь на опыте эксплуатации построенных доменных печей, была предложена эмпирическая формула для определения толщины кожуха доменной печи:

$$t = K \cdot D,$$

где t – толщина стенки кожуха, мм; D – диаметр кожуха, м; K – эмпирический коэффициент пропорциональности между толщиной и диаметром кожуха.

Значение коэффициента K приведено в таблице 14.21.

Таблица 14.21

Зона кожуха	Коэффициент K
Металлоприемник	3,0
Фурменная зона, заплеики, распар	2,7
Шахта в районе мораторного кольца	3,2
Последний пояс и купол	3,2
Остальные зоны	2,0

Периодическое возникновение трещин в кожухах действующих доменных печей, приводящее в отдельных случаях к авариям, а также дальнейшая интенсификация доменного производства, связанная с увеличением давления дутья и переходом к новым конструктивным решениям, требовали более детального изучения действительной

работы многослойной конструкции кожуха доменной печи и разработки новых подходов к ее расчету.

В 1948 г. институтами «Гипромез» и ГПИ «Проектсталь-конструкция» (г. Москва, Россия) были разработаны «Специальные дополнительные технические условия на проектирование стальных конструкций доменных цехов», в которых дана классификация нагрузок, разработаны конструктивные и производственные требования и приведены некоторые положения по расчету.

Одним из основных принципов выбора оптимальных параметров системы «кожух – холодильники – набойка – кладка» является необходимость уравнивания внутренних и внешних усилий на футеровку с целью исключения появления в ней трещин. Это возможно лишь в случае равенства усилий, действующих на футеровку со стороны кожуха (обжатие кладки) и усилий от давления материалов изнутри печи, термического расширения кладки и других внутренних воздействий.

Большие усилия обжатия футеровки кожухом приводят к росту в ней напряжений, что ускоряет ее разгар. При незначительном обжатии футеровки в кладке могут возникнуть растягивающие напряжения, которые она не воспринимает, что также приводит к образованию трещин.

Решение этой проблемы осложняется неясностью поведения кладки под воздействием внутреннего давления газовой среды. Нельзя считать однозначным бытующее мнение о газопроницаемости кладки, свободном проникновении газа через нее к кожуху и передаче на него нагрузки давления. В этом случае появление любого повреждения кожуха неизбежно приводило бы к аварийной ситуации. В то же время сохранение стабильного положения кладки куполов воздушонагревателей говорит об уравнивании давления воздуха с обеих ее сторон, что не позволяет считать футеровку газонепроницаемой.

Было принято основное положение, заключающееся в том, что температурные воздействия от расширяющейся огнеупорной кладки должны погаситься компенсирующим упругим заполнением зазора между кожухом и футеровкой, поскольку в случае их соприкосновения напряжения в кожухе могут достигнуть предела текучести. Исходя из этого был определен необходимый минимальный зазор, основанный на условии совместной работы кожуха и футеровки:

$$\Delta_z = \frac{\Delta_{кл} - (\Delta_t - \Delta_q)}{10^5},$$

где Δ_z – величина необходимого минимального зазора между кожухом и футеровкой; $\Delta_{кл}$ – увеличение радиуса кирпичной кладки; Δ_t и Δ_q – увеличение радиуса кожуха от нагрева t и давления q .

Для расчета напряженно-деформированного состояния кожуха доменной печи в ЦНИИПСК (г. Москва, Россия) была разработана методика и программа «РАФК-ПК» [69], учитывающая зависимость физико-механических свойств материалов от температуры их эксплуатации, совместную работу кожуха, холодильников и футеровки, а также основные особенности конструктивных решений и эксплуатационных воздействий. По этой методике расчет оболочки сводится к расчету многослойных колец по ряду поперечных сечений без учета их взаимодействия. Методика основана на моделировании кожуха как стальной безмоментной тонкостенной оболочки.

Особенностью этой методики является установленная взаимосвязь нагрузок и воздействий с периодом работы доменной печи и проходящим в ней технологическим процессом. Это позволило на каждом этапе технологического процесса и состояния печи формализовать практически все виды нагрузок и воздействий и установить их влияние на напряженно-деформированное состояние кожуха печи.

Однако расчеты, выполняемые по указанной программе, имеют ряд существенных недостатков:

- совместная работа кожуха и кладки моделируется приближенно по отдельным поперечным сечениям без учета их взаимодействия;
- взаимосвязь различных сечений не учитывается;
- количественную оценку локального напряженно-деформированного состояния в местах краевого эффекта и местах образования настилей, нагрузок от вертикального роста футеровки, возникающих в местах крепления холодильников, выполнить не всегда удастся.

Кроме того, указанная методика не учитывает внешние нагрузки. И хотя доля этих нагрузок при определении общих напряжений кожуха доменной печи незначительна, в местах концентрации напряжений и возникновения двухосного сжатия, в

районе теплового пятна, они могут оказывать на него значительное влияние. При этом практика эксплуатации доменных печей и статистические данные аварий, приводящих как к временной остановке, так и к завершению кампании печи, свидетельствует о том, что именно концентраторы напряжений становятся основной причиной появления трещин.

В последние годы были предприняты попытки расчета кожухов доменных печей методом конечных элементов на основе пакетов программ «Искра», «BASIS+» и др. Моделирование расчетной схемы осуществлялось с использованием стержневых (например, для расчета системы «доменная печь – газопроводы грязного газа – пылеуловитель») и четырехугольных осесимметричных конечных элементов 1-го порядка (для расчета листовых конструкций оболочки кожуха). При этом взаимодействие кожуха и футеровки учитывалось заданием нагрузки, определяемой в соответствии с методикой «РАФК-ПК». Учет напряжений в местах их концентрации (в зоне фурменных отверстий, чугунных леток, в зоне крепления плитовых вертикальных холодильников и т.п.) производился с помощью коэффициентов концентрации напряжений после их вычисления по отдельному расчету.

Такой подход позволил более точно определить напряжения в кожухе в местах их концентрации, а также в зонах краевого эффекта. Однако, расчеты, выполняемые по указанной методике, производятся многоэтапно, с применением нескольких видов программ и расчетных схем и являются весьма трудоёмкими. Кроме того, определение внутренних усилий по программе «РАФК-ПК» сохраняет ряд присущих ей недостатков, перечисленных выше.

В связи с приближенным подходом к расчету и существенным влиянием на металлоконструкции кожуха доменной печи климатических воздействий, особенно резких перепадов отрицательных температур, которые могут привести к трещинообразованию, толщина оболочки кожуха уточняется на различных участках кожуха путем применения конструктивных коэффициентов и принимается:

- а) для лещади – наибольшей, полученной из расчета для сечений этой зоны (с учетом возможного разгара массива кладки по высоте, как правило, по верхнему сечению);

б) для цилиндрической и конической частей горна – наибольшей, полученной из расчета с увеличением толщины фурменной зоны на 20 %;

в) для заплечиков – полученной в результате расчета в нижнем сечении с увеличением толщины на 40 % для учета ослаблений в фурменной зоне горна и увеличения диаметра верхнего сечения;

г) для распара – полученной в результате расчета в нижнем сечении с увеличением пропорционально проценту ослаблений отверстиями для холодильников, но не менее прилегающего участка кожуха шахты;

д) для шахты – полученной в результате расчета в нижнем и верхнем сечениях, а также в сечении по верху плитовых холодильников, с увеличением толщины для учета ослаблений идентично кожуху распара.

Купол доменной печи и прилегающая к нему часть кожуха колошника рассчитываются только на внутреннее давление с учетом краевого эффекта. При отсутствии копра и передаче на купол через газопроводы грязного газа дополнительных нагрузок от оборудования колошниковой конструкции и веса монтажной балки производится дополнительный расчет на эти нагрузки, с учетом ослабления сечения отверстиями для газопроводов и проемом для лотка в случае установки загрузочного устройства фирмы Paul Wurth.

14.3.2. Кожух воздухонагревателя. По аналогии с расчетом кожуха доменной печи, до появления методики расчета, толщина кожуха цилиндрической части воздухонагревателя определялась как

$$t = K \cdot D,$$

где t – толщина стенки кожуха, мм; D – диаметр кожуха, м; $K = 1,6$ – эмпирический коэффициент пропорциональности между толщиной и диаметром кожуха.

С разработкой и развитием методики прочностного расчета кожух воздухонагревателя стал рассматриваться как многослойная цилиндрическая оболочка в составе системы «кожух – зазоры – футеровка» на воздействия внутреннего давления воздуха и температурного распора футеровки.

Расчет прочности воздухонагревателей основан на методиках, учитывающих зависимость упругих параметров материалов кожуха и футеровки от температуры, а также на том, что футеровка не препятствует передаче давления воздуха на кожух. Исследования показали, что передача давления через кладку воздухонагревателя на кожух в зависимости от скорости нарастания давления газа в воздухонагревателе и конструкции футеровки (ее плотности) может достигать величины предельного давления в воздухонагревателе [53].

Результаты расчетов дают несколько завышенные значения уровня напряжений по сравнению с экспериментальными данными, полученными на действующих воздухонагревателях. Есть основание предполагать, что это связано с учетом пластических деформаций футеровки, усадки материалов швов между кирпичами, других необратимых явлений в кладке и в компенсационном зазоре.

В соответствии с методикой расчета рассматриваются отдельные поперечные сечения оболочки, ограничивающие сверху и снизу участки с однородным составом и компоновкой футеровки. На протяжении участка между сечениями изменение напряженно-деформированного состояния принимается линейным.

В результате расчета определяются напряжения от внутреннего давления воздуха σ_p и σ_{up} и от температурного распора футеровки σ_{st} и σ_{stl} .

Наиболее сложным является определение компонентов напряженного состояния от распора футеровки, являющихся функцией температурного поля, и размеров сечения. Так, увеличению температуры на каждые 100°C соответствует увеличение σ_{st} на 2,5 %, а увеличение толщины кладки на каждые 100 мм вызывает увеличение σ_{st} на 5 %.

Основным параметром, характеризующим максимальную проектную температуру общего режима воздухонагревателя, служит температура воздуха под куполом $T_{куп}$, которая задается технологической организацией. Параметром, характеризующим минимальную проектную температуру общего режима воздухонагревателя, является температура отходящих в дымовой боров газов $T_{ог}$, которая также задается технологической организацией.

Температура между этими крайними значениями по высоте воздухонагревателя $T_b(y)$ изменяется по линейному закону (см. рис. 2.5) и определяется по формуле

$$T_b(y) = T_{\text{куп}} - (T_{\text{куп}} - T_{\text{от}}) y / H,$$

где y – ордината расчетного поперечного сечения; H – высота воздухонагревателя до верха цилиндрической части.

На границе слоев в каждом поперечном сечении воздухонагревателя температура определяется с учетом коэффициентов тепловосприятия (табл. 14.22), поправочных коэффициентов увеличения скорости ветра (табл. 14.23) и коэффициентов теплопроводности материалов футеровки (табл. 14.24).

Таблица 14.22

Коэффициенты тепловосприятия λ_b в зависимости от температуры внутри воздухонагревателя, $T_b, ^\circ\text{C}$

T_b	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
λ_b	23,2	34,8	46,4	63,8	81,2	104,4	139,2	174	208,8	232	255,2	278,9

Таблица 14.23

Поправочные коэффициенты увеличения скорости ветра

Высота над поверхностью земли, м	до 10	20	40	100*
Поправочный коэффициент K	1	1,15	1,3	1,5

* Для промежуточных высот K определяют по линейной интерполяции.

В соответствии с методикой расчета [69] по вычисленным компонентам напряженного состояния определяются суммарные главные напряжения в каждом отдельном поперечном сечении кожуха.

Расчет кожуха воздухонагревателя представляет собой итерационный процесс, так как каждый раз рассматривается как определенное приближение к окончательному решению. Это связано с тем, что несущие слои огнеупорной футеровки не способны воспринимать растягивающие напряжения. Поэтому после выполнения расчета в первом приближении определяются зоны растягивающих усилий в огнеупорных слоях и после их исключения проводятся повторные расчеты.

Таблица 14.24

Коэффициенты теплопроводности λ , материалов футеровки в зависимости от температуры

Материалы	Температура внутренней поверхности слоя, $^\circ\text{C}$	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(мК)
Шамот класса А и Б	–	1,16
Каолин ($\text{Al}_2\text{O}_3 - 42\%$)	500 – 1300	1,6 – 2,
Высокоглинозем ВГО-50	500 – 1300	0,91 – 1,6
Высокоглинозем МЛО-62, ВГО-62	500 – 1300	0,93 – 1,6
Высокообоженный малоразрыхляющийся динас	500 – 1300	1,33 – 2,32
Шамот-легковес	–	0,58
Граншлак с асбестом	–	0,232
Трепельная засыпка	–	0,17
Трепельный кирпич	–	0,46
Сталь	–	58
Мулито-корунд МКО-72, ВГО-72	600 – 1500	1,16 – 1,74
Каолиновый легковес КД-1,3	600 – 1300	0,6 – 0,67
Динасовый легковес ДЛ-1,2	600 – 1200	0,64 – 0,67
Каолиновая вата (маты, уплотненные на 50%)	100 – 1100	0,06 – 0,232
Асбестовермикулит	100 – 400	0,116 – 0,18
Торкрет-масса	–	0,48
Асбестовый картон	100 – 400	0,16 – 0,2
Свободно выгорающий зазор	–	104

Аналитические проработки вопросов прочности конструкций воздухонагревателей показывают, что могут быть осуществлены конструктивные решения футеровки и кожуха с обжатием всех слоев футеровки, обеспечивающие ее плотность как во время нагрева, так и во время дутья. В этих случаях, при правильном подборе величины и материалов компенсационных слоев, на кожух и на кладку будут передаваться сравнительно небольшие нагрузки. В то же время необходимо иметь в виду, что даже большая толщина кожуха не предохраняет воздухонагреватель от повреж-

дений в случае циклических местных перегревов кожуха горячим воздухом, проникающим через футеровку.

Расчет прочности воздухонагревателей основан на методиках, учитывающих зависимость упругих параметров материалов кожуха и футеровки от температуры. Результаты расчетов, как и при расчете доменных печей, дают также несколько завышенные значения уровня напряжений по сравнению с экспериментальными данными, полученными на действующих воздухонагревателях. Причины этого очевидно аналогичны.

Одной из важных задач обеспечения длительной прочности кожуха и футеровки воздухонагревателей является разогрев агрегата в оптимальном режиме, исключая появление чрезмерных напряжений в футеровке, вызывающих в ней необратимые физические процессы.

Экспериментальные наблюдения показали, что при разогреве воздухонагревателей наблюдаются два характерных периода. Первый характеризуется увеличением напряжений, причем наблюдается опережение меридиональных напряжений, создаваемых взаимодействием кожуха и футеровки и связанных с термическим ее ростом. По времени этот период заканчивается при температуре купола 1000–1200°C и постановке воздухонагревателя на поддув.

Во второй период при дальнейшем подъеме температуры купола до 1300°C и более и одновременном периодическом наполнении воздухонагревателя воздухом происходит незначительное увеличение напряжений в сечениях по всей высоте кожуха и последующая стабилизация с некоторым снижением напряжений в процессе эксплуатации [30, 48].

14.3.3. Наклонный мост

14.3.3.1. Нагрузки и воздействия на главные балки. В таблице 14.25 приведены нагрузки и воздействия на главные балки наклонного моста, классифицированные по характеру и длительности действия.

В таблице 14.26 приведены рекомендации по определению нагрузок от скипов, действующих на наклонный мост.

Таблица 14.25

Нагрузки и воздействия на главные балки наклонного моста

Тип нагрузки		Вид нагрузки
Постоянные		Собственный вес конструкций наклонного моста
Временные	Длительные	Вес колошниковой пыли. Работа порожнего скипа с налипшим материалом в одном из неблагоприятных положений. Работа нормально загруженного скипа в одном из неблагоприятных положений.
	Кратковременные	Полезная на площадках. Работа перегруженного скипа в одном из неблагоприятных положений. Работа грузоподъемного оборудования (консольно-поворотных кранов, основного и вспомогательных подъемов). Ветровое воздействие поперек моста. Ветровое воздействие вдоль моста. Снеговая нагрузка.
Эпизодические		Застывание скипа в одном из неблагоприятных положений Тяжение прикрепленных тросов монтажной балки Обрыв скипа

Таблица 14.26

Нагрузки от скипов

Тип нагрузки	Вид нагрузки	Определение нагрузки
1	2	3
Временная длительная	Подъем нормального загруженного скипа	$g + 0,7\gamma v = T + P_1 + P_2$
Временная кратковременная	Подъем перегруженного скипа	$g + \gamma v = T + P_1 + P_2$
Эпизодическая	Застывание скипа при подъеме. Обрыв перегруженного скипа	$g + (0...)\gamma \cdot v =$ $= T_n + P_1 + P_2 + H$
	Тяжение тросов монтажной балки, прикрепленных к мосту при монтаже загрузочного устройства	Усилие в лебедке

Окончание таблицы 14.26

1	2	3
Для всех сочетаний	Опускающийся порожний скип	$g = T + P_1 + P_2 + E$
g – собственный вес скипа; $0,7$ – коэффициент нормального заполнения скипа; v – полезный объем скипа, принимаемый равным $0,9$ его геометрического объема; γ – объемный вес шихты в скипе (обычно $\gamma = 2,5 \text{ т/м}^3$); T – усилие в скиповом тросе при подъеме скипа; T_n – усилие в скиповом тросе, развиваемое лебедкой при максимальной перегрузке ее электродвигателя, и задней оси скипа; H – сила сопротивления, приложенная к головке рельса; E – неуравновешенная составляющая, параллельная рельсу. Величины P_1, P_2, H, T, E и T_n принимаются как их геометрические составляющие.		

14.3.3.2. Расчет устойчивости открытого пояса главной балки. Оценку устойчивости внецентренно сжатого верхнего пояса главной балки наклонного моста по аналогии с открытыми транспортными мостами [36] следует выполнять по методике расчета устойчивости стержня на упругих опорах.

Расчетная длина пояса определяется как

$$l_p = \mu l,$$

где l – длина пояса, равная расчетному пролету балки; μ – коэффициент приведения расчетной длины, определяемый в зависимости от параметра отпорности связей ξ (см. таблицы 14.27 и 14.28)

$$\xi = l^4 / 16 \cdot d \cdot \delta \cdot EI,$$

где d – расстояние между поперечными ребрами балки (длина панели у фермы); δ – деформация полурамы от единичной силы; I – среднее по длине пролета значение момента инерции пояса относительно вертикальной оси.

Главная балка моста рассматривается как стержневая система, состоящая из верхнего пояса, вертикальных ребер и поперечных балок, а отпорность поперечных рам определяется по схеме на рис. 14.2.

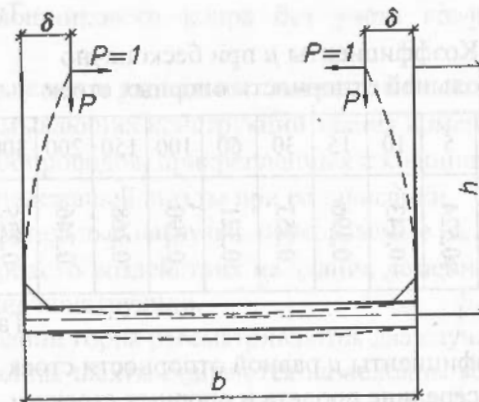


Рис. 14.2. Схема рамы наклонного моста для определения отпорности

При этом в состав сечения сжатого пояса балки включается участок стенки шириной $15t$, а в состав ребер жесткости – участки стенки шириной, равной $15t$ в каждую сторону от оси стенки (рис. 14.3).

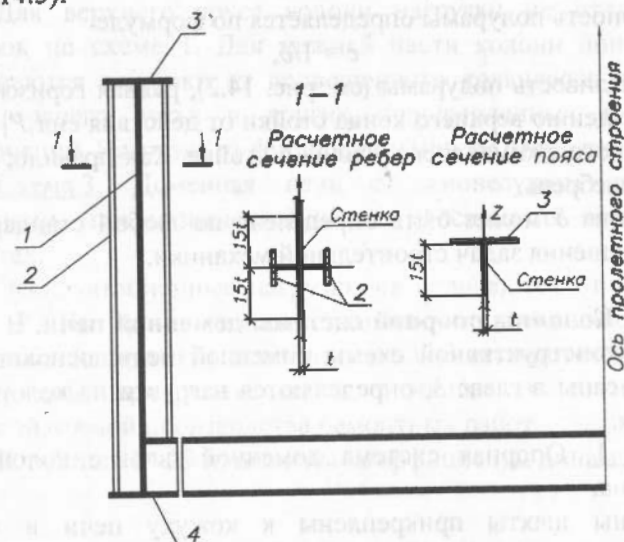


Рис. 14.3. Расчетная схема рамы наклонного моста:

1 – балка пролетного строения; 2 – вертикальное ребро;
 3 – верхний пояс балки; 4 – нижний пояс балки

Таблица 14.27

Коэффициенты μ при бесконечно
большой отпорности опорных стоек

ζ	0	1	3	5	10	15	30	60	100	150	200	300	500	1000
μ	0,696	0,675	0,595	0,524	0,443	0,396	0,353	0,321	0,290	0,268	0,246	0,225	0,204	0,174

Таблица 14.28

Коэффициенты μ равной отпорности стоек
в середине пролета и опорных стоек

ζ	0	1	3	5	10	15	20	50	100	150	200	300	500	1000
μ	8	2,22	1,28	0,99	0,70	0,57	0,54	0,43	0,34	0,28	0,26	0,24	0,21	0,18

Отпорность полурамы определяется по формуле

$$c = 1/\delta,$$

где δ – податливость полурамы (см. рис. 14.2), равная горизонтальному перемещению верхнего конца стойки от действия сил: $P_1 = 1$ и P – продольного сжимающего усилия в стойке. Как правило, силой P можно пренебречь.

Величина δ может быть определена по любой стандартной программе решения задач строительной механики.

14.3.4. Колонны опорной системы доменной печи. В зависимости от конструктивной схемы доменной печи, основные из которых описаны в главе 3, определяются нагрузки на колонны и их сочетания.

Схема 1. Опорная система доменной печи с колоннами шахты и горна.

Колонны шахты прикреплены к кожуху печи и через мораторное кольцо или непосредственно передают нагрузки на колонны горна.

Вертикальные нагрузки, передаваемые на колонны шахты:

– от колошникового копра без учета коэффициента динамичности;

– от кольцевых и радиальных площадок печи;

– от примыкающих конструкций здания доменной печи;

– от трубопроводов, прикрепленных к колоннам шахты;

– от вышележащей шихты при ее зависании.

Горизонтальные нагрузки, передаваемые на колонны шахты:

– от ветрового воздействия на здание доменной печи и другие примыкающие конструкции.

Для колонн горна рассматриваются два случая.

1. Колонны шахты опираются на колонны горна – 70% массы вышележащей футеровки через кожух передается на колонны горна.

2. Мораторное кольцо поднялось и отделилось от колонн горна – нагрузка от кожуха на колонны горна не передается.

В обоих случаях учитывается нагрузка от подвешенного кольцевого воздухопровода горячего дутья.

Схема 2. Доменная печь с самонесущим кожухом.

Для верхнего яруса колонн нагрузки не отличаются от нагрузок по схеме 1. Для нижней части колонн дополнительно учитываются нагрузки от подвешенного кольцевого воздухопровода горячего дутья и других, прикрепленных к колоннам, конструкций. Нагрузка от футеровки и шихты отсутствует.

Схема 3. Доменная печь с самонесущим кожухом и колоннами, предназначенными для восприятия нагрузок при ремонтах.

Эксплуатационные нагрузки не отличаются от нагрузок по схеме 2. На время ремонта уточняются оставшиеся эксплуатационные нагрузки и дополнительно учитываются нагрузки от конструкций, прикрепляемых к колоннам, в соответствии с принятой схемой производства ремонтных работ.

В таблице 14.29 приведены коэффициенты динамичности K_d .

Таблица 14.29

Коэффициенты динамичности K_d

Вид нагрузки	Характер нагрузки	Значение K_d	Конструкции, на которые действует нагрузка
1	2	3	4
Вес шихты, расположенной выше рассматриваемой конструкции при осадках	Аварийная	2	Колонны горна и кожух печи
Вес шихты в объеме скипа при загрузке в скип или выгрузке из скипа	Кратковременная	1,8	Пути скипа, опорные балки в скиповой яме и в зоне опрокидывания скипа, балки приемной воронки
Неуравновешенная часть веса контргруза конусных балансиров а) в момент закрывания конуса б) при ликвидации слабины конусных тросов	Кратковременная Аварийная	2 2	Подбалансирные балки, непосредственно воспринимающие нагрузку Рамы и связи колошниковой копра, подбалансирные балки, балки под конусные лебедки и другие конструкции, воспринимающие нагрузку
Усилие в тросе конусных шкивов (кроме случая ликвидации слабины) при принудительном опускании конуса	Кратковременная	1,1	Подшкивные балки
То же при свободном опускании конуса	Кратковременная	1,5	Подшкивные балки
Нагрузка от лебедки управления конусами (кроме случая ликвидации слабины)	Кратковременная	1,1	Опорные балки лебедки

Окончание таблицы 14.29

1	2	3	4
Нагрузка от скиповой лебедки	Кратковременная	1,1	Опорные балки лебедки
Нагрузка от газовых горелок	Кратковременная	1,1	Опорные балки горелок
Нагрузка от подвижного состава, в т.ч. от скипов, и электрических кранов, исключая тележку монтажной балки	Кратковременная	1,1	Балки, непосредственно воспринимающие нагрузку

14.3.5. Анкерные устройства кожухов воздухонагревателей.

Рабочие анкеры воздухонагревателя при разных расстояниях по окружности и плоском днище рассчитываются по формуле

$$N_{\text{раб}} = 2N_1\pi/K - 0,9(Q_1 + Q_2)/K \leq FR\gamma_{\text{са}},$$

где K – количество анкеров; Q_1 – суммарная нормативная масса цилиндрической и купольной частей кожуха воздухонагревателя, с учетом массы опирающихся на них конструкций, кг; Q_2 – суммарная нормативная масса периферийной футеровки и футеровки купола воздухонагревателя, кг; F – площадь поперечного сечения анкера, см²; $\gamma_{\text{са}}$ – коэффициент условий работы анкера; R – расчетное сопротивление материала анкера, кг/см².

Величина N_1 принимается наибольшей из вычисленных по формуле

$$N_1 = P_r/2 + M_b/\pi r^2 \text{ или } N_1 = P_n r/2 + M_b/2\pi r^2,$$

где P_r и P_n – соответственно расчетное внутреннее давление воздуха в воздухонагревателе при его эксплуатации и испытании на плотность; M_b – изгибающий момент от расчетной ветровой нагрузки у основания воздухонагревателя как защемленного в фундамент стержня; r – радиус воздухонагревателя.

Временные анкеры, служащие во время монтажа конструкций воздухонагревателя, рассчитываются по формуле

$$N_{\text{монт}} = 2M_b/Kr - 0,9Q_1/K \leq FR.$$

14.3.6. Трубопроводы. Расчет трубопроводов на прочность при изгибе производится на основании гипотезы о плоском законе распределения относительных удлинений в любом поперечном сечении по балочной схеме. Необходимым условием применения этой гипотезы является неизменяемость контура (формы) поперечного сечения трубопровода [40].

Поскольку практически все трубопроводы комплекса доменной печи работают на неосесимметричную нагрузку, обеспечение неизменяемости контура поперечного сечения трубопровода требует проведения специальных конструктивных мероприятий. Наиболее радикальным из них является установка кольцевых ребер жесткости – шпангоутов по длине трубопровода, что позволяет рассматривать его как балку кольцевого сечения и не учитывать в расчете пространственный эффект, связанный с деформацией контура.

Исследования показали, что при диаметре трубопровода до 2 м и действующих нагрузках неизменяемость контура поперечного сечения обеспечивается, и на трубопроводах таких диаметров не требуется установка шпангоутов вне мест приложения сосредоточенных внешних нагрузок.

Что касается трубопроводов диаметром 2 м и более, то здесь устанавливают кольцевые ребра – шпангоуты, обеспечивающие сохранение контура поперечного сечения трубы.

Известно [32], что постановка одного или двух шпангоутов в пролете обеспечивает неизменяемость контура поперечного сечения трубы и приближает работу оболочки к работе пустотелой балки кольцевого поперечного сечения.

В практике проектирования газо-воздухопроводов доменной печи в связи с отсутствием четкой формализации нагрузок расстояние между такими ребрами принимается, как правило, в пределах двух диаметров трубы, но не более 6 м.

Исходя из этих предпосылок, напряжения в любой точке поперечного сечения трубопровода определяются как в пустотелой балке кольцевого поперечного сечения по следующим формулам:

$$\sigma_x = M_z \cos \beta / \pi R^2 t + M_y \sin \beta / \pi R^2 t + N / 2 \pi R t;$$

$$\tau_x = Q_z \sin \beta / \pi R t - Q_y \cos \beta / \pi R t + M_{\varphi} / 2 \pi R^2 t,$$

где M_z и M_y – изгибающие моменты в двух взаимоперпендикулярных плоскостях; Q_z , Q_y , N – поперечные и продольные силы; M_{φ} – крутящий момент; t – толщина стенки трубопровода; β – условная координата точки [46].

В сжатой зоне стенка должна быть проверена на местную устойчивость, на которую не оказывают влияния кольцевые ребра, установленные для сохранения контура поперечного сечения.

Проверка на местную устойчивость производится по формуле

$$\sigma_1 \leq \gamma_c \cdot \sigma_{01},$$

где σ_{01} – критическое напряжение потери устойчивости круглой цилиндрической оболочки при изгибе, определяемое по формуле

$$\sigma_{01} = [1 + 0,1(1 - \sigma'_1 / \sigma_1)] \sigma_{01},$$

где σ_{01} , σ_1 , σ'_1 – см. СНиП II-V.3-72.

Следует отметить, что с учетом тонкостенности практически для всех трубопроводов комплекса доменной печи критерием несущей способности является не прочность, а устойчивость. Области параметров трубопроводов (диаметр и толщина стенки) в зависимости от критерия, определяющего несущую способность, показаны на рис. 14.4.

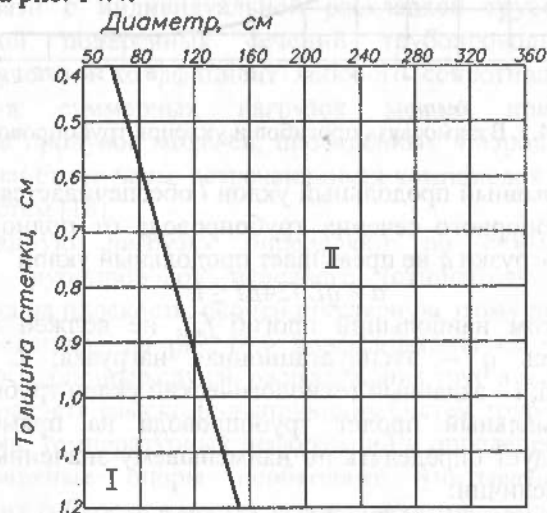


Рис. 14.4. Области критериев несущей способности трубопроводов: I – по прочности; II – по устойчивости

По второй группе предельных состояний важным критерием, влияющим на работоспособность трубопровода, является его деформация под нагрузкой – прогиб. Величина прогиба связана здесь с необходимостью обеспечения заданного продольного непрерывного уклона трубопровода для непрерывного стока конденсата и исключением образования «мешков», препятствующих его движению.

С увеличением уклона допускаемая величина прогиба увеличивается (рис. 14.5) [43].

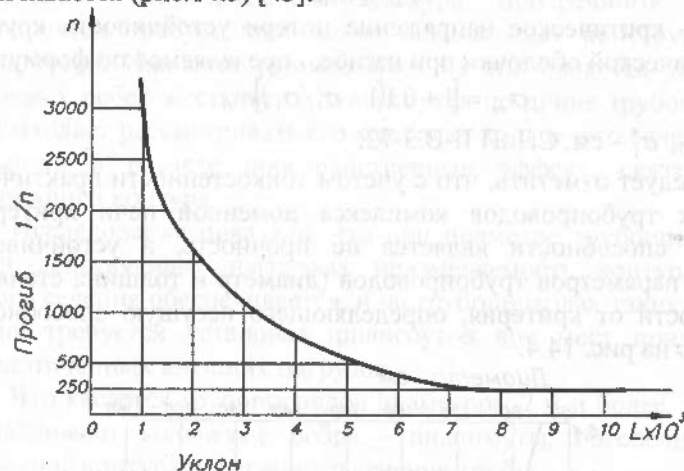


Рис. 14.5. Взаимосвязь прогибов и уклонов трубопроводов

Непрерывный продольный уклон i обеспечивается, если угол поворота α опорного сечения трубопровода от полной эксплуатационной нагрузки q не превышает продольный уклон

$$\alpha = qL^3/24EI \leq i.$$

При этом наибольший прогиб $f_{\max}$ не должен превышать $0,313iL$. Здесь q – эксплуатационная нагрузка; L – пролет трубопровода; i – заданный технологический уклон трубопровода.

Максимальный пролет трубопровода на прямолинейных участках следует определять по наименьшему значению одной из следующих величин:

- по первой группе предельных состояний

$$L = 2,5D\sqrt{i(mR_y - \sigma_n)/q_1} \text{ или } L = 2,5D\sqrt{i(m\sigma_{\text{он}} - \sigma_n)/q_1};$$

- по второй группе предельных состояний

$$L = 283D\sqrt{it/q_2},$$

где L – величина максимального пролета, м; q_1 – предельная нагрузка, кгс/м; q_2 – эксплуатационная нагрузка, кгс/м; D – диаметр трубопровода, м; t – толщина стенки трубопровода, мм; $\sigma_{\text{он}}$ – критические напряжения потери устойчивости, кгс/м²; R_y – расчетное сопротивление материала трубопровода, кгс/м²; σ_n – нормальные напряжения от продольной силы, кгс/м²; γ_c – коэффициент условий работы.

Для трубопроводов, сваренных односторонним швом без подварки корня и соединенных на бандажах, приваренных только с наружной стороны, коэффициент условий работы принимается $m = 0,8$. В остальных случаях $m = 1,0$.

Расчет трубопроводных систем на ветровые воздействия выполняется в соответствии с [21]. Коэффициенты лобового сопротивления принимаются в зависимости от расположения труб. Действие ветровой нагрузки учитывается только в направлении поперек трубопроводной системы.

В связи с индивидуальной раскладкой трубопроводов и компоновкой поперечных сечений трубопроводных систем аэродинамический коэффициент лобового сопротивления C_x для определения суммарных нагрузок можно принимать по результатам продувок моделей, проведенных в аэродинамической трубе для наиболее часто встречающихся компоновок поперечного сечения систем [18].

Указанную нагрузку определяют по сумме проекций диаметров трубопроводов переднего (относительно ветрового потока) ряда на плоскость, перпендикулярную этому потоку.

Приведенные на рис. 14.6 коэффициенты C_x усреднены и охватывают различные случаи расположения труб в пакете.

При расчете самокомпенсирующих систем трубопроводов на компенсацию температурных деформаций и определении нагрузок на неподвижные опоры необходимо учитывать локальное изменение их гибкости в местах углов поворотов – колен.

Теоретическое исследование этого вопроса [33] объясняет данное явление изменением формы поперечного сечения кривой трубы при изгибе. Установлено, что гипотеза неизменяемости

формы поперечного сечения неприемлема к тонкостенным трубам с коленами, имеющим большую кривизну. Гибкость таких труб по сравнению с прямыми значительно больше за счет эффекта сплющивания и овализации их поперечного сечения в районе колен.

Схема компоновки сечения			
C_x	1,0	0,9	1,1
Схема компоновки сечения			
C_x	1,0	1,1	0,8

Рис. 14.6. Аэродинамические коэффициенты C_x для различных компоновок труб в пакете

В футерованных трубах этот эффект практически отсутствует, из-за препятствия футеровки и ребер для ее крепления этим деформациям, и в расчетах не учитывается.

Что касается нефутерованных труб, то при работе их на самокомпенсацию температурных деформаций одновременно с уменьшением гибкости колен растут и напряжения, возникающие в связи с этим в коленах труб.

В таких трубах наряду с повышенной гибкостью появляются значительные продольные и кольцевые напряжения, которые возникают от изгиба под влиянием сил, сплющивающих поперечное сечение. Характер распределения этих напряжений оказывается совершенно иным, чем в прямых трубах. При использовании гипотезы неизменяемости формы поперечного сечения напряжения изменяются по линейному закону и достигают максимума в точках, наиболее удаленных от нейтральной оси.

В кривых трубах напряжения распределяются нелинейно и изменяются по более сложному закону.

В соответствии с выводами Кармана [33]

$$M_{\max} = m_k M'_{\text{изг}},$$

где $M'_{\text{изг}}$ — изгибающий момент, определенный с учетом гипотезы неизменяемости формы и необходимый для начального изменения формы; $M_{\max}$ — тот же момент, определенный с учетом изменения формы поперечного сечения; m_k — коэффициент увеличения напряжений изгиба колен, зависящий от так называемого коэффициента трубы λ_k

$$\lambda_k = t \rho / r_{\text{ср}}^2,$$

где t — толщина стенки трубы; ρ — радиус изгиба трубы; $r_{\text{ср}}$ — средний радиус трубы.

Для трубопроводов комплекса доменной печи характерны трубы большого диаметра. Исследования таких труб, т.е. при $\lambda < 0,3$, позволили получить

$$m_k = 0,9 / \lambda_k^{2/3}.$$

Одновременно с эффектом увеличения напряжений изменение формы поперечного сечения колен приводит также и к понижению их жесткости. При $\lambda < 0,3$ коэффициент понижения жесткости (или гибкость колена) определяется по формуле

$$K_{\text{ж}} = \lambda / 1,65.$$

На гибкость колен влияет также способ их соединения с прямыми участками. Жесткое крепление, например, при помощи фланцевых соединений, препятствует овализации кривых труб в процессе изгиба, тем самым снижая их гибкость.

Гибкость таких колен определяется, исходя из

$$K_{\text{ж}} = \lambda^m / 1,65,$$

где m — показатель, зависящий от количества фланцев; при фланцевом соединении на одном конце колена $m = 5/6$, на двух концах $m = 2/3$.

Коэффициент $K_{\text{ж}}$ учитывается по всей длине криволинейного участка (рис 14.7) между точками A и B . Длина криволинейного участка может быть определена как

$$L_{\text{к}} = \phi \rho,$$

где ϕ — значение угла поворота.

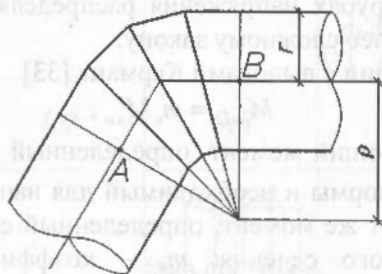


Рис. 14.7. Схема участка колена трубопровода пониженной жесткости

14.3.7. Расчет дисковых компенсаторов. Геометрическими характеристиками компенсаторов, применяемых для газо-воздухопроводов низкого давления и состоящих из плоских сварных дисков, являются диаметр диска $D_{\text{д}}$, толщина его стенки t и отношение диаметра трубопровода D к диаметру диска $D_{\text{д}}$.

Основными параметрами, характеризующими дисковые компенсаторы, являются их компенсирующая способность, а также усилие распора от температурных деформаций и внутреннего давления газовой среды.

Расчетное значение суммарного отпора компенсатора складывается из величин температурного отпора P_t и отпора от

внутреннего давления газовой среды P_p . Методика определения этих параметров предложена в [33].

Под максимальной компенсирующей способностью (осадкой) компенсатора понимают двухстороннее изменение его длины, допустимое по условиям прочности компенсатора (под действием сжимающих или растягивающих сил), по сравнению с его длиной в ненапряженном состоянии. Компенсирующую способность одной волны компенсатора определяют:

$$\Lambda = 0,75 R_{\text{с}} P^2 \xi / Et, \text{ см},$$

где $R_{\text{с}}$ — расчетное сопротивление материала, Па; E — модуль упругости, Па; t — толщина стенки компенсатора, см; ξ — коэффициент, определяемый по таблице 14.32 и зависящий от отношения $\phi = D/D_{\text{д}}$, где D — диаметр трубопровода; $D_{\text{д}}$ — диаметр диска компенсатора.

Компенсирующая способность многоволнового компенсатора определяется как сумма компенсирующих способностей всех волн.

Жесткость дискового компенсатора или его распор, вызванный температурными деформациями трубопровода, определяют по формуле

$$P_t = 23,4 \pi R_{\text{с}} t^2 / (1 - \phi), \text{ Н}.$$

Жесткость волны сварного дискового компенсатора (отпор одной волны при изменении ее длины на 1 см) определяется как отношение P_t / Λ и равна

$$P_t' = 31,2 Et^2 / \xi (1 - \phi) D^2, \text{ Н}.$$

Температурный распор многоволнового компенсатора определяется по формуле

$$P = P_t' \Delta t \gamma_f / n, \text{ Н},$$

где γ_f — коэффициент надежности по нагрузке; n — количество волн; $\Delta t = \alpha L \Delta t$ — наибольшее по условиям работы изменение длины компенсатора по сравнению с его длиной в ненапряженном состоянии в момент замыкания; L — расстояние между неподвижными опорами на участке, где установлен компенсатор; Δt — температурный перепад, определяемый:

а) для компенсаторов, устанавливаемых без предварительной растяжки (обжатия), как характеристическое значение изменений температур при технологическом или сезонном климатическом

перепаде температур соответственно в теплое Δt_w и холодное Δt_c время года:

$$\Delta t_w = t_w - t_{0c}; \Delta t_c = t_c - t_{0w},$$

где t_w и t_c – характеристическое значение температур конструкции при эксплуатации в теплое или холодное время года. При отсутствии технологической температуры принимается климатическая по [22]; t_{0w} и t_{0c} – начальные температуры конструкции в момент замыкания системы в теплое или холодное время года, принимаемые при неизвестном фактическом времени окончания монтажа соответственно $t_{0w} = 15$ и $t_{0c} = 0^\circ\text{C}$;

б) для компенсаторов, устанавливаемых с предварительной растяжкой (обжатием), по формуле

$$\Delta t = (t_w - t_c)/2.$$

В соответствии с рекомендациями [72] для оценочных расчетов температурный перепад (характеристическую разность температур) от климатических воздействий можно принимать по таблице 14.30.

Таблица 14.30

Нормативный температурный перепад

Районы по карте ДБН В.1.2-2:2006	Характеристическая разность температур, $^\circ\text{C}$
I	30
II	40
III	50

Количество волн компенсатора определяют по формуле

$$n = \Delta l / \Lambda',$$

где $\Lambda' = K\Lambda$ – полезная компенсирующая способность компенсатора. Обычно принимают $K = 1/2 \dots 1/3$.

Предварительная растяжка (+) или обжатие (–) компенсатора в зависимости от температуры замыкания определяется условием

$$f = \alpha L(t_{\text{зам}} - t_0),$$

где $t_0 = (t_w - t_c)/2$ – температура, при которой не требуется растяжка компенсатора.

В таблице 14.31 приведены значения предварительной деформации компенсатора в зависимости от температуры замыкания.

Распор компенсаторов от внутреннего давления газовой среды не зависит от числа его волн и определяется условием

$$P_p = p D_k \omega, \text{ Па},$$

где p – расчетное давление газовой среды, Па; ω – коэффициент, зависящий от ξ , определяемый по таблице 14.32.

Таблица 14.31

Значения относительной величины предварительной деформации компенсатора

Температура замыкания t_{0c} , град	Растяжение	Сжатие	Температура замыкания t_{0w} , град	Растяжение	Сжатие
-40	0,5	–	+10	–	0,125
-30	0,375	–	+20	–	0,25
-20	0,25	–	+30	–	0,375
-10	0,125	–	+40	–	0,5

Таблица 14.32

Данные для расчета волнового дискового компенсатора

D , мм	D_k , мм	φ	ξ	ω
1	2	3	4	5
620	1620	0,375	18,05	2,04
720	1720	0,412	12,17	1,65
820	1820	0,444	9,75	1,39
920	1920	0,474	7,57	1,19
1020	2020	0,500	6,04	1,05
1120	2120	0,524	4,92	0,93
1220	2220	0,545	4,09	0,84
1320	2320	0,565	3,44	0,76
1420	2420	0,583	2,92	0,70
1520	2520	0,600	2,53	0,64
1620	2620	0,615	2,20	0,59
1720	2720	0,630	1,94	0,55
1820	2820	0,643	1,71	0,52
2020	3020	0,687	1,38	0,46
2220	3220	0,688	1,12	0,41
2420	3420	0,706	0,93	0,37
2520	3520	0,714	0,86	0,36
2620	3620	0,722	0,79	0,34
2820	3820	0,737	0,66	0,31
3020	4020	0,750	0,59	0,29

Окончание таблицы 14.32

1	2	3	4	5
3220	4220	0,762	0,51	0,25
3500	4500	0,778	0,43	0,24

$$\varphi = D/D_k; \quad \omega = \pi(1 - \varphi)(1 + 2\varphi)/12\varphi^2;$$

$$\xi = 6,9 [(1 - \varphi^2)/\varphi^2 - (4\ln^2\varphi)/(1 - \varphi^2)]/(1 - \varphi).$$

Расчетные характеристики сварных дисковых компенсаторов трубопроводов, работающих под внутренним давлением 20 кПа, приведены в таблице 14.33.

Таблица 14.33

Расчетные характеристики сварных дисковых компенсаторов при высоте волны 500 мм

D, мм	Λ, см			P _н , кН			P _р , кН
	Толщина стенки волны, мм						
	4	5	6	4	5	6	
620	4,1	3,2	2,7	1,73	3,38	5,85	14,65
720	4,0	3,2	2,6	1,88	3,58	6,36	16,21
820	3,9	3,1	2,6	2,03	3,96	6,85	17,84
920	3,8	3,1	2,6	2,18	4,26	7,37	19,33
1020	3,8	3,0	2,5	2,33	4,55	7,87	20,94
1120	5,5	4,5	3,7	2,48	4,85	8,38	24,48
1220	5,5	4,4	3,7	2,62	5,13	8,86	24,13
1320	5,5	4,4	3,7	2,79	5,44	9,62	25,69
1420	5,4	4,3	3,6	2,95	5,75	9,94	27,24
1520	5,4	4,3	3,6	3,09	6,03	10,42	28,80
1620	5,3	4,2	3,5	3,24	6,33	10,94	30,41
1720	5,3	4,2	3,5	3,40	6,63	11,46	31,85
1820	5,2	4,1	3,5	3,56	6,96	12,03	33,50
2020	5,2	4,1	3,5	3,84	7,51	12,97	36,56
2220	5,1	4,1	3,4	4,18	8,17	14,11	39,69
2420	5,0	4,0	3,4	4,46	8,72	15,07	42,85
2520	5,0	4,0	3,4	4,60	8,98	15,51	44,50
2620	5,0	4,0	3,4	4,75	9,27	16,02	46,10
2820	4,9	3,9	3,3	5,17	10,09	17,43	49,08
3020	4,9	3,9	3,3	5,32	10,39	17,96	52,38
3220	4,9	3,9	3,3	5,65	11,04	19,07	55,50
3500	4,9	3,9	3,3	6,06	11,84	20,46	60,03

ГЛАВА 15 МАТЕРИАЛ КОНСТРУКЦИЙ

§ 15.1. Свойства сталей

Сталь – сплав железа и углерода, а также других примесей – не является неизменным и статичным материалом. Ее свойства и качества находятся в прямой зависимости от химического состава, технологии процесса выплавки и прокатки, других технологических операций, которые были применены к стали или прокату.

У сталей различают *механические и технологические* свойства [78]:

– основные *механические* свойства: прочность, ударная вязкость, относительное удлинение, выносливость, твердость, усталостная прочность;

– основные *технологические* свойства: свариваемость, стабильность мелкозернистой культуры при нагреве, стойкость к охрупчиванию при охлаждении или перегреве, коррозионная стойкость, порог хладноломкости, порог красноломкости.

Механические свойства стали определяются статическими испытаниями в соответствии с ГОСТ 1497-84, основные из которых следующие: предел текучести σ_t , временное сопротивление $\sigma_{вр}$, относительное удлинение δ , сужение ψ , модуль упругости E .

Химический состав стали существенно влияет на ее механические и технологические свойства.

Содержание углерода (C) практически определяет основные *механические* свойства строительной стали. Увеличение его содержания повышает значения предела текучести стали и ее временного сопротивления, но снижает значения относительного удлинения, относительного сужения и ударной вязкости. Содержание углерода менее 0,1 % значительно ухудшает свариваемость стали. Повышение содержания углерода более 0,3 % влечет за собой уменьшение протяженности площадки текучести и повышает склонность металла к образованию трещин при сварке. При содержании углерода более 1% пластичность стали, практически, отсутствует. Снижение пластичности хорошо характеризуется отношением $\sigma_t/\sigma_{вр}$, которое по мере увеличения содержания углерода уменьшается.

Исследования свойств малоуглеродистой стали позволили установить величины предельного содержания отдельных компонентов, которые приведены в таблице 15.2.

Таблица 15.2

Величины предельного содержания компонентов

Химические элементы	Содержание элементов, %		
	минимальное	оптимальное	максимальное
Углерод	0,1	0,13 – 0,18	0,25
Кремний	0,1	0,1	0,15
Марганец	0,3	0,4 – 0,6	0,9
Сера	0,01	0,035	0,05
Фосфор	0,01	0,04	0,04

Химический состав стали в значительной степени зависит от среды, в которой эксплуатируется.

Различают несколько групп сталей:

а) *коррозионностойкие (нержавеющие)* – стойкие к коррозии в различных средах;

б) *жаростойкие (окалиностойкие)* – стойкие к коррозии в газовых средах при температурах выше 550°C и работающие в ненагруженном или в слабо нагруженном состоянии;

в) *жаропрочные* – работающие в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение определенного времени и обладающие при этом достаточной прочностью и жаростойкостью.

Важнейшим показателем качества стали, определяющим в большинстве случаев возможность ее применения в конструкциях доменного комплекса, является гарантированная прочность и сопротивляемость хрупкому разрушению, так называемая хладостойкость.

Все строительные стали по хладостойкости делятся на три группы:

I – без гарантированной хладостойкости;

II – с гарантированной хладостойкостью для конструкций, эксплуатируемых при расчетных температурах не ниже минус 40°C;

III – с гарантированной хладостойкостью для конструкций, эксплуатируемых при расчетных температурах ниже минус 40°C, так называемое «северное исполнение».

Поскольку показателем хладостойкости является ударная вязкость, в таблице 15.3 наведены температуры испытания, при которых должна быть гарантирована ударная вязкость каждой группы по хладостойкости.

Температуры испытаний в соответствии с ГОСТ 27772-88 указаны для условий определения ударной вязкости на стандартных образцах KCU с полукруглым надрезом.

Оценка ударной вязкости по KCV принята в международной практике, и образец обозначен в Европейском стандарте EN 10025 как «образец Charpy».

Нормам ударной вязкости по образцам KCU при минус 40°C и минус 70°C примерно соответствуют нормы ударной вязкости по образцам KCV при 0°C и минус 30°C.

Таблица 15.3

Класс прочности стали	Температура, при которой гарантируется ударная вязкость KCU, не менее 0,3 МДж/м ² , для групп по хладостойкости		
	I	II	III
C225	Не гарантируется	-20	Не применяется
C285	Не применяется	-40	-70
C325	То же	-40	-70
C390	То же	-40	-70
C440	То же	-40	-70
C590	То же	-40	-70
C735	То же	-40	-70

В последнее время требования к аттестации стали повышаются и условия определения ударной вязкости становятся более жесткими, в связи с чем применяются образцы KCV с острым надрезом (образец типа II по ГОСТ 9454-78).

§ 15.2. Основные принципы выбора материала

Выбор марки стали и ее физико-механических свойств в зависимости от типа сооружения, назначения конструкций и действующих на нее нагрузок может иметь решающее значение для обеспечения прочности и надежности сооружения. Разнообразие статических схем конструкций, условий их работы, режимов, при

которых они эксплуатируются, требует индивидуального подхода к выбору материала с необходимыми для этих условий служебными характеристиками. Сталь, применяемая для конструкций сооружений доменного комплекса, должна отвечать большому спектру требований, обеспечивающих надежную работу и долговечность.

В кожухах агрегатов комплекса доменной печи, как в оболочках, возникают напряжения двух направлений – кольцевого и меридионального, что создает двухосное напряженное состояние. В такой ситуации оказываются стесненными деформации оболочки и создаются условия, способствующие хрупкому разрушению.

Хрупкое разрушение элемента или всей конструкции – наиболее опасное предельное состояние, при котором размер зоны пластической деформации у вершины трещины пренебрежимо мал по сравнению с размером трещины или поперечником твердого тела. Скорость распространения такой трещины в стали составляет порядка 1800 м/с [15].

Хрупкое разрушение происходит при номинальных растягивающих напряжениях в форме самопроизвольного распространения трещины под действием упругой энергии, накопленной конструкцией. Оно не прогнозируется при традиционных расчетах на прочность конструкций по пределам текучести и прочности. В связи с этим, для наиболее ответственных конструкций – кожухов доменной печи и воздухонагревателей, несущих элементов наклонных мостов и других – выбирается сталь с малой склонностью к хрупкому разрушению, опасность которого в условиях двухосного напряженного состояния весьма велика.

Находясь в жестких эксплуатационных условиях, такая сталь должна быть способна испытывать рабочие напряжения, в том числе и «пиковые», без возникновения хрупкого разрушения. В этом отношении сталь повышенной прочности воспринимает более высокий уровень напряжений по сравнению с малоуглеродистой сталью.

По данным [11, 15], трещинообразование в кожухах доменных печей и воздухонагревателей и связанные с этим разрушения приводят к 30 – 35% потерями в производстве чугуна. При этом имеют значение неоптимальная компоновка футеровки с недостаточными компенсационными зазорами, дефекты монтажа и сварных швов, а также местные перегревы.

Очевидно, что вероятность появления трещин при нормируемых дефектах изготовления и монтажа незначительна. По всей видимости причиной их появления является высокая температура при локальных перегревах. Так, известно, что при перегреве во время сварки температура хрупкости смещается в сторону положительных температур, повышается температура хладостойкости, т.е. появляется склонность стали к хрупкому разрушению. Пониженная хладостойкость может проявляться на любом участке металла шва и околосшовной зоны, однако наиболее заметна она в зоне перегрева у границы сплавления [19].

Аналогичная картина наблюдается и при локальных перегревах металла кожухов в процессе эксплуатации. Анализ металла кожухов после длительной их эксплуатации в условиях воздействия высоких температур показал существенное снижение хладостойкости и, соответственно, рост критической температуры хрупкости [12, 13].

В таблице 15.4 приведены экспериментальные значения критической температуры хрупкости t_{50} (50% вязкой составляющей в изломе стандартных ударных образцов) для ряда объектов [15].

Таблица 15.4

Объект	Марка стали	Температура хрупкости, t_{50} °C
Кожух доменной печи №10 ММК: зона горна зона летки	09Г2С 09Г2С	+160....+140 +60
Кожух (зона горна) доменной печи №9 ММК	09Г2С	+55
Кожух воздухонагревателя Косогорского металлургического завода	10Г2С1	+40
Кожух воздухонагревателя ОАО «Тулачермет»	Ст3сп	+40

Полученные данные подтверждают снижение хладостойкости, повышение температуры хрупкости и свидетельствуют о том, что при незначительном понижении температуры существенно возрастает вероятность трещинообразования, что особенно опасно для металла сварных швов и зоны термического влияния сварки.

На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований в [16] сделан общий вывод о том, что длительное воздействие на металл повышенной температуры приводит к развитию тепловой хрупкости, заключающейся в существенном росте порога хладноломкости материала, и, соответственно, снижению общей прочности конструкций.

Ударная вязкость, характеризующая склонность металла к переходу в хрупкое состояние, такой же определяющий показатель качества стали, как и предел текучести. Если предел текучести является основным показателем, характеризующим переход металла в пластическую стадию и несущую способность конструкции, то показатель ударной вязкости, характеризующий переход стали в хрупкое состояние и, тем самым, надежность конструкции, не менее важен, особенно для кожухов доменных печей и воздухонагревателей, имеющих тенденцию к увеличению их толщины, что приводит к повышению температуры перехода в хрупкое состояние. В [55] показано, что при толщине листов 70–90 мм повышение этой температуры достигает 50°C.

Кроме того, наличие большого количества вырезов и отверстий, особенно в кожухах доменных печей, создавая концентрацию напряжений, увеличивает склонность материала к хрупкому разрушению. Поэтому качество стали и ее сопротивляемость этому виду разрушения имеют важное значение. Все конструкционные стали, находясь в условиях реальных конструкций с концентраторами местных напряжений и надрезами, обладают свойствами хладноломкости, т.е. сниженной механической прочностью, и переходят в хрупкое состояние не только при отрицательной температуре, но и при положительной. Работа стали при отрицательных температурах является одним из главных условий перехода стали в хрупкое состояние.

Температура поверхности кожухов агрегатов связана не только с температурой внутренней поверхности кладки, но и с температурой наружного воздуха, скоростью и направлением ветра и пр. (рис. 15.1), а понижение температуры кожухов сосудов приводит к росту напряжений из расчета 2,0–2,5 МПа на 1°C понижения температуры и увеличению давления на футеровку [77].

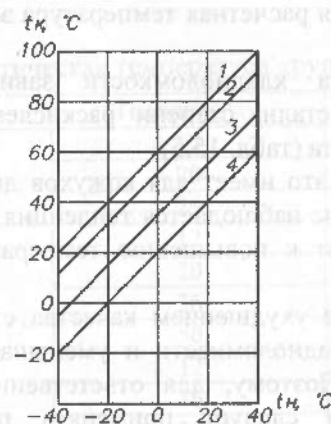


Рис. 15.1. Зависимость температуры кожуха t_k от температуры наружного воздуха в зоне воздухонагревателя и внутренней поверхности кладки:
1 – 1300°C; 2 – 1000°C; 3 – 700°C; 4 – 400°C

Особенно чувствительным к понижению температуры является показатель ударной вязкости, который определяет порог хладноломкости и является одним из основных критериев при выборе стали с высокой сопротивляемостью хрупкому разрушению. Ударная вязкость при низких температурах (минус 40°C или минус 70°C) характеризует сопротивляемость стали возникновению трещин, а зернистость и волокнистость в изломе – их распространению.

Мелкозернистые стали сопротивляются хрупкому разрушению лучше, чем крупнозернистые.

К стали, применяемой для ответственных металлоконструкций доменного комплекса, должны предъявляться высокие требования не только в отношении механических и химических характеристик и способа выплавки, но и в отношении ударной вязкости, порога хладноломкости и других показателей, характеризующих склонность стали к хрупкому разрушению.

Для конструкционной стали принят порог хладноломкости (или хладнохрупкости) при температуре T_k , при которой ударная вязкость приобретает нормируемое значение не менее 0,3 МДж/м².

Температурный запас вязкости определяется как разность

$$\Delta T = T_s - T_k,$$

где T_2 – наиболее низкая расчетная температура эксплуатации; T_k – порог хладноломкости.

Величина порога хладноломкости зависит от многих факторов – качества стали, степени раскисления, а также от толщины металлопроката (табл. 15.5).

Особое значение это имеет для кожухов доменных печей и воздухонагревателей, где наблюдается тенденция к увеличению их толщины, что приводит к повышению температуры перехода в хрупкое состояние.

Таким образом, с ухудшением качества стали повышается температура порога хладноломкости и уменьшается температурный запас вязкости. Поэтому, для ответственных конструкций доменных комплексов следует применять прокат высокого качества с гарантированным показателем ударной вязкости при отрицательных температурах.

Следует отметить, что эти температуры не связаны с температурой, при которой сооружение эксплуатируется, а лишь гарантируют более высокий температурный запас вязкости.

Таблица 15.5

Значение температуры порога хладноломкости T_k , °C

Сталь	T_k , °C, при толщине, мм	
	10 – 20	30 – 40
ВСт3 спокойная	-50	-20
ВСт3 полуспокойная	-40	-20
ВСт3 кипящая	-20	0...-5
Повышенной прочности	-70	-70

Толщина проката кожухов доменных печей и воздухонагревателей связана с величиной технологических параметров, имеющих тенденцию к росту. Масштабный фактор в значительной степени влияет на склонность стали к хрупкому разрушению, и с увеличением толщины проката опасность такого разрушения увеличивается, так как возрастает влияние трехосного напряженного состояния и качество металлопроката ухудшается.

В таблице 15.6 приведена величина критической температуры хрупкости сталей различных марок T_{cl} [3].

Таблица 15.6

Критическая температура хрупкости T_{cl}

Марка стали	Толщина, мм	T_{cl} , °C
Ст3сп5	12	-70
	20	-50
	25	-45
09Г2С*	12	-100
	20	-80
	36	-60
	50	-50
16Г2АФ*	12	-150
	16	-90
	20	-130
	32	-90

* Для сталей повышенной прочности, поставленных по 15-й категории, значения T_{cl} понижаются на 20° C.

Исходя из этого, независимо от климатической температуры района строительства и эксплуатации, для кожухов доменных печей применяется сталь 12-й категории с гарантированным показателем ударной вязкости не менее 0,3 МДж/м² на образцах КСУ при температуре минус 40°С, а для кожухов воздухонагревателей и воздухопроводов горячего дутья – сталь 15-й категории с гарантированным показателем ударной вязкости не менее 0,3 МДж/м² на образцах КСУ при температуре минус 70°С.

Важным критерием при выборе марки стали являются ее пластические свойства, снижающие склонность к хрупкому разрушению, обеспечивающие работу в условиях появления «пиковых» нагрузок и необходимую приспособляемость конструкции.

Сталь должна достаточно хорошо сопротивляться температурным воздействиям, резким сменам температуры и тепловым ударам. Следует заметить, что наряду со стационарной повышенной температурой кожуха печи на отдельных его участках температура меняется многократно. Так, из-за температурного воздействия, вызванного выпуском чугуна или шлака, температура кожуха в сфере действия местного нагрева меняет свою величину – нагревание при выпуске продуктов плавки, затем постепенное охлаждение до рабочей стационарной температуры. Такое

изменение температуры и соответствующих напряжений происходит столько раз, сколько сделано выпусков. Поэтому сталь для конструкций доменного комплекса должна обладать еще и высокой сопротивляемостью тепловой хрупкости, т.е. не допускать значительного повышения порога хладноломкости при воздействии повышенных и высоких температур.

Достаточно высокие требования предъявляются к химическому составу стали, по которому определяются ее прочность и надежная сварка конструкций, а также стабильная сопротивляемость хрупкому разрушению.

Для стали, применяемой для кожухов доменных печей и воздухонагревателей, следует ограничить содержание серы до 0,035%, что предусмотрено п. 2.9, а также обеспечить гарантию свариваемости согласно п. 2.18 ГОСТ 27772-88*.

Кроме того, для этих конструкций сплошность проката должна соответствовать классу I по ГОСТ 22727-88*.

К другим сооружениям доменного комплекса также предъявляются различные требования, обеспечивающие надежную работу конструкций. В частности, известны случаи трещинообразования в мораторном кольце, связанного с прикреплением к нему нижнего пояса шахты перпендикулярно его поверхности и возникновением усилий поперек проката, вызывающих его расслоение, т.е. материал, применяемый для мораторного кольца, должен обеспечить восприятие этих усилий.

§ 15.3. Марки стали для конструкций сооружений доменного комплекса

В таблице 15.7 приведены марки стали, рекомендуемые для применения при проектировании металлоконструкций сооружений комплекса доменной печи. В основу классификации конструкций по группам положены условия их работы и требования таблицы 50* СНиП II-23-81*. Указанные марки стали и их эксплуатационные характеристики соответствуют минимальным требованиям, которые являются обязательными для возможности их применения.

Стали классов С390 и С440 или иные марки с более высокими характеристиками могут применяться при соответствующем технико-экономическом обосновании и условии тщательного соблюдения технологии изготовления конструкций и их сварки.

Таблица 15.7

Рекомендуемые марки стали

Конструкции	Группа конструкций	Наименование стали		Рекомендуемые марки стали	
		класс	категория	марка	категория
	Нормативный документ				
	СНиП II-23-81*	ГОСТ 27772-88		ГОСТ 19282-73 ГОСТ 380-71**	
1	2	3	4	5	6
ЛИСТОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ					
Кожух доменной печи	1	С345	3	09Г2С*	12
		С390		14Г2АФ	12
		С440		16Г2АФ-Ш**	12
		С390		06Г2Б***	12
Мораторное кольцо	1	С390		06Г2Б***	12
Кожух воздухонагревателя, воздухопроводы горячего дутья	1	С345	4	09Г2С	15
Кожухи пылеуловителя, скруббера, электрофильтра, водоотделителя, каплеуловителя	1	С255	3	ВСт3сп	5
		С345		09Г2С	6
Газопроводы грязного газа, воздухопровод холодного дутья, прочие газо-воздухопроводы с внутренним давлением свыше 70 кПа	1	С255		ВСт3сп	5
		С345	3	09Г2С	6
Труба для взятия печи на «тягу», дымовая труба, цилиндрический ствол лифта, бункеры, газо-воздухопроводы с внутренним давлением от 20 до 70 кПа	2	С255		ВСт3сп	5

Продолжение таблицы 15.7

1	2	3	4	5	6
Газопроводы с внутренним давлением от 20 кПа и воздухопроводы с внутренним давлением от 10 до 20 кПа	3	C245		ВСтЗпс	6
Воздухопроводы с внутренним давлением до 10 кПа	3	C235		ВСтЗкп	2
СТЕРЖНЕВЫЕ КОНСТРУКЦИИ					
Доменная печь					
Опорная балка колошниковой площадки, колошниковый копер, монтажная балка, подбалансирные балки, опора монтажной балки	1	C255		ВСтЗсп	5
		C345	3	09Г2С	6
Колонны горна и шахты, опорных систем и четырехколонников, балки колошниковой площадки, каркас и опора трубы взятия печи на «тягу», приемная воронка загрузочного устройства	2	C245		ВСтЗпс	6
		C255		ВСтЗсп	5
		C345	3	09Г2С	6
		C390		14Г2АФ	6
		C440		16Г2АФ	6
Площадки печи, колошниковой устройства	3	C235		ВСтЗкп	2
		C245		ВСтЗпс	6
Блок воздухонагревателей					
Балки для опирания воздухопровода горячего дутья, подкрановые балки здания (эстакады)	1	C255		ВСтЗсп	6
		C345	3	09Г2С	6
Каркас здания (эстакады), балки рабочей площадки	2	C245		ВСтЗпс	6
		C255		ВСтЗсп	5
		C345	3	09Г2С	6

Продолжение таблицы 15.7

1	2	3	4	5	6
Площадки	3	C235		BCт3кп	2
Здание доменной печи					
Балки под качающиеся желоба, балки площадок под подвижную нагрузку, проезжая часть въездной эстакады	1	C255		BCт3сп	5
		C345	3	09Г2С	6
		C390		14Г2АФ	6
Каркас здания, покрытие, связи балки рабочей площадки, не воспринимающие подвижную нагрузку	2	C245		BCт3пс	6
		C255		BCт3сп	5
		C345	3	09Г2С	6
Стойки рабочей площадки технологические площадки	3	C235		BCт3кп	2
		C245		BCт3пс	6
Пылеуловитель					
Опора, балки рабочей площадки, копер отсекающего клапана	2	C245		BCт3пс	6
		C255		BCт3сп	5
		C345	3	09Г2С	6
Опоры дроссельной группы и циклона-каплеуловителя	1	C345		BCт3сп	5
		C345	3	09Г2С	6
Опоры скрубберов, электрофильтров, водоотделителей	2	C245		BCт3пс	6
		C255		BCт3сп	5
		C345	3	09Г2С	6
Балки рабочих площадок, опоры газопроводов, технологические и обслуживающие площадки	3	C235		BCт3кп	2
		C245		BCт3пс	6
Лифт					
Балки пола машинного отделения	1	C255		BCт3сп	5
Решетчатый каркас	2	C245		BCт3пс	6
Площадки, лестницы, обшивка стен	3	C235		BCт3кп	2
Здание колошникового подъемника					
Опорные балки лебедки и приводов	1	C255		BCт3сп	5
		C345	3	09Г2С	6

Продолжение таблицы 15.7

1	2	3	4	5	6
Каркас здания колошниково-го подъемника	3	C245		ВСтЗпс	6
Бункерная эстакада					
Балки, непосредственно воспринимающие нагрузку от подвижного состава, балки под конвейеры и приводы грохотов, балки и площадки площадок грохотов	1	C390	3	14Г2АФ	6
		C345	3	09Г2С	6
		C255		ВСтЗсп	6
Бункеры, ребра жесткости бункеров, бункерные балки, не воспринимающие нагрузку от подвижного состава, каркас здания	2	C245		ВСтЗпс	6
		C255		ВСтЗсп	5
		C345	3	09Г2С	6
Площадки, лестницы	3	C235		ВСтЗкп	2
		C245		ВСтЗсп	6
Наклонный мост, галерея шихтоподачи					
Главные балки, балки проезжей части, подшивные балки, главные балки подшивных площадок, пилоны, подкрановые балки устройства для замены скипов, пролетные строения галереи шихтоподачи, опоры галереи	1	C255		ВСтЗсп	5
		C345	3	09Г2С	6
Каркас устройства для замены скипов	2	C245		ВСтЗпс	6
		C255		ВСтЗсп	5
		C345	3	09Г2С	6
Эстакады газо- воздухопроводов					
Пролетные строения	2	C245		ВСтЗпс	6
		C255		ВСтЗсп	5
		C345	3	09Г2С	6
Внутрицеховые газо- и воздухопроводы низкого давления	3	C235		ВСтЗкп	2

Окончание таблицы 15.7

1	2	3	4	5	6
Опоры пролетных строений и газо-воздухопроводов, технологические и обслуживающие площадки	3	C235		ВСтЗкп	2
* С дополнительными гарантиями по ограничению серы до 0,035% согласно п. 2.9, свариваемости по п. 2.18 ГОСТ 27772-88*, а также сплошности класса 1 по п.2.17 ГОСТ 22727-88. ** Сталь электрошлакового переплава по ТУ -141-1779-76. *** По ТУ У 14-16 150-89.					

ГЛАВА 16 ДЕФЕКТЫ И ПОВРЕЖДЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ

§ 16.1. Характеристика дефектов и повреждений

Как уже отмечалось, специфические условия эксплуатации конструкций доменного комплекса и совмещение ими технологических и строительных функций оказывают решающее влияние на прочность и долговечность сооружений.

Основные причины разрушения конструкций по данным Международного института сварки [75] приведены в таблице 16.1.

Таблица 16.1

Причины разрушения сварных конструкций	Случаи разрушений, %
Нерациональность запроектированных конструкций, в т.ч.	28,8
– неправильное конструирование	22,5
– введение сварных узлов в участки повышенных напряжений	6,3
Наличие дефектов в сварных соединениях, в т.ч.	21,3
– дефекты в швах или высокие остаточные напряжения	12,5
– дефекты формирования шва	8,8
Повышение напряжений при эксплуатации, чрезмерные нагрузки	18,7
Влияние коррозии	5,0

Согласно другим источникам статистика распределения причин аварий для сварных конструкций такова:

- ошибки проектирования – 27%;
- низкое качество стройматериалов – 11%;
- дефекты изготовления – 12%;
- дефекты монтажа – 30%;
- нарушение расчетных схем и нагрузок при эксплуатации – 14%;
- несовершенство норм и технических условий – 6%.

Износ конструкций в значительной степени связан с ростом дефектов и повреждений, причины возникновения которых различны.

Под *дефектом* понимается отклонение от требований нормативно-технической или проектной документации относительно качества, формы или фактических размеров элементов и конструкций, которое возникает в процессе создания конструкции – при проектировании, изготовлении, транспортировке, монтаже и характеризует ее начальное состояние.

Повреждение – это нарушение первичного качества элементов и конструкций или снижение уровня их работоспособности, которое возникает во время эксплуатации.

Началом развития повреждений зачастую является наличие тех или иных дефектов. Крупные повреждения, приводящие к прекращению эксплуатации сооружения или вызывающие опасность полного или частичного разрушения конструкций, относят к аварийным.

Повреждения возникают и развиваются во времени и зависят от срока эксплуатации конструкций и интенсивности силовых воздействий.

К дефектам монтажа, влияющим на надежность листовых конструкций кожухов агрегатов, следует отнести следующие:

- отступления от проекта КМ в конструктивном решении схемы и узлов;
- некачественные сварные соединения, выполненные без подварки корня шва, односторонним швом без остающейся технологической подкладки и др.;
- незаваренные трещины любой длины в основном металле любого элемента и в сварных швах;
- смещение кромок (депланация) в стыках более 0,1 толщины листов кожуха или более 4 мм для кожухов печей и более 3 мм для кожухов воздухонагревателей и воздухопроводов горячего дутья;
- выпучины и вмятины более 40 мм, измеренные на шаблоне длиной 1,5 м;
- участки кожуха печи, пораженные коррозией на глубину более 0,1 толщины листа и более 3 мм для кожухов воздухонагревателей и воздухопроводов горячего дутья;
- вырывы в основном металле и незаваренные кратеры в сварных швах;
- подрезы более 1 мм в кожухах печей и воздухопроводах горячего дутья и более 0,5 мм в кожухах воздухонагревателей;
- вставки и накладки неизвестного происхождения.

Все обнаруженные дефекты должны быть ликвидированы до пуска агрегата.

Повреждения в зависимости от вызывающих их воздействий могут быть разделены на:

- повреждения от силовых (механических) воздействий – трещины, разрывы, искривления и местные погибы;
- повреждения от температурных воздействий – изменение геометрической формы элементов или сооружения, разрушения, связанные с падением прочностных характеристик металла, хрупкие трещины при отрицательных температурах, потеря устойчивости и волнообразование оболочек кожухов, коробление плоских стенок;
- повреждения от химических (электрохимических) воздействий – коррозия металла и разрушение защитных покрытий.

Повреждения конструкций во время их эксплуатации приводят к частичной или полной остановке агрегатов на ремонт, а в некоторых случаях и к непредсказуемым ситуациям. Согласно статистическим данным годовые потери производства по причине повреждения кожухов печей, воздухонагревателей и воздухопроводов горячего дутья на заводах бывшего Союза составляли 10–15% от всех потерь.

Количественно ориентировочный дополнительный уровень напряжений, вызванных некоторыми дефектами, связанными с нарушениями качества монтажа и нормального режима эксплуатации, наведен в таблице 16.2.

Таблица 16.2

Дефект конструкции или воздействие на нее	Дополнительные напряжения, МПа (кг/см ²)
Местный перегрев кожуха до 300°C	80 (784)
Местный перегрев кожуха до 500 – 700°C	150 – 200 (1470 – 1960)
Депланации листов в стыках до 5 мм	300 (294)
Оставленные при монтаже футерованных кожухов скобы и кронштейны	80 – 150 (784 – 1470)
Уменьшение компенсационного слоя в футеровке на 20 – 25 мм	70 – 80 (686 – 784)
Подрез глубиной 0,5 мм и радиусом 0,25 мм для толщины листа 20 мм	Коэффициент концентрации напряжений 3,6

Анализ работы и состояния конструкций доменного комплекса показал, что для каждого сооружения, находящегося в специфических условиях эксплуатации, характерны определенные, наиболее часто встречающиеся дефекты и повреждения. К ним относятся трещины и разрывы кожухов агрегатов, деформации кожухов из-за их перегревов, повреждения элементов наклонных мостов, связанные с перегрузкой и нарушениями технологических режимов, разрушения мораторных колец, вызванные их деформациями и чрезмерным подъемом и др.

С учетом данных [59], в таблице 16.3 приведены основные наиболее часто встречающиеся повреждения конструкций при эксплуатации и возможные причины их появления.

Таблица 16.3

№ п/п	Характер повреждения	Факторы, вызывающие возникновение повреждения
1	2	3
Кожух доменной печи		
1	Вертикальные трещины в кожухе лещади	Недостаточный компенсационный зазор в кладке лещади. При повторных раздувках печи – застывший чугун («козел»)
2	Вертикальные трещины с раскрытием 60–80 мм в районе горна от фурменных приборов до лещади, возникшие после капитальных ремонтов II и III разряда	Затвердевание массы в компенсационном зазоре между футеровкой и холодильными плитами и рост радиального давления огнеупорной кладки
3	Трещины в кожухе металлоприемника	Высокая циклическая температура и концентрация напряжений в углах вырезов под чугунные летки
4	Трещины различного направления длиной 1,5–2,0 м в районе чугунной летки и фурменной зоны	Высокая циклическая температура кожуха в зоне чугунной летки, отсутствие или недостаточный компенсационный зазор между футеровкой и холодильниками
5	Вертикальные трещины от линии сопряжения заплечиков с мораторным кольцом	Выход из строя холодильников заплечиков

Продолжение таблицы 16.3

1	2	3
6	Трещины в кожухе заплечиков	Нарушения в работе системы охлаждения, недостаточные зазоры между холодильниками
7	Горизонтальные трещины длиной 2 – 3 м в кожухе шахты	Недостаточный компенсационный зазор между кожухом и кладкой или под защитными сегментами колошника и под кронштейновыми холодильниками, что приводит к большим меридиональным растягивающим напряжениям в кожухе
8	Трещины длиной 1 – 2 м в охлаждаемой части шахты	Местные перегревы и концентрация напряжений из-за некачественного образования отверстий под болты крепления холодильных плит
9	Трещины длиной 1 – 2 м вдоль вставок в кожух и под углом к ним	Нарушение технологии сварки и некачественное выполнение швов
10	Трещины длиной до 2 м в неохлаждаемой части шахты	Износ футеровки и проникновение в этих местах к кожуху высокотемпературных газов
11	Выпучивание и трещинообразование в неохлаждаемой зоне шахты	Перегрев металла кожуха
12	Трещины в кожухе купола	Повышение температуры газов, перегрев
13	Трещины в узлах примыкания газоходов	Низкое качество швов, перегрев, деформации кожуха из-за роста или просадки
14	Деформация кожуха неохлаждаемой зоны, трещины	Перегрев металла, потеря его несущей способности
15	Трещины в мораторном кольце	Недостаточный компенсационный зазор в футеровке
Кожух воздухогревателя		
1	Трещины в районе примыкания штуцеров горячего дутья и газовых горелок	Некомпенсированные температурные деформации воздухопровода, местные перегревы
2	Вертикальные трещины в кожухе	Недостаточный компенсационный зазор в футеровке, отступления от круговой формы поперечного сечения, подрезы, депланации

Продолжение таблицы 16.3

1	2	3
3	Кольцевые трещины в кожухе	Недостаточная величина зазора между футеровкой и кожухом купола, повышенное сцепление между кладкой и кожухом из-за непроектного заполнения компенсационного зазора в футеровке, оставленные монтажные приспособления
4	Деформации кожуха	Перегрев металла, повреждения кладки
5	Разрывы анкерных креплений	Недостаточный компенсационный зазор между насадкой и стеной
6	Трещины в шве приварки днища	Нарушение технологии крепления анкеров, недостаточный компенсационный зазор, качество швов
7	Кольцевые трещины и разрывы вблизи швов приварки днища к кожуху	Недостаточная величина компенсационного зазора в футеровке
8	Трещины на внутренней поверхности кожуха купола	Повышение температуры нагрева и появление с внутренней стороны кожуха агрессивной среды
Воздухопровод горячего дутья		
1	Трещины в местах отводов и примыкания к воздухогревателям	Некомпенсированные температурные деформации воздухопроводов, дефекты футеровки, перегрев
2	Разрывы компенсаторов	Качество изготовления, неполная затяжка стяжных болтов, неправильная система восприятия продольных неуравновешенных усилий
3	Смещение кольцевого воздухопровода с оси печи	Некомпенсированные температурные деформации прямого воздухопровода
Пылеуловитель		
1	Деформации опорных узлов	Проектные решения, качество монтажа
2	Деформации и трещины в месте входа газопровода грязного газа	Перегрев металла, недостаточная компенсация температурных перемещений

Окончание таблицы 16.3

1	2	3
Наклонные мосты		
1	Разрушения сварных швов, отрыв лестниц и площадок	Вибрация конструкций при движении скипа
2	Изгиб балок подшивных площадок	Непроектные усилия в тяговых канатах
3	Колебания моста	Расстройство путей движения скипов
Газоочистка		
1	Трещины в опорных узлах сосудов	Проектные решения, качество изготовления и монтажа
2	Вибрация каплеуловителя	Волнообразование и барботаж воды
3	Деформации и трещины в месте входа газопроводов в сосуды	Недостаточная компенсация температурных перемещений газопроводов

В отличие от строительных конструкций, здесь недостаточно отремонтировать возникшее повреждение. Если не устранить причину его возникновения, то повреждение может появляться многократно и в конечном итоге привести к аварийной ситуации.

На основе приведенной классификации, по результатам изучения статистики дефектов и повреждений, рассмотрены причины их появления в увязке с проходящими технологическими процессами.

§ 16.2. Кожухи доменных печей

Для кожухов доменных печей наиболее опасным видом повреждения являются трещины, так как при имеющемся внутреннем давлении это может привести к аварийной ситуации [1].

Анализ известных аварий, связанных с повреждениями кожухов доменных печей, приведен в таблице 16.4.

Согласно [59] трещины распределяются следующим образом:

- зона горна и чугунных леток – 65%
- заплечики – 16%
- шахта печи – 19%.

Также часто встречаются трещины в кожухе лещади, особенно после капитального ремонта II разряда, который, как

правило, проводится без выпуска «козла». Трещины располагаются вертикально и могут проходить по всей высоте кожуха лещади.

Таблица 16.4

Годы	Число случаев	Зона расположения трещин и разрывов (число случаев)					
		горн	фурм. зона	заплечики	маратор	шахта	колошник, купол
1976	15	1	–	7	2	5	–
1977	11	1	–	2	4	3	1
1978	5	–	–	2	–	3	–
1979	15	–	–	8	2	5	–
1980	11	–	1	7	–	3	–
1981	8	–	–	4	1	1	2
Всего	65	2	1	30	9	20	3

Попытки их заварки не дают положительных результатов, так как через короткий промежуток времени они возникают вновь с раскрытием до 100 мм. Например, после ремонта II разряда на 35 сутки после задувки доменной печи образовалась вертикальная трещина, идущая от низа кожуха лещади. Трещину неоднократно заваривали, но она вновь появлялась. Ее ремонт, в том числе и с усилением сварного шва дополнительными элементами, ни к чему не привел: разрывы продолжались, а спустя год через трещину прорвался жидкий чугун, что вызвало значительные повреждения окружающих конструкций. Аналогичные ситуации возникали на многих доменных печах, прошедших капитальные ремонты II разряда.

Главной причиной непрекращающегося появления трещин является воздействие жидкого чугуна – «козла», заполняющего яму, образованную при разгारे лещади. При работе печи жидкий чугун, раздвигая блоки лещади, проникает в швы между ними, постепенно приближаясь к кожуху. Во время остановки печи на капитальный ремонт без выпуска «козла» чугун остывает и увеличивает образовавшиеся зазоры. Задувка печи после капитального ремонта II разряда вновь приводит к расплавлению застывшего чугуна, который при этом графитизируется, увеличивается в объеме и, раздвигая углеродистые блоки,

приближается к кожуху вплотную, оказывая постоянное давление на него, что и приводит к повреждениям.

На одной из доменных печей объемом 1719 м³ произошла крупная авария кожуха шахты с образованием проема размерами 6×7 м и выбросом через него около 1000 т раскаленных материалов. Главной причиной этой аварии стало выполнение без скругления углов вырезов под холодильниками типа «кронштейн» и низкое качество сварных швов.

Аналогичная авария, но больших масштабов произошла на доменной печи объемом 2000 м³. Разрушение спровоцировала недостаточная величина компенсационного зазора между кладкой и холодильниками, а также работа печи при незаваренных трещинах в кожухе.

Известны случаи подъема мораторного кольца над колоннами горна и появление в них трещин. Величина подъемов колеблется от 2 до 30 мм, но иногда достигает 50 мм. Такой подъем начинается обычно вскоре после разогрева конструкций печи и приводит либо к разрыву болтов крепления колонны горна к кольцу при неправильном монтаже болтов, либо к повреждению кольца или колонны. Подъем кольца вызван тем, что кожух горна, а еще больше его плитовые холодильники, расширяясь при нагревании, поднимают лежащую на них кладку шахты. При недостаточном зазоре между ней и кожухом шахты кладка в свою очередь поднимает закрепленное к нему мораторное кольцо.

Анализ причин повреждений и аварий кожухов печей свидетельствует о том, что их работа не может рассматриваться в отрыве от технологических решений конструкций, условий эксплуатации, качества монтажа и ремонтов. Устранение причин, вызывающих повреждения кожухов, в основном, зависит от рациональности решений систем охлаждения, футеровки и других элементов технологических конструкций. В первую очередь это относится к обеспечению достаточной величины и деформативных свойств компенсационного слоя, предохраняющего кожух от воздействия кладки, защите металла от перегревов и ликвидации мест концентрации напряжений.

Классическим примером крупной аварии, связанной с отсутствием зазора между кладкой и кожухом шахты, как это было выполнено при капитальном ремонте II разряда, может служить разрыв кожуха одной из печей, чему в течение трех месяцев после пуска печи предшествовало появление трещин, ремонт которых не привел к стабильной работе кожуха печи.

Опасными дефектами являются также деформации кожуха – выпучины и вмятины, которые могут быть местными или проходить по всему периметру кольцевого сечения (рис. 16.1). Эти деформации вызваны перегревом металла части или всего периметра кожуха до полной или частичной потери несущей способности, когда кожух не в состоянии воспринимать вертикальную нагрузку и, деформируясь, «садится» с образованием волн. При этом нарушается работа оборудования, закрепленного к кожуху.

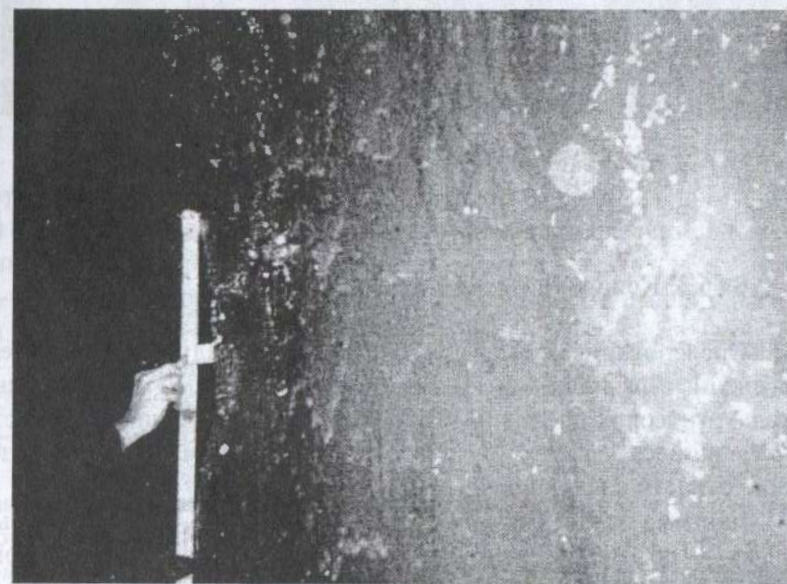


Рис. 16.1. Деформирование кожуха при перегреве

Перегрев кожуха купола доменной печи может также вызвать крен печи, наклон колонн шахты и колошниково-го копра, загрузочного устройства и т.п. На рис. 16.2 видны деформации

ремонтных стульчиков из-за просадки газоходов, связанной с перегревом купола печи и последующим ее наклоном.



Рис. 16.2. Деформации опорных стульчиков при наклоне кожуха

§ 16.3. Кожухи воздухонагревателей

Обследования большого числа кожухов воздухонагревателей, проведенные различными институтами и службами эксплуатации металлургических предприятий, позволили выявить наиболее часто встречающиеся дефекты и повреждения. К ним, прежде всего, можно отнести следующие:

- местные перегревы до температуры 350°C, а в отдельных случаях – до 700°C, чаще всего верхней части купола, района перехода от купольной к цилиндрической части, штуцеров горячего дутья и газовой горелки;
- депланации поверхностей листов до 5 – 9 мм вместо допустимых 0,1 толщины листов, но не более 3 мм;
- подрезы в сварных швах до 3 мм вместо допустимых 1 мм;
- вмятины, выпучины в местах пересечения стыковых швов;

- отступления поперечного сечения от круговой формы более допустимых значений;
- угловатости и западания в стыках до 20 мм вместо допустимых 5 мм;
- деформации и трещины в районах входа штуцеров в воздухонагреватели и в районе сопряжения цилиндрической части с днищем;
- разрывы анкеров и подъем днища до 120 – 150 мм.

Примерно 95% обследованных воздухонагревателей имели трещины или выпучины, перегревы, накладки и вставки неизвестного происхождения в районе штуцеров горячего дутья и газовых горелок, что вызвано некомпенсированными температурными перемещениями газо-воздухопроводов.

К причинам возникновения этих явлений можно отнести дефекты и повреждения футеровки и насадки, в том числе:

- вертикальные трещины поверхности кладки купола с раскрытием до 25 мм с распространением на верхнюю часть кольцевой кладки;
- деформации кладки купола – смещение в сторону;
- недостаточную величину компенсационных слоев, что в период разогрева приводит к большим распорным усилиям кладки на кожух и вертикальным усилиям, возникающим за счет сил трения и приводящим к разрывам анкеров;
- отклонение верхней части камеры горения в сторону насадки на 400 – 500 мм;
- деформации поверхности насадки со стрелкой прогиба 200 – 250 мм;
- зазор между насадкой и кольцевой кладкой 100 – 200 мм.

Прочность кожухов зависит от комплекса условий, связанных не только с конструктивной формой, но и с качеством монтажа, огнеупорных материалов и их компоновки, приемки, а также условий работы воздухонагревателей. Так, чаще всего перегревы связаны с нарушением целостности кладки (трещины, обрушения) и образованием пустот вблизи кожуха, куда попадают горячие газы и, циркулируя, создают устойчивую зону высоких температур. Применение в старых воздухонагревателях для компенсационных слоев засыпок приводит к их просыпанию, что

вызывает перегревы до покраснения кожуха, его деформации, особенно в верхней части агрегата.

Известны случаи разрушения воздухонагревателей в результате взрыва газовой среды внутри агрегата. Причины взрывов различны, но многие из них связаны с нарушениями правил испытаний или эксплуатации.

На рис. 16.3 показан воздухонагреватель после аварии в результате взрыва гремучей смеси, причиной образования которой стали нарушения в работе автоматического управления. Даже наличие бандажей не предотвратило столь глобальные разрушения.

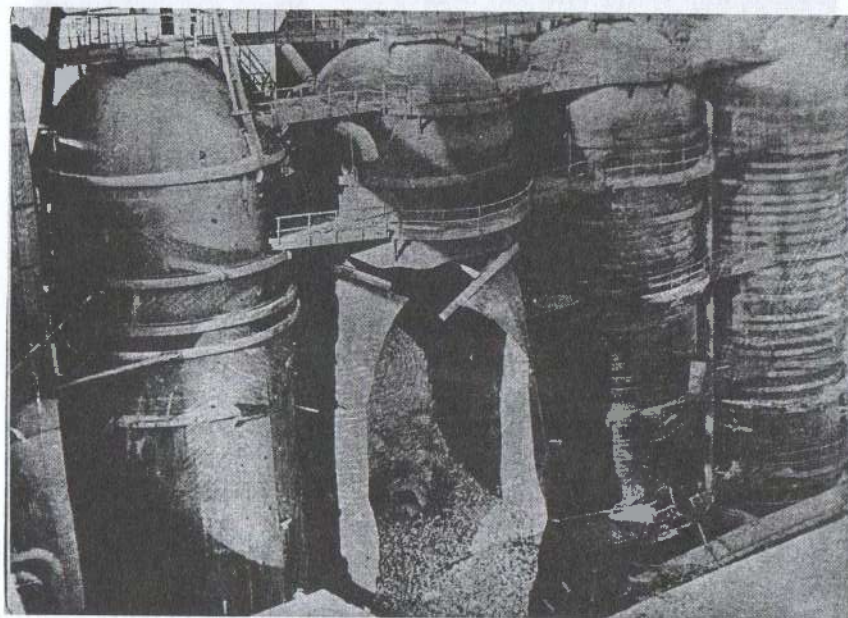


Рис. 16.3. Разрушение кожуха воздухонагревателя

На одном из заводов разрушился воздухонагреватель во время сдаточных испытаний внутренним давлением. В результате грубого нарушения правил испытания, требующих предварительного проветривания сосуда, из-за смещения подаваемого воздуха с остатками газа, несгоревшего во время осушения футеровки, образовалась гремучая смесь, что привело к взрыву.

Известна авария воздухонагревателя с выносной камерой горения оригинальной конструкции при попытке автоматизировать компенсацию температурных перемещений камер. Камера горения вверху соединялась с общим куполом и опиралась внизу на собственную отдельную опору. Для компенсации температурных перемещений в верхней и нижней ее частях были установлены сильфонные компенсаторы. Неуравновешенные усилия от внутреннего давления воздуха передавались через три продольные тяги, расположенные по окружности через 120° по образующим вдоль камеры горения и замыкающие оба компенсатора [74].

Во время испытания при внутреннем давлении 525 кПа внезапно, без признаков предаварийного состояния произошло разрушение одной из тяг и нижнего компенсатора, отрыв днища и обрушение со взрывом камеры горения. Предполагаемая схема развития аварийной ситуации показана на рис. 16.4.

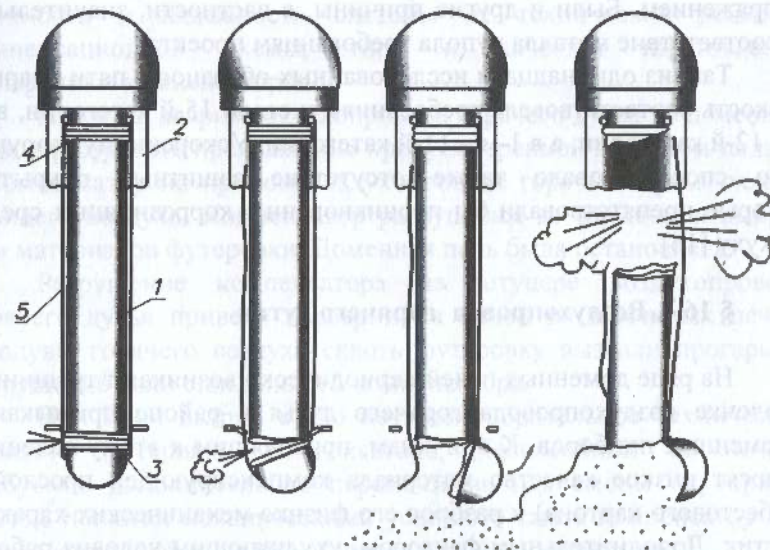


Рис. 16.4. Предполагаемая схема аварии воздухонагревателя:
1, 2 – камеры горения и насадки соответственно; 3 – тяги; 4, 5 – верхний и нижний компенсаторы соответственно

Наиболее вероятной технической причиной этой аварии стало разрушение нижнего компенсатора, находящегося при испытании в запредельном состоянии. Организационной причиной можно считать появившиеся при испытании собственные упругие деформации тяг, превышающие при этой их длине величину расчетной компенсирующей способности компенсаторов камеры горения. Способствовало аварии неудачное решение опорного узла тяг и низкое качество его выполнения.

Интенсификация технологических процессов и связанное с этим повышение температуры дутья и куполов воздухонагревателей приводят к их трещинообразованию, особенно в околошовных зонах.

После аварии купола воздухонагревателя с вынесенной камерой горения, произошедшей в январе 2008 г. на одной из печей большого объема в РФ, было установлено, что основной причиной появления трещин стало коррозионное растрескивание под напряжением. Были и другие причины, в частности, значительное несоответствие металла купола требованиям проекта.

Так, из одиннадцати исследованных образцов в пяти ударная вязкость соответствовала требованиям к стали 15-й категории, в 4-х – 12-й категории, а в 1-м – 11-й категории. Ускоренному разрушению способствовало также отсутствие защитных покрытий, которые препятствовали бы проникновению коррозионных сред к кожуху [16].

§ 16.4. Воздухопровод горячего дутья

На ряде доменных печей периодически возникают трещины в оболочке воздухопровода горячего дутья в районе примыкания фурменных приборов. К причинам, приводящим к этому явлению, относят низкое качество материала компенсирующей прослойки (асбестового картона) и разброс его физико-механических характеристик. Дополнительным фактором, ухудшающим условия работы оболочки, является отложение на ней слоя графита толщиной до 100 мм, что нарушает температурный режим конструкций, не давая охлаждаться поверхности трубы и создавая в ней дополнительные напряжения от температурного перепада по высоте сечения [34].

В некоторых случаях наблюдаются разрывы металла и в местах присоединения воздухопроводов к кожухам воздухонагревателей, а также в узлах примыкания их к кольцевому воздухопроводу. Основной причиной таких разрывов является стесненность как радиальных, так и направленных вдоль оси трубы температурных деформаций металла, а также дополнительные напряжения от веса конструкций при температурном росте воздухонагревателей и зависании в этом состоянии на нем воздухопроводов. Если радиальные деформации можно частично уменьшить путем понижения температуры металла за счет увеличения изоляции, то устранить остальные причины значительно сложнее. Единственным решением может быть понижение общей жесткости системы путем постановки компенсаторов, которые обеспечивали бы свободу деформации конструкций и предотвращали их чрезмерное смещение.

В связи с этим необходимо отметить прямую взаимосвязь прочности и надежности системы от технических решений компенсационной схемы, типа и качества изготовления фильфонных компенсаторов.

Известна авария воздухопровода горячего дутья на доменной печи в результате прекращения предусмотренной проектом подачи в компенсатор на прямом воздухопроводе горячего дутья охлаждающего воздуха. Компенсатор разрушился со взрывом и выбросом материалов футеровки. Доменная печь была остановлена.

Разрушение компенсатора на штуцере воздухопровода горячего дутья привело к аварии на одной из доменных печей. Продувыв горячего воздуха сквозь футеровку вызвали прогары и разрушение волн фильфонного компенсатора.

Причиной аварии стало неудовлетворительное техническое решение футеровки компенсатора, неспособной обеспечить требуемое дополнительное перемещение для смены «купорки». Частые попытки механическими усилиями сжать компенсатор для образования необходимого зазора усугубили положение.

Большую роль в системе воздухопровода горячего дутья с установленными компенсаторами играет схема передачи усилий от неуравновешенного внутреннего давления воздуха. На одной из доменных печей попытка передать их на неподвижные опоры, не

предусматривая специальные продольные элементы — тяги, привела к разрыву компенсатора, так как в процессе эксплуатации температурные перемещения нарушили систему закреплений воздухопровода к опорам.

§ 16.5. Колошниковые копры

Повреждения конструкций копров, как правило, вызваны двумя причинами — качеством изготовления и монтажа этих конструкций и работой технологического оборудования, в том числе и его динамическим воздействием. Наиболее часто наблюдаются появление трещин и разрушения ригелей рам копра, подбалансирных балок, узлов опирания колонн. Воздействия технологического оборудования, приводящие к этим повреждениям, связаны, прежде всего, с обрывом и падением конусов и контргрузов загрузочного устройства. Известны случаи когда конус «подлипает» к чаше и в натяжении троса контргруза появляется слабина. Внезапное опускание конуса выдергивает трос, что и вызывает ударное воздействие.

Зафиксированы случаи трещинообразования в подбалансирных балках в копрах доменных печей, работающих с принудительным опусканием конусов. Трещины были обнаружены в местах изменения сечения балок при расчетных напряжениях значительно ниже предельно допустимых. Указанное обстоятельство говорит о возникновении значительных динамических воздействий при обычной эксплуатации печи.

На одной из печей произошел взрыв образовавшейся гремучей смеси в межконусном пространстве из-за того, что не производилась подача пара между заполнением воздуха и газа. Ударная нагрузка при динамическом ударе балансиров на подбалансирные балки оказались в 6 — 8 раз больше статической.

Рассмотрение и анализ причин аварий и повреждений конструкций колошниковых копров позволил сделать вывод о том, что при надлежащем качестве изготовления и монтажа стальных конструкций основной причиной их повреждений является несинхронная работа технологического оборудования, приводящая к неформализованному динамическому эффекту.

§16.6. Пылеуловитель и нисходящие газоходы

Аварии и повреждения кожухов пылеуловителей бывают относительно редко. Причиной разрушения могут быть взрывы газовоздушной смеси внутри пылеуловителя. Так, на одной из доменных печей произошел взрыв из-за прекращения горения подаваемого для сушки коксового газа, в результате чего взорвалась образовавшаяся гремучая смесь. Был вырван нижний конус и разрушен верхний.

Чаше на кожухах пылеуловителей наблюдаются вмятины на участках по верху ребер, устанавливаемых на опорных колоннах. Их появление связано с взаимодействием опорных ребер и колонн, а также, с одной стороны, со стесненностью деформаций оболочки вблизи ребра, вызванной внутренним давлением газовой среды, и с другой — с передачей вертикальными ребрами горизонтальных реактивных сил на оболочку без опорного шпангоута.

Зафиксированных аварий нисходящих газопроводов немного. Причинами их является низкое качество сварных швов и непроектное увеличение массы отложений в газопроводе — цинкита или других. Известны также случаи аварий, вызванных образованием в корпусе пылеуловителя вакуума из-за подачи внутрь пара.

§ 16.7. Наклонные мосты

При нормальной эксплуатации наклонные мосты работают удовлетворительно и не создают условий для появления повреждений. Однако, возникающие зачастую вибрации конструкций мостов, несмотря на относительно невысокий уровень напряжений, могут приводить к нарушению прочности сварных швов крепления второстепенных элементов и отрыву лестниц. Основной причиной таких явлений бывает плохое состояние стыков рельсов и путей, требующих постоянного ухода и рихтовки.

При нарушениях технологических режимов эксплуатации, вызывающих резкое увеличение нагрузок — обрывы канатов и застревание скипов, сход их с рельсов, непроектная работа тяговых лебедок и т.п. — возникают серьезные разрушения конструкций, особенно на опорных балках шкивов, балках подшивных площадок, опорных узлах.

§ 16.8. Дефекты соединений

К дефектам сварных швов относятся нарушения формы, размеров, структуры, околошовной зоны, зоны сплавления и т.п.

Для известных сварочных процессов существуют общие дефекты сварных соединений, называемые «ординарными». Они оказывают существенное влияние на прочность конструкций и являются причиной более чем 22 % общего объема разрушений сварных конструкций. Чаще всего такими ординарными, типовыми дефектами сварных швов являются трещины, непровары, наплывы, подрезы, поры и шлаковые включения, показанные на рис. 16.5.

Подрезы располагаются вдоль краев сварных швов. Они образуются, главным образом, при чрезмерной силе или высоком напряжении сварочного тока, вследствие чего основной металл перегревается.

Несплавление по кромке представляет собой, по сути, острый «надрез», возникающий из-за плохой очистки кромок перед сваркой, некачественного выполнения работ.

Трещины в сварных швах и в основном металле возникают при низком качестве наплавки, значительной засоренности шва и в местах резкого изменения сечения. Внутренние «горячие» трещины появляются в результате неправильного режима сварки и остывания сварного шва. Неполномерные швы и чрезмерное «усиление» валика шва являются следствием некачественного выполнения работ.

Непровар – местное несплавление между швом и металлом или между слоями в случае многослойной сварки. Этот дефект может возникнуть вследствие плохой зачистки кромок шва, при чрезвычайно высокой скорости сварки или некачественном выполнении работ.

Шлаковые и газовые включения внутри сварного шва возникают при использовании некачественных сварочных материалов, при недостаточном зазоре между кромками, сварке на пониженной силе тока, нарушении технологии сварки или пониженных температурах.

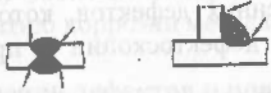
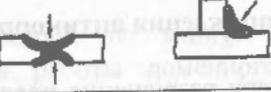
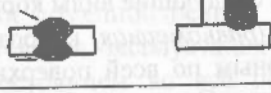
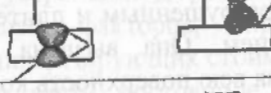
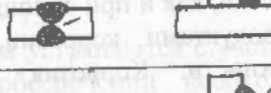
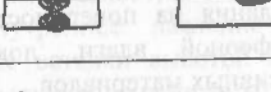
Дефект сварного шва	Вид дефекта
Подрез	
Неполномерные швы	
Чрезмерное усиление валика	
Несплавление по кромке	
Горячие трещины	
Непровар	
Шлаковые и газовые включения	

Рис. 16.5. Дефекты сварных швов

Прожоги, перерывы в швах, незаваренные кратеры связаны с некачественным выполнением работ.

Поры, свищи, подтеки и наплывы возникают из-за использования некачественных электродов или замусоривания шва во время сварки и при низком качестве сварочных материалов. Кроме того, наплывы могут образовываться при вытекании наплавленного металла из ванны на холодный основной металл.

Внешние дефекты сварных швов определяются с помощью лупы во время детального осмотра очищенного от краски шва. Неровная поверхность шва и его темный цвет свидетельствуют о наличии внутренних дефектов, которые выявляются с помощью ультразвуковой дефектоскопии и просвечивания проникающими излучениями

§ 16.9. Повреждения антикоррозионного покрытия

По характеру разрушения поверхности металлоконструкций можно выделить следующие виды коррозии.

Сплошная (равномерная) коррозия — характеризуется относительно равномерным по всей поверхности уменьшением толщины сечения элемента. Сплошная коррозия обычно встречается на конструкциях с разрушенным и длительное время не восстанавливаемым покрытием. Она вызвана равномерным воздействием внешней среды на всю поверхность конструкции.

Местная или локальная (пятнами) коррозия — сосредоточена на отдельных участках поверхности металла. Характеризуется небольшой глубиной проникновения по сравнению с поперечными (в поверхности) размерами коррозионных повреждений. Пораженные участки, как и при сплошной коррозии, поражаются и покрываются продуктами коррозии, но лишь на локальных участках поверхности. Коррозия пятнами обычно вызвана повышением агрессивности среды на локальных участках вследствие попадания на поверхность конструкции конденсата, кислоты, атмосферной влаги, локального накопления или отложения агрессивных материалов.

Язвенная коррозия — вид коррозии, характеризующийся появлением на поверхности конструкции повреждений, глубина и поперечные размеры которых соизмеримы.

Местная или язвенная коррозия может развиваться под слоем защитного покрытия. Это наиболее опасный вид коррозии, так как ее развитие может приводить к достаточно быстрому уменьшению площади сечения элемента на локальном участке. При этом повреждения незаметны и общее внешнее состояние антикоррозионного покрытия остается удовлетворительным.

При старении слоя лакокрасочного покрытия происходят необратимые изменения его защитных и физико-механических свойств. Снижение защитных свойств лакокрасочного покрытия приводит к появлению и развитию коррозии металла.

§ 16.10. Методы устранения дефектов и повреждений

К основным конструкциям, во многом определяющим надежность и безотказность работы доменного комплекса и находящимся в наиболее сложных условиях эксплуатации, прежде всего следует отнести кожухи доменной печи и воздухонагревателей. Их безаварийная длительная эксплуатация обеспечивается надлежащим техническим состоянием во все периоды работы. Своевременное выявление и устранение дефектов и повреждений является одним из основных факторов, определяющих их надежную эксплуатацию и минимизирующих стоимость ремонта.

Для этого необходимо вести постоянное наблюдение за состоянием кожухов, выполнять систематические профилактические осмотры с определением мест возможных зарождений трещин и их развития, выпучин, вмятин, перегревов, нарушений работы системы охлаждения, повреждений футеровки, возникновения коррозии поверхности и т.п.

Дефекты и повреждения устраняются с учетом приведенных ниже рекомендаций при обеспечении необходимых условий охраны труда и техники безопасности. Так, при работе на действующих агрегатах внутреннее давление снижается до атмосферного, при установке вставки высотой более 400 мм в кожухе печи шихта должна быть опущена ниже этой вставки.

Устранение дефектов и повреждений может производиться следующим образом:

- подрезы основного металла глубиной до 2 мм завариваются тонким электродом с последующей зачисткой, обеспечивающей плавный переход от основного металла к наплавленному;
- подрезы основного металла глубиной более 2 мм завариваются с предварительной разделкой кромок;
- незаваренные кратеры разделяются и завариваются;

– вырывы основного металла, возникшие при демонтаже приваренных временных деталей, удаляются заваркой с последующей зачисткой;

– деформации величиной 4 мм или до 6 мм на длине до 300 мм ликвидируются наплавкой с созданием плавного перехода с последующей зачисткой. Длина перехода должна составлять не менее пяти величин деформации. Деформации больше указанных величин устраняются путем вырезки этого места и установки вставки;

– трещина может быть заварена при отсутствии деформации кромок трещины при ее величине не более 3 мм или 0,1 толщины листа и при ширине ее раскрытия 5 мм для кожуха воздухонагревателя и 15 мм для кожуха печи. Длина трещины не должна превышать 800 мм для кожуха воздухонагревателя и 1500 мм для кожуха печи. При больших размерах трещины поврежденный участок кожуха необходимо вырезать, отступив от концов трещины не менее чем на 150 мм и установить вставку;

– выпучины и вмятины при стрелке на длине шаблона 1500 мм более 30 мм для кожуха воздухонагревателя и 40 мм для кожуха печи ликвидируются путем вырезки и установки вставки.

Для уменьшения деформаций листов кожуха от сварки минимальный размер вставки не должен быть меньше 500 мм для кожухов доменных печей и не менее 300 мм для кожухов воздухонагревателей, воздухопроводов горячего и холодного дутья. Все вставки выполняются с закругленными углами. Величины радиусов скругления углов вставок приведены в таблице 16.4 и должны быть не менее 100–200 мм.

С целью обеспечения проектной круговой формы поперечного сечения оболочки после заваривания вставки радиус вальцовки вставки должен быть меньше проектного с таким расчетом, чтобы после сварки вертикальных стыков вставки и их усадки ее радиус стал проектным.

Сначала завариваются вертикальные швы, а затем горизонтальные.

Таблица 16.4

Радиус скругления углов прямоугольной вставки

Размер наибольшей стороны вставки, мм	До 1000	Свыше 1000
Радиус скругления углов, мм	100 – 150	150 – 200

При выполнении реза под вставку необходимо соблюдать следующие условия:

- расстояние от линии реза до патрубков и отверстий должно быть не менее 150 мм;
- расстояние до существующего шва должно составлять 5 толщин листа, но не менее 200 мм;
- кромки реза обработать наждачными кругами;
- при совпадении реза под вставку со старым швом полностью удалить старый наплавленный металл.

В случае возможности вставки трещины завариваются с внешней и внутренней сторон. При невозможности (при повреждении, возникшем во время эксплуатации и недоступности внутренней стороны) – допускается односторонняя сварка на остающейся технологической подкладке.

Процесс сварки должен обеспечивать минимальные и равномерные тепловложения с целью исключения несимметричных деформаций и, соответственно, высоких сварочных напряжений. Для этого сварка должна производиться обратноступенчатым или иным специально разработанным способом.

Большое значение также имеют выбранный режим сварки и количество наплаваемых слоев. При высокой силе тока или при малом количестве наплаваемых слоев качество шва и, соответственно, его прочность снижаются. В таблице 16.5 наведено рекомендованное количество наплаваемых слоев для разной толщины свариваемого металла. При этом первые два слоя накладывают электродом диаметром 4 мм, последующие – 5 мм.

Усиление швов заварки трещин установкой поперечных ребер или других элементов не обеспечивает необходимую прочность и надежность конструкции и не должно применяться.

На рис.16.6–16.10 показаны основные схемы ремонта участков кожуха с трещинами [24].

Методы ремонта зависят от параметров трещины – величины ее раскрытия и протяженности, а также от места расположения.

Таблица 16.5

Количество наплаваемых слоев в шве в зависимости
от толщины свариваемого металла

Вид соединения	Положение шва в пространстве	Толщина металла, мм	Количество слоев с одной стороны
Стыковое V-образное	Горизонтальное	10 – 14	2 – 3
		16 – 18	4 – 5
		20 – 24	5 – 6
		26 – 30	6 – 7
		34 – 40	8 – 12
		45 – 50	15 – 18
Стыковое К-образное	Горизонтальное	55 – 60	20 – 23
		14 – 16	3 – 4
		18 – 20	4 – 5
		22 – 24	5 – 6
		26 – 28	5 – 6
		30 – 32	6 – 7
Стыковое Х-образное	Вертикальное	34 – 40	7 – 10
		45 – 50	12 – 15
		55 – 60	17 – 20
Стыковое V-образное	Нижнее и вертикальное	22 – 24	5 – 6
		26 – 28	6 – 7
		30 – 32	7 – 8
		34 – 40	8 – 10
		45 – 50	12 – 16
		55 – 60	18 – 21
Стыковое V-образное	Нижнее и вертикальное	4 – 8	1 – 2
		10 – 14	2 – 3
		16 – 18	3 – 4
		20 – 24	6 – 8
		26 – 30	8 – 10
		34 – 40	12 – 14
Стыковое V-образное	Нижнее и вертикальное	45 – 50	17 – 20
		55 – 60	23 – 25

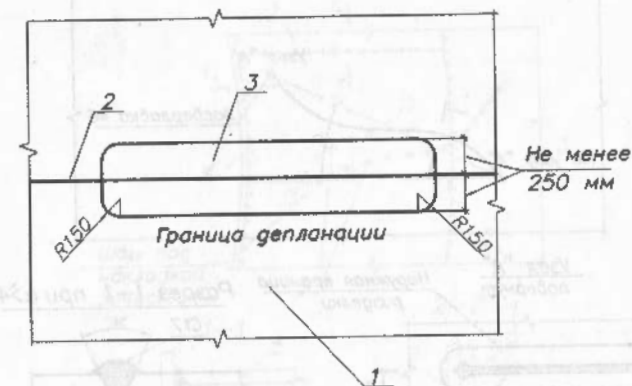


Рис. 16.6. Схема выреза в коже при депланации в стыке:
1 – лист кожи; 2 – сварной стыковой шов; 3 – вырез под вставку

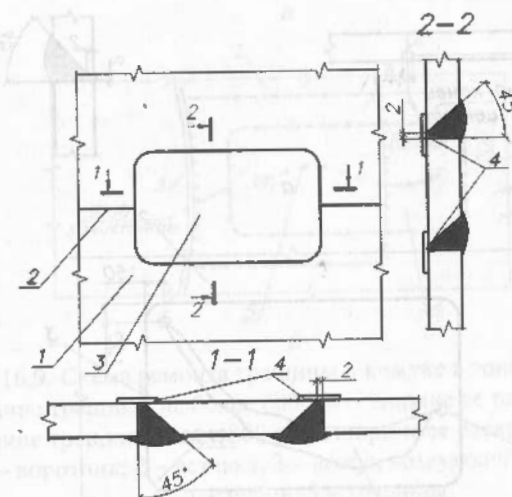


Рис. 16.7. Схема установки вставки:
1 – лист кожи; 2 – сварной стыковой шов; 3 – лист вставки;
4 – технологические подкладки

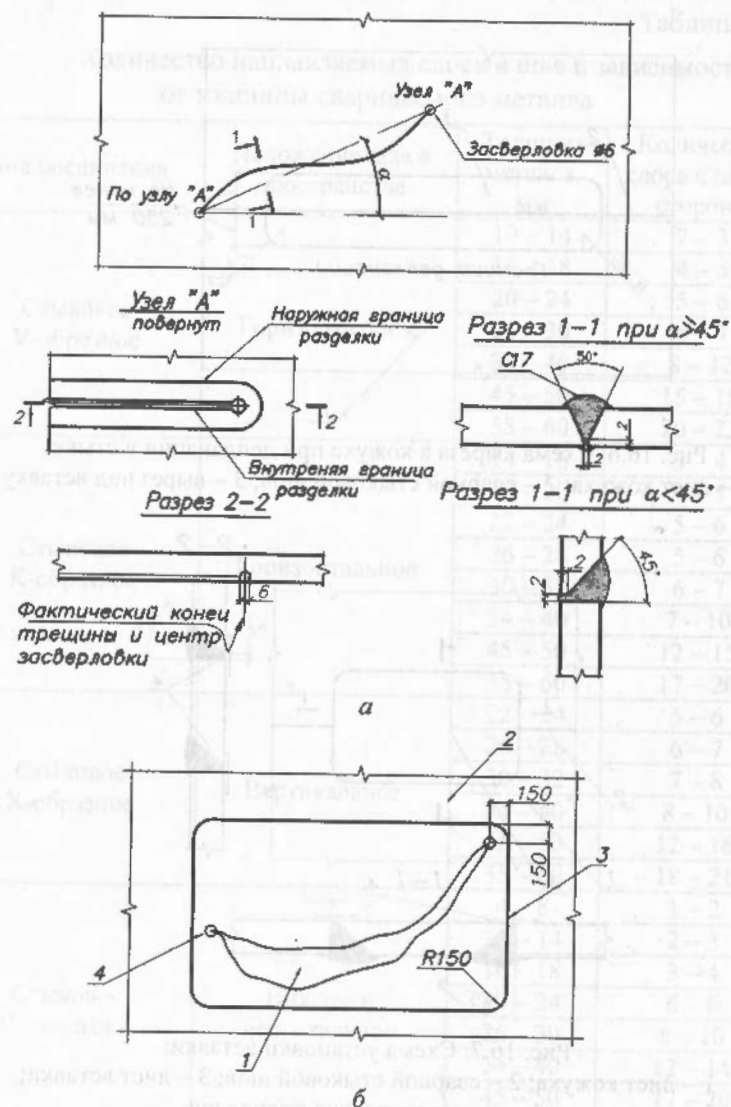


Рис. 16.8. Схема ремонта трещины в кожухе вне штуцеров:
 а – при длине трещины не более 800 мм и ширине ее раскрытия до 5 мм;
 б – при длине трещины более 800 мм и ширине ее раскрытия более 5 мм;
 1 – трещина; 2 – кожух; 3 – границы выреза;
 4 – засверливание концов трещины

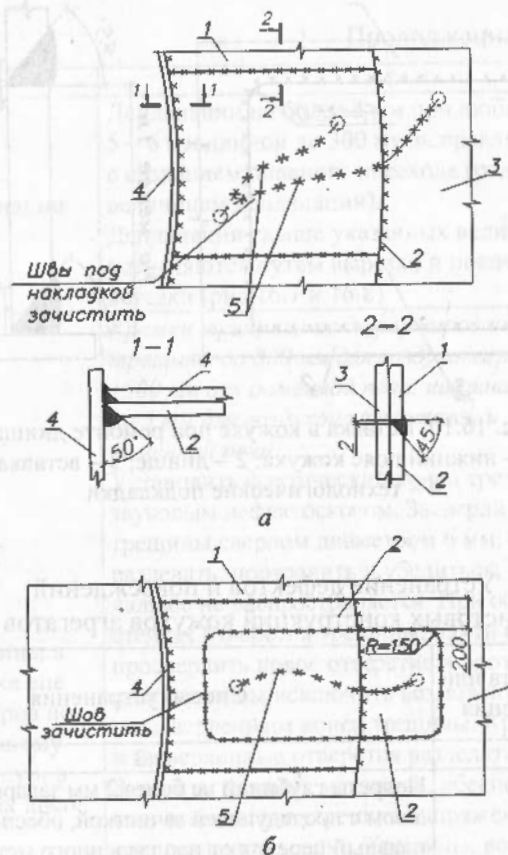


Рис. 16.9. Схема ремонта трещины в кожухе в зоне штуцеров:
 а – при длине трещины не более 800 мм и ширине ее раскрытия до 5 мм;
 б – при длине трещины более 800 мм и ширине ее раскрытия более 5 мм;
 1 – воротник; 2 – вставка; 3 – кожух воздухоподогревателя;
 4 – патрубков; 5 – трещины

В таблице 16.6 приведен перечень основных дефектов и повреждений листовых конструкций кожухов агрегатов и даны краткие рекомендации по их устранению.

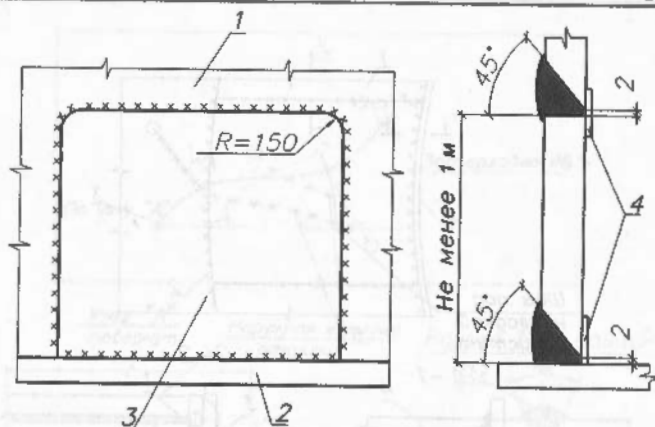


Рис. 16.10. Вставка в кожухе при ремонте днища:
1 – нижний пояс кожуха; 2 – днище; 3 – вставка;
4 – технологические подкладки

Таблица 16.6

Устранение дефектов и повреждений
листовых конструкций кожухов агрегатов

№ п/п	Вид дефекта или повреждения	Способ устранения
1	2	3
1	Подрезы основного металла в зоне сварных швов	Подрезы глубиной не более 2 мм заварить тонким швом с последующей зачисткой, обеспечивающей плавный переход от наплавленного металла к сварному. Подрезы глубиной более 2 мм заварить, предварительно разделив кромки по всей длине подреза. Перед сваркой зачистить до металлического блеска поверхность подреза и прилегающую к нему зону шириной не менее 20 мм
2	Подрезы основного металла вне зоны сварных швов	Подрезы и вырывы в основном металле разделить и заварить с последующей зачисткой таких мест заподлицо с основным металлом
3	Незаваренные кратеры	Разделить кромки кратера и заварить

Продолжение таблицы 16.6

1	2	3
4	Депланации	Депланации не более 4 мм при любой ее длине и 5 – 6 мм длиной до 300 мм исправлять наплавкой, с созданием плавного перехода (равного пяти величинам депланации). Депланации свыше указанных величин устраняются путем вырезки и последующей вставки (рис. 16.7 и 16.8)
5	Трещины в кожухе вне штуцеров по основному металлу и в сварных швах	Кромки трещины не деформированы, длина трещины до 800 мм для воздухонагревателей и 1500 мм для доменной печи, ширина раскрытия до 5 мм для воздухонагревателей и 15 мм для доменной печи. Установить фактический конец трещины ультразвуковым дефектоскопом. Засверлить концы трещины сверлом диаметром 6 мм. Отверстие разделить, протравить и убедиться, что трещина дальше не распространяется. При обнаружении на стенках отверстия трещины, найти ее конец, просверлить новое отверстие и протравить его стенки, чтобы исключить возможность сохранения незасверленным конц трещины. Кромки трещины и засверленные отверстия разделить (рис. 16.9). Заварить трещину методами, обеспечивающими минимальные внутренние напряжения в шве и минимальную усадку. Трещины, возникшие в период эксплуатации, допускается заваривать без подварки корня шва изнутри воздухонагревателя. При первом капитальном ремонте кладки необходимо разобрать ее в районе этих трещин, вырубить и заварить корень шва. Кромки трещины деформированы, длина и раскрытие больше указанных размеров. Вырезать участок с трещиной (рис. 16.10). Выполнить вставку (рис. 16.8)

Продолжение таблицы 16.6

1	2	3
6	Трещины в кожухе возле штуцеров и люков по основному металлу и в сварных швах	Длина трещины до 800 мм, ширина раскрытия до 5 мм. Вырубить, не повреждая основной металл, часть воротника, прилегающую к трещине, найти и засверлить ее концы, заварить трещину (рис. 16.9) и восстановить вырубленную часть воротника (рис. 16.11) Кромки трещины деформированы, длина более 800 мм, ширина раскрытия более 5 мм. Вырубить, не повреждая основной металл, часть воротника, прилегающую к трещине, найти и засверлить ее концы, заварить трещину (рис. 16.10) и восстановить вырубленную часть воротника (рис. 16.12)
7	Заваренные трещины	Если трещины заварены без засверливания концов или без разделки кромок, а также при отсутствии документов на их заварку, необходимо нанести их на чертеж развертки кожуха и вести постоянное наблюдение. При возникновении трещины после ее двукратной заварки, вырезать поврежденный участок кожуха и выполнить вставку (рис. 16.9 и 16.10)
8	Накладки неизвестного происхождения	Накладки площадью до 1 м ² сохранить и вести систематическое наблюдение. Проверить качество приварки накладки и устранить обнаруженные дефекты. Накладки площадью более 1 м ² срубить и устранить под ними дефекты в соответствии с настоящими рекомендациями
9	Вставки неизвестного происхождения	Проверить наличие подварки корня шва и его качество. Вставки размером более 2 м ² , вваренные без подварки корня шва, вырезать и выполнить новые (рис. 16.8). За вставками площадью меньше или равной 2 м ² после ликвидации дефектов сварки установить систематическое наблюдение

Окончание таблицы 16.6

1	2	3
10	Выпучины и вмятины	Вмятины и выпучины, измеренные шаблоном длиной 1,5 м, при величине стрелки до 30 мм необходимо нанести на чертеж развертки кожуха воздухонагревателя и установить систематическое наблюдение, размером свыше 30 мм – ликвидировать путем вырезки и вставки (рис. 16.7 и 16.8)
11	Перегретые участки кожуха	За перегретыми участками кожуха, определяемыми по изменению цвета металла, установить наблюдение. При появлении трещин участки вырезать и выполнить вставки (рис. 16.8)
12	Трещины в днище	Доступ к трещине организуется путем вырезки цилиндрической части кожуха (высотой не менее 1 м) и разборки соответствующей части кладки. Заварку трещин производить в соответствии с п.6, но без подварки корня шва. Возможна также замена части днища со сваркой встык на остающейся подкладке. Вырез в цилиндрической части кожуха может быть произведен не более чем одной шестой части периметра кожуха. При большей протяженности трещины необходимо производить несколько последовательных вырезов кожуха с таким расчетом, чтобы каждому вырезу предшествовало восстановление ранее вырезанной части. Взамен вырезанных участков выполняются вставки (рис. 16.13). Между вырезами следует оставлять перемычки размером не менее 500 мм. Перед началом ремонта обеспечить подливку между фундаментом и доньшком. При необходимости после полного разогрева воздухонагревателя подлить зазор быстротвердеющим, расширяющимся цементом и затем затянуть или приварить анкеры

§ 16.11. Расследование и установление причин аварий металлоконструкций

В соответствии с ДБН В.1.2-1-95 авария – это чрезвычайное событие, происходящее по техногенным (конструктивным, производственным, технологическим, эксплуатационным) причинам или в результате случайных внешних воздействий и заключающееся в повреждении, выходе из строя, разрушении технических устройств, зданий и сооружений, их частей и конструктивных элементов.

Целью работ по расследованию аварий металлоконструкций сооружений комплекса доменной печи является установление вероятных причин произошедшей аварии, предупреждение дальнейшего разрушения и разработка мероприятий по ликвидации последствий аварии и восстановлению обрушенных конструкций.

Возможные причины аварий можно разделить на две категории:

- **организационные** – это явления или действия, которые привели к возникновению условий для повреждения конструкций, приведших, в свою очередь, к аварийной ситуации: дефекты изготовления и монтажа, нарушения со стороны технического персонала, ремонтных служб, недоработки проектных решений или технологических схем, отказ оборудования, форс-мажорные обстоятельства;
- **технические** – это первичное повреждение конструкций, вызвавшее общее нарушение прочности и разрушение сооружения или его части.

При расследовании аварий установление организационной причины является основным выводом, на основании которого проводится ремонт и восстановление конструкций, а также исключаются в дальнейшем подобные ситуации.

Работы по установлению причин аварий включают:

- выяснение обстоятельств аварии;
- ознакомление с технической документацией;
- уточнение режимов эксплуатации, фактических нагрузок, климатических условий до и в момент аварии;
- определение состояния конструкций и имевших место повреждений до аварии;

- установление характеристик и фактических марок сталей разрушившихся металлоконструкций;
- обследование конструкций, подвергшихся аварии или пришедших в аварийное состояние;
- выполнение поверочных расчетов аварийных конструкций на действие фактических нагрузок, существовавших до и во время аварии;

- разработка достоверных версий относительно причин аварии.

Работы по установлению причин аварии включают также сбор следующей информации:

- характеристика режимов работы агрегатов за весь период эксплуатации, включая количество и качество поступающего сырья и выпускаемой продукции;
- характеристика дутьевого и температурного режимов, системы охлаждения и т.п.;
- определение характера и объемов дополнительных исследований, необходимых для обоснования выводов.

Как правило, это проверка качества стали в месте разрушения; определение характера ее разрушения (вязкое, хрупкое, наличие застаревших трещин, в т.ч. и несквозных) и воздействия коррозии, наличия шевронных узоров в местах разрушения и т.п.; определение качества сварных соединений, особенно в местах разрывов; анализ материалов футеровки и состава газов; выявление возможности образования отложений и их характеристик; проверка режимов работы оборудования; анализ возможности образования взрывоопасных и самовозгорающихся веществ, вибрационных и динамических воздействий, а также стабильности работы системы охлаждения; определение возможности локальных разрушений теплоизоляции и перегревов металла.

На основании данных материалов разрабатывается заключение технической экспертизы, являющееся основой общего заключения. При этом весьма важно установить связь между предполагаемыми причинами аварии или аварийной ситуации и видом первоначального разрушения.

При большом объеме разрушений должны быть определены наиболее вероятные повреждения или деформации конструкции, которые явились технической причиной аварии.

К наиболее часто встречающимся организационным причинам аварий металлоконструкций относятся следующие:

- низкое качество стали или несоответствие ее требованиям проекта;
- дефекты металлопроката;
- ошибки проектов КМ, КМД и ППР;
- дефекты изготовления конструкций;
- повреждения или обрушения футеровки;
- отказы или нарушения в работе системы охлаждения;
- дефекты монтажа или проведения ремонтных работ;
- установка технологического оборудования, не соответствующего предусмотренному проектом;
- нарушения технологического процесса службой эксплуатации.

Достаточно часто в доменном производстве происходят прорывы жидких продуктов плавки в доменной печи, разрывы сосудов, работающих под воздействием внутреннего давления воздуха и доменных газов, повреждения и разрушения воздухонагревателей, воздухопроводов горячего дутья, повреждения агрегатов газоочистки, связанные с нарушениями правил эксплуатации и др., что приводит к значительным разрушениям металлических конструкций.

Прорывы жидкого металла случаются в зоне металлоприемника горна доменной печи, причем чаще всего в районах чугунных леток, что объясняется активным постоянным воздействием на футеровку выпускаемых через летку продуктов доменной плавки. Жидкий чугун, проникший через разрушенную футеровку горна, вступает в контакт с металлом холодильников и кожуха, расплавляет их и выходит наружу. При соприкосновении чугуна с водой происходит взрыв, влекущий за собой дополнительные разрушения.

При разрыве и раскрытии кожуха происходит выброс в образовавшийся проем материалов шихты, а в отдельных случаях и продуктов плавки, что приводит к значительному разрушению конструкций печи обычно в зонах шахты и горна. Выброшенные из печи материалы разрушают или деформируют с потерей прочности ее несущие колонны, стойки, ригели и связи здания доменной печи, площадки печи, кольцевой воздухопровод горячего дутья и др.

Аварии с прорывами чугуна часто происходят после капитальных ремонтов II разряда, проводимых без выпуска скопившегося в объеме разгара лещади чугуна – так называемого «козла». После такой аварии обычно выполняют восстановительные работы в объеме капитального ремонта второго разряда.

Разрушения воздухонагревателей зачастую происходят из-за неудачной конструкции футеровки, неконтролируемых повторных разогревов, а в некоторых случаях из-за образования взрывоопасной газовой смеси. Воздухонагреватели, эксплуатируемые в условиях низких зимних температур, имеют более высокую вероятность разрушения.

Повреждения воздухопровода горячего дутья чаще всего наблюдаются в узлах сопряжения прямого воздухопровода со штуцерами, с кожухами воздухонагревателей, а также в местах установки компенсаторов.

ГЛАВА 17 УСИЛЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ СООРУЖЕНИЙ ДОМЕННОГО КОМПЛЕКСА

§ 17.1. Основные принципы усиления конструкций

Усиление конструкций сооружений доменного комплекса, как правило, выполняют при: физическом износе конструкций и необходимости, при этом, их дальнейшей эксплуатации; планируемом повышении эксплуатационных параметров работы эксплуатируемых конструкций, а также при реконструкции с одновременным повышением эксплуатационных параметров.

Конструктивное решение усиления конструкций зависит от причины, вызвавшей ее необходимость. Одновременно с усилением могут быть приняты меры по изменению условий эксплуатации конструкций, ограничению нагрузок.

Во всех случаях усиление конструкций эффективнее сноса существующих и строительства новых сооружений, особенно для доменных цехов, где из-за простоя агрегатов в период реконструкции или строительства сокращается объем выпускаемой продукции.

В комплексе доменного цеха наибольшему физическому износу обычно подвержены листовые конструкции кожухов доменных печей, воздухонагревателей, пылеуловителей, сосудов газоочистки, газо-воздухопроводов, так как они находятся в наиболее сложных условиях эксплуатации и быстрее других конструкций приходят в состояние значительного, а в ряде случаев аварийного износа и полной деградации.

Кроме того, повышение эксплуатационных параметров — температуры и давления дутья — потребовало обеспечения необходимой прочности кожухов технологических агрегатов. Проблема осложняется тем, что их замена или ремонт относится к разряду довольно трудоемких процессов, всегда связанных с остановкой доменной печи или, в крайнем случае, значительным понижением на этот период технологических параметров. Поэтому разработка и выбор рационального способа усиления этих конструкций во многом определяет надежную длительную эксплуатацию всего комплекса печи.

Усиление кожухов сосудов и других конструкций комплекса выполняют в проектном положении конструкций и оно связано с большим количеством верхолазных монтажных работ, зачастую в труднодоступных местах. Такие работы сопряжены обычно с большими затратами труда и материальных средств, требуют частичной или полной остановки печи или ее агрегатов, связанных общим технологическим процессом. Поэтому одним из критериев выбора способа усиления является сведение к минимуму времени этих частичных или полных остановок.

Принятый способ усиления должен обеспечивать надежную дальнейшую эксплуатацию сооружения на заданных технологических параметрах с применением наиболее эффективных технологических методов производства работ, а также минимальные сроки полной или частичной остановки агрегатов.

§ 17.2. Усиление листовых конструкций

Усиление листовых конструкций — кожухов агрегатов, газо-воздухопроводов и т.п. — является достаточно сложной задачей и требует неординарных приемов и технических решений.

Кожух доменной печи практически не подлежит усилению. Увеличить его несущую способность для работы в условиях повышенных параметров давления и температуры дутья или для других целей нельзя, так как на поверхности кожуха как технологического агрегата расположены трубопроводы, оборудование, проемы, выводы труб из холодильников и установить дополнительные, усиливающие конструкцию элементы невозможно.

Усиление может иметь место лишь с целью продления кампании печи до ближайшего капитального ремонта, в частности, путем уменьшения вертикальных нагрузок на кожух печи и снижения, тем самым, усилий, вызывающих деформирование перегретых его участков, что позволяет лишь избежать развития дальнейших деформаций и перекосов кожуха.

Для этого кожух печи необходимо разгрузить от вертикальных нагрузок с самого верха печи или, как минимум, от нагрузок, приложенных выше перегретого участка кожуха. Конструктивно это может быть решено различными путями, один

из которых — это исключение нагрузки на купол печи от вертикальных газопроводов грязного газа вместе с опирающимися на них конструкциями и передачи общей нагрузки на балки колошниковой площадки. Для этого могут быть использованы конструкции, предназначенные для переопирания газопроводов грязного газа на балки колошниковой площадки при ремонте или замене кожуха шахты (см. рис. 3.17).

Как уже отмечалось, в период нормальной эксплуатации печи газопроводы опираются на купол с сохранением предусмотренного проектом зазора между газопроводами и балками. При возникновении нештатной ситуации, повлекшей за собой просадку или перекося кожуха печи, зазор заполняется прокладками до полного обеспечения опирания газопроводов, что исключает передачу нагрузок на купол печи.

Если зазор оказался недостаточным и был полностью выбран при просадке кожуха шахты, то возможна установка дополнительных опорных элементов, предотвращающих дальнейшую передачу нагрузок от газопроводов на кожух печи.

В такой ситуации может быть эффективной также разгрузка кожуха печи от веса холодильников и другого расположенного на нем оборудования путем устройства подвесных опорных элементов, передающих нагрузки от кожуха на колонны (см. рис. 18.11). Ниже перегретой зоны располагают опорную кольцевую балку, к которой прикрепляют растянутые элементы — подвески, закрепленные к колоннам. При этом должно быть обеспечено восприятие колоннами горизонтальных составляющих от усилий в подвесках или устроена кольцевая система связей.

В несколько ином положении находится кожух воздухонагревателя. Его поверхность практически свободна от технологического оборудования и позволяет расположить на нем элементы усиления. Простейшим способом его усиления является так называемое «окожушивание», т.е. установка на существующий кожух, вплотную к нему, нового кожуха или отдельного его участка (рис. 17.1). При этом техническое состояние существующего кожуха не имеет существенного значения. Возможно укрупнение листов перед установкой и последующая их сварка с использованием старого кожуха в качестве технологического

основания. Этот способ имеет два существенных недостатка, а именно:

- необходима длительная, на весь период усиления остановка агрегата, так как в соответствии с правилами техники безопасности вести монтажные и сварочные работы на действующем агрегате не разрешается;

- довольно сложно осуществить вальцовку листов кожуха необходимой геометрической формы и обеспечить их плотное по всей поверхности прилегание к существующему кожуху. Исходя из этого, с точки зрения прочности новый кожух проектируется без учета существующего с устройством стыковых швов на технологических подкладках. Такой метод позволяет без дополнительных затрат получить вполне надежную и долговечную конструкцию.

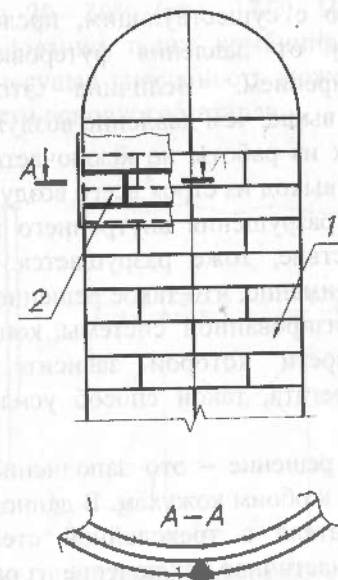


Рис. 17.1. Окожушивание кожуха воздухонагревателя:
1 — существующий кожух; 2 — листы усиления

Указанные недостатки можно достаточно просто устранить при устройстве дополнительного кожуха с некоторым зазором от

существующего. При этом не требуется останавливать агрегат на весь период усиления, а для формы нового кожуха не обязательно условие идентичности ее существующему.

Новый кожух включается в работу различными способами в зависимости от заполнения образовавшегося между кожухами зазора. В частности, зазор может быть заполнен воздухом, подаваемым из воздухопровода холодного дутья. При этом в зазоре создается активное давление, которое разгружает существующий кожух от нагрузки внутренним давлением воздуха. Такой способ усиления предполагает удовлетворительное состояние внутреннего кожуха, способного обеспечить его заданную прочность и надежную герметичность.

Однако полностью проблему усиления этот способ не решает. Дело в том, что при устройстве дополнительного кожуха, не связанного жестко с существующим, последний продолжает испытывать нагрузку от давления футеровки, вызванной ее термическим расширением. Величина этого давления в большинстве случаев выше, чем давление воздуха. Таким образом, существующий кожух из работы не исключается и выход его из строя влечет за собой выход из строя всего воздухонагревателя, так как кладка в случае разрушения внутреннего кожуха, теряя его обжимающее воздействие, тоже разрушается. Учитывая это, а также принимая во внимание, что такое решение требует создания специальной автоматизированной системы контроля за подачей воздуха, от надежности которой зависит эксплуатационная надежность всего агрегата, такой способ усиления не является эффективным.

Есть еще одно решение – это заполнение зазора бетоном, плотно примыкающим к обоим кожухам. В данном случае создается кожух воздухонагревателя с трехслойной стенкой, в котором возможно полное или частичное исключение из работы внутреннего кожуха. При такой конструкции состояние внутреннего кожуха не имеет существенного значения. Это обстоятельство, а также исключение дополнительных автоматических устройств делают этот способ весьма перспективным. Преимущества его заключается в том, что внутренний кожух выполняет функции газоплотной

оболочки, препятствующей проникновению к наружному кожуху агрессивных газов, вызывающих межкристаллитную коррозию.

Однако, несмотря на видимые положительные качества усиления путем устройства дополнительного кожуха, эти технические решения не нашли применения из-за трудностей их реализации.

В ряде случаев слабыми оказываются стыковые соединения листов, например в старых, но еще эксплуатируемых клепаных воздухонагревателях. Нередко именно прочностные качества стыка сдерживают увеличение эксплуатационных режимов. Усилить такие стыки можно приваркой встык по всей наружной кромке листа нахлесточной полосы, противоположный край которой приварен к поверхности кожуха. С целью увеличения длины этого шва его край выполняют волнистым, что позволяет получить прирост длины на 20–30% (рис. 17.2). Проведенные экспериментальные исследования таких комбинированных соединений показали, что их несущая способность может быть приравнена к несущей способности основного металла.

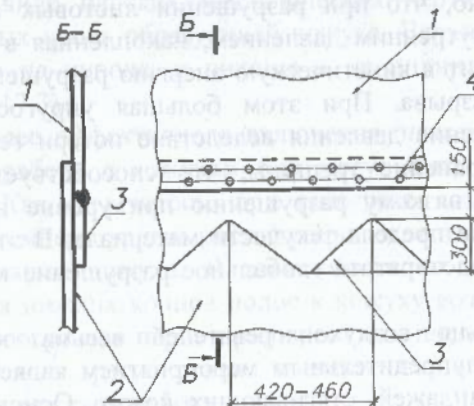


Рис. 17.2. Усиление клепаных стыков:

1, 2 – стыкуемые листы; 3 – сварной шов; 4 – существующие заклепки

При длительном сроке эксплуатации воздухонагревателей, особенно построенных до 70-х годов прошлого века, в днище при повторных разогревах возникают трещины из-за термического роста футеровки. Они нарушают нормальный режим работы

агрегата и могут стать причиной разрушения кожуха. При эксплуатации под давлением через эти трещины проникают газ и воздух. Ремонт их очень сложен из-за затрудненного доступа.

Указанные способы усиления кожухов не решают задачу усиления днища, которое остается слабым местом в конструкции. Замена днищ сложна, практически неосуществима, а ремонт и устранение продувов чрезвычайно трудоемкий процесс. Поэтому при капитальном ремонте воздухонагревателя возможно усиление днища с целью обеспечения газоплотности путем установки на него дополнительного тонкостенного поддона (см. рис. 4.15).

§ 17.3. Страховочно-предупредительные мероприятия и связанные с ними усиления

При интенсификации работы доменных печей кроме обеспечения прочности конструкций существует проблема ограничения зоны и последствий при их разрушении, особенно для воздухонагревателей, находящихся в наиболее сложных условиях работы. Известно, что при разрушении листовых конструкций, нагруженных внутренним давлением, накопленная в них упругая энергия переходит в кинетическую энергию разрушения, сообщая ему характер взрыва. При этом большая упругость среды и медленное снижение давления вследствие потери герметичности затрудняют устранение трещины, что способствует не только хрупкому, но и вязкому разрушению при уровне номинальных напряжений ниже предела текучести материала. В этих условиях очень важно предотвратить глобальное разрушение и ограничить его зоны.

Относительно воздухонагревателей весьма эффективным страховочно-предупредительным мероприятием является установка полосовых бандажей, стягивающих кожух. Основное их назначение – предохранение воздухонагревателей от лавинообразного раскрытия вертикальных трещин и, соответственно, раскрытия агрегата и выброса огнеупорных материалов. Теоретические и экспериментальные исследования подтвердили, что собственно бандажи практически не влияют на критические напряжения начала развития трещины, а лишь останавливают начавшееся вязкое разрушение. При этом, как показали экспериментальные

исследования, если расстояние между бандажами относительно невелико, то развитие трещины прекращается и не переходит в кольцевое направление.

Горизонтальные бандажи устанавливают на расстоянии примерно 250 мм при сечении бандажа 250×20 мм. Стыкуют полосы болтами, затяжка которых обеспечивает плотное прилегание к поверхности кожуха. Между тем, как показывают экспериментальные исследования действительной работы футерованных конструкций, в кожухах воздухонагревателей уровень меридиональных напряжений от термического расширения футеровки часто превышает уровень кольцевых напряжений. Известны случаи образования горизонтальных трещин и разрывов кожухов воздухонагревателей, отрыв их куполов и т.п. Подобные разрушения свидетельствуют о недостаточной прочности кожухов в меридиональном направлении.

С целью повышения прочности кожуха в меридиональном направлении и предотвращения разрушения возможно одновременно с горизонтальными бандажами установить элементы усиления в виде плоских металлических вертикальных полос, расположенных вдоль образующей кожуха. Верхние концы полос закрепляются на куполе, и нижние – на цилиндрической части кожуха (рис. 17.3).

Для более эффективного включения элементов усиления в совместную работу с кожухом они могут быть предварительно напряжены. Как отмечалось, при разогреве воздухонагревателя происходит температурный рост футеровки, а также связанные с этим деформации кожуха. В зависимости от выбора момента прикрепления нижних концов полос к кожуху воздухонагревателя (до начала разогрева, в период разогрева или после его окончания) также возможна регулировка степени включения полос в совместную с кожухом работу.

Такое комбинированное усиление – горизонтальными и вертикальными полосами – позволяет повысить безопасность эксплуатации воздухонагревателей в нештатных ситуациях и в определенной степени увеличить прочность кожухов, а в ряде случаев использовать существующие кожухи при работе на повышенных эксплуатационных параметрах.

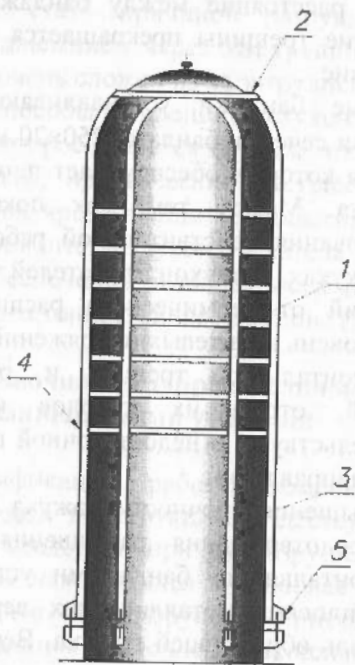


Рис. 17.3. Усиление кожуха воздухонагревателя бандажами:

1 – кожух; 2 – горизонтальный бандаж; 3 – опорное кольцо на куполе;
4 – вертикальный бандаж; 5 – устройство для закрепления
вертикального бандажа

К недостаткам такого способа усиления следует отнести наличие зазоров между бандажами и кожухом. В этих местах, невидимых при осмотрах, скапливается пыль, задерживается вода, что вызывает коррозионные повреждения, ликвидировать которые почти невозможно.

Важно также отметить, что в случае установки бандажей на разогретый кожух при его остывании снижается эффективность включения бандажей в совместную с кожухом работу.

Одним из способов предупреждения коррозии в этих местах может быть герметизация зазора при установке бандажей. Однако, с учетом условий эксплуатации кожуха воздухонагревателя, эффективные материалы для выполнения таких работ отсутствуют.

ГЛАВА 18 КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

§ 18.1. Основные положения

Рассмотрим некоторые термины, определяющие требования к конструкциям и сооружениям, используемые при квалификации их свойств.

Надежность – свойства конструкции сохранять эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени.

Безотказность – свойства конструкции сохранять непрерывную работоспособность в установленных условиях эксплуатации в течение определенного срока.

Долговечность – свойства конструкции сохранять работоспособность до предельного уровня с необходимыми перерывами в эксплуатации для технического обслуживания и ремонта.

Ремонтопригодность – приспособленность конструкции к предупреждению, обнаружению и устранению отказов путем проведения технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемость – свойства конструкции непрерывно сохранять значения установленных показателей ее качества в заданных пределах во время транспортирования, складирования, хранения и монтажа.

Живучесть – свойства сооружения сохранять несущую способность при наличии отказов и неисправностей конструкции.

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта.

Неисправность – состояние конструкции и/или сооружения, при котором они не соответствуют хотя бы одному из требований, установленных технической документацией.

Авария – отказ на высоких ступенях иерархии, сопровождающийся обрушением целых или части конструкции или сооружения, которое произошло по техногенным (конструктивным, производственным, технологическим, эксплуатационным) или естественным причинам.

Катастрофа – отказ, сопровождающийся обрушением конструкций и другими действиями, а также человеческими жертвами.

Прочность металлических конструкций доменного комплекса как основная характеристика их надежности имеет особое значение, что связано с длительным сроком их эксплуатации, большим износом, а также с необходимостью интенсификации технологического процесса. Недостаточная изученность и формализация действующих нагрузок при эксплуатации, а также в большинстве случаев случайный по величине характер нарушения технологического процесса приводят к резкой перемене напряженного состояния.

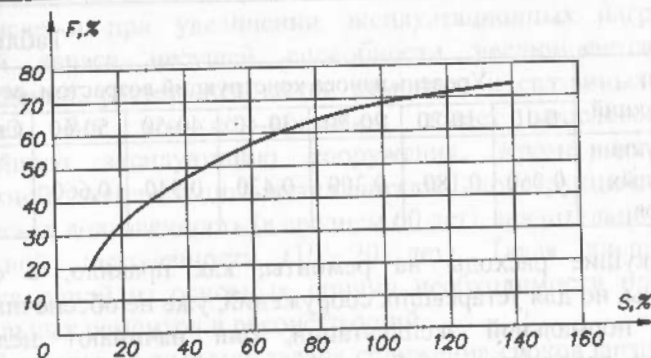
Все эти факторы носят сугубо нестационарный характер и весьма трудно поддаются учету при проектировании. Поэтому основным направлением, обеспечивающим достаточную надежность конструкций, является их правильная эксплуатация, включающая своевременное проведение ремонтов. В сочетании с обеспечением упомянутых критериев надежности она позволяет снизить вероятность и при определенных обстоятельствах исключить повреждения несущих конструкций, холодильников, футеровки, компенсаторов и т.д. Проблема обеспечения надежности обостряется тем, что кроме прямых затрат на ремонты особенно большие убытки производство несет от простоев, а возможные аварии чреваты значительными разрушениями с тяжелыми последствиями.

Стоимость ремонта зависит от срока эксплуатации конструкции и ее износа. Зависимость стоимости ремонта S от уровня физического износа F представляет собой достаточно универсальную логарифмическую зависимость [79], показанную на рис. 18.1, из которой следует, что при физическом износе более чем 68 % затраты на ремонт и восстановление превышают первоначальную стоимость сооружения.

Средний статистический ресурс работоспособного состояния кожуха доменной печи согласно данным мировой практики показан в таблице 18.1 [59].

Таблица 18.1

Страны	США	Германия	Япония	Россия, Украина
Ресурс работоспособного состояния кожуха доменной печи, лет	44*	22	17	16
* Применены медные холодильники и компьютерная система контроля кожуха.				

Рис. 18.1. Зависимость стоимости S ремонта конструкций от уровня физического износа F

Ресурс работоспособного состояния кожуха воздухонагревателя составляет 25 – 30 лет. Результаты исследований, проведенных в Украине [79] относительно распределения конструкций сооружений действующих доменных цехов по длительности эксплуатации, наведены в таблице 18.2.

Таблица 18.2

Тип конструкций	Часть в общем объеме металлических конструкций промышленных предприятий, %	Объем конструкций (тыс. т.) возрастом, лет						
		0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	Свыше 60
Конструкции доменных цехов	6,34	44	716	780	22	216	63	25

Анализ результатов диагностики технического состояния многих промышленных сооружений показывает, что с увеличением длительности эксплуатации уровень износа конструкций достаточно резко возрастает. В таблице 18.3 [79] приведены экспертные оценки уровня износа конструкций доменных цехов.

Таблица 18.3

Тип конструкций	Уровень износа конструкций возрастом, лет						
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	Свыше 60
Конструкции доменных цехов	0,060	0,180	0,300	0,420	0,540	0,660	0,780

Текущие расходы на ремонты, как правило, в среднем постоянны, но для устаревших сооружений, уже не обеспечивающих условия нормальной эксплуатации, они начинают нелинейно возрастать вследствие ослабления защитных свойств, изменения качества металла, увеличения числа повреждений и т.п.

Примерная зависимость роста текущих ремонтов от времени их эксплуатации, показанная на рис. 18.2 [17], иллюстрирует, что существует критический срок $t_{кр}$, после которого текущие расходы r_0 на эксплуатацию сооружения начинают возрастать.

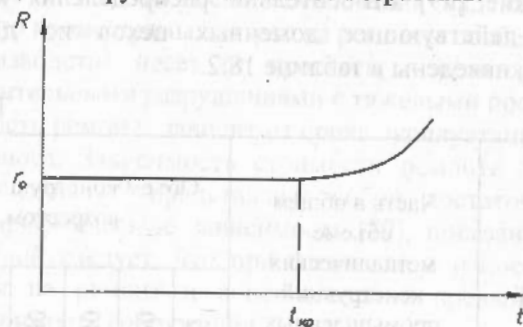


Рис. 18.2. Рост текущих ремонтов конструкций в зависимости от времени их эксплуатации

Поэтому при определении срока эксплуатации необходимо поставить его в зависимость от тех убытков, которое терпит предприятие при аварийных ремонтах и заменах конструкций. Эти убытки для разных производств различны и связаны с характером технологического процесса.

Срок естественного физического износа конструкций довольно велик. Известны примеры их эксплуатации 80–100 лет. Это зависит, прежде всего, от возможности сохранения ими несущей способности на протяжении всего срока эксплуатации, в

том числе и при увеличении эксплуатационных нагрузок. С потерей запаса несущей способности увеличивается число повреждений, растет количество ремонтов и связанных с ними расходов. Все это со временем делает нецелесообразной дальнейшую эксплуатацию сооружения. Кроме того, срок возможной эксплуатации металлических конструкций, т.е. их физическая долговечность (в среднем 60 лет), значительно выше их моральной долговечности (10–20 лет). Такая диспропорция является одной из основных причин необходимости проведения капитальных ремонтов и реконструкций.

Актуальной является задача сближения сроков физической и моральной долговечности, один из аспектов решения которой — своевременное проведение ремонтов и хорошо налаженная эксплуатация конструкций зданий и сооружений.

Физическая долговечность конструкций доменного комплекса снижается из-за повреждения конструкций в процессе эксплуатации; коррозии металла в условиях агрессивных сред и высоких температур, а также в результате старения металла по причине образования свободного цементита при рекристаллизации, возникающей при нагреве конструкций до 100–200°C в процессе эксплуатации. При этом происходит сильный рост зерен, что снижает механические характеристики стали.

Как показано в [79], снижение физической долговечности конструкций характеризуется ростом числа их отказов и деградацией сооружения. Качественно параметр интенсивности отказа элемента является функцией времени и показан на рис. 18.3. Эксплуатация сооружения состоит из трех периодов: T_0 — период приспособляемости элементов конструкций; T — основной период эксплуатации и T_k — период значительной деградации конструкций.

Поддерживают физическую долговечность конструкций капитальными и текущими ремонтами, необходимость и сроки проведения которых определяют по эксплуатационным данным.

Реконструкция и перевооружение действующих доменных цехов позволяют существенно повысить удельный вес затрат на активную часть основных фондов — оборудование, ускоряют освоение производственных мощностей, способствуют быстрому переходу на выпуск новой продукции.



Рис. 18.3. Параметр интенсивности отказа

Реконструкция, в большинстве случаев, включает техническое перевооружение – коренное переустройство действующих объектов и агрегатов, вызванное заменой физически изношенных конструкций, устаревшей технологии производства и основных производственных фондов (частично или полностью). Важнейшим требованием реконструкции доменных цехов и доменных агрегатов является сведение до минимума потерь выпуска продукции за счет сокращения срока между остановкой реконструируемых и вводом в действие новых агрегатов и мощностей. Сложность реконструкции доменных печей состоит в том, что технологический процесс их не допускает временных остановок в период подготовки для выполнения основных строительно-монтажных работ.

Техническое перевооружение представляет собой комплекс мероприятий по механизации оборудования, внедрению современных средств автоматизации с использованием имеющихся производственных площадей и резервов. Техническое перевооружение реконструируемых доменных печей предусматривает замену устаревших загрузочных устройств новыми, более совершенными, увеличение объема печей и добавление чугунных леток, внедрение новых технологических процессов – грануляции шлака, утилизации тепла, устройство установок взятия печи «на тягу» и т.п.

Реконструкция доменных печей, как правило, предполагает полную замену изношенных конструкций и оборудования центрального узла, а также частичное переустройство энерге-

тических источников и сетей, транспортных коммуникаций и объектов цехового и общезаводского хозяйства в условиях крайней стесненности строительных площадок, пересекаемых «горячими» шлако- и чугуновозными железнодорожными путями с интенсивным движением поездов (интервал 20–30 мин), ограниченными транспортными коммуникациями для подачи в рабочие зоны материалов, конструкций и оборудования, повышенной опасности ведения работ на территории действующего доменного цеха и пр.

Замена конструкций связана с большими капитальными затратами и длительной остановкой производства. При этом необходимо учитывать возможности производства работ по строительству и наличие определенных условий для размещения новых сооружений.

Наиболее целесообразным и экономически оправданным является реконструкция и модернизация с одновременным ремонтом существующих зданий и сооружений, что не требует длительной остановки производства и значительных капиталовложений.

§ 18.2. Общие положения по ремонту доменных печей с частичной или полной заменой кожухов

Для обеспечения нормальной эксплуатации всех конструкций доменного комплекса первостепенное значение имеет надежность кожухов технологических агрегатов. Чаще всего печи простаивают именно из-за повреждений кожухов, так как на них в первую очередь сказываются изменения эксплуатационных параметров, нарушения технологических процессов [10]. Это выход из строя холодильников, прогары футеровки, размывы лещади, применение локального охлаждения кожуха печи наружным поливом, периферийный или канальный ход печи, обрыв зависшей шихты, местные перегревы кожухов и т.п. Определить наиболее уязвимые места печи, где износ кожуха максимальный, трудно как и выявить места повреждений. В равной степени ими могут быть шахта, районы чугунных леток, фурменная зона, купол, а также лещадь.

При выходе из строя кожуха доменной печи его приходится ремонтировать в период кратковременных остановок, относимых к разряду текущих ремонтов, или менять при первой возможности.

К основным критериям, обеспечивающим надежную работу кожухов, относятся качество металла, температура кожуха и уровень его напряженного состояния в период эксплуатации. Эти критерии определяют возможность кожухов нести силовую нагрузку во все периоды работы, включая пиковые ситуации при нарушениях эксплуатационных режимов.

В случае серьезного повреждения кожуха либо его части производят его замену или поврежденной части. При невозможности применения такого индустриального подхода выполняют последовательную замену кожуха отдельными участками.

Полная замена кожуха или его части более прогрессивна, так как в этом случае до остановки печи на ремонт в цеховых условиях осуществляется сборка, подгонка и укрупнение в узлы нового кожуха.

При ремонтах следует иметь в виду, что устойчивость и неизменяемость несущих конструкций доменной печи обеспечивается только при наличии полного кожуха или необходимой его части. Он воспринимает практически все горизонтальные и вертикальные нагрузки от газоходов, а в некоторых случаях и от колошниковоустройства, монтажной балки и др. Поэтому для всех конструктивных схем сооружений центрального узла характерно наличие горизонтальных связей, соединяющих конструкции с кожухом доменной печи. Как правило, ими являются мораторное кольцо и специально устраиваемые между кожухом и колоннами на различных уровнях горизонтальные стержневые фермы, так называемые «звездочки».

Таким образом, кожух, выполняя важнейшую технологическую функцию доменной печи, является основной несущей конструкцией, которая обеспечивает общую устойчивость большого комплекса конструкций. В связи с этим полное удаление и замену кожуха печи без замены смежных конструкций можно осуществить только в тех случаях, когда ремонтируемая печь имеет независимую опорную систему из колонн шахты и горна или отдельного четырехколонника. Эти конструкции позволяют принять нагрузку от верхних конструкций печи и оборудования, все горизонтальные нагрузки на период замены всего кожуха, что определяет уровень ремонтпригодности конструкции, а также возможность замены кожуха целиком или большими его частями.

Замена кожуха при отсутствии независимой опорной системы или специальных мероприятий для ее обеспечения возможна лишь участками небольшой длины, как правило, в пределах $1/6$ длины окружности. При этом в процессе замены необходимо дополнительно обеспечивать устойчивость и геометрическую неизменяемость свободных краев сохраняемого кожуха установкой временных вертикальных ребер, а каждая часть нового кожуха должна быть подогнана сверху и снизу к сохраняемым участкам старого кожуха и т.д. Этот процесс весьма трудоемок, не может вестись индустриальными методами и требует длительного времени.

Для возможности ведения ремонтов индустриальными методами создают специальные временные монтажные опорные системы, предназначенные для обеспечения прочности и устойчивости конструкций доменной печи при демонтаже всего кожуха или его части при замене крупными блоками; восприятия всех горизонтальных и вертикальных нагрузок от конструкций, расположенных выше демонтируемой части кожуха, и передачи нагрузки от сохраняемой части кожуха печи на колонны [50].

Такая система является комплексной конструкцией, которая состоит из вертикальных и горизонтальных систем связей, опорных элементов для временного переопирания расположенных выше конструкций и т. п.

Конструктивные схемы этих опорных систем весьма многообразны и зависят от общей компоновки сооружения, условий генерального плана, состояния сохраняемых конструкций, сроков ремонта и др. Существующие постоянные опорные системы — колонны горна и шахты — в большинстве случаев не могут быть самостоятельно использованы в качестве временных опорных систем. Они предназначены для поддержания конструкций только совместно с кожухом печи. Однако при определенных конструктивных мероприятиях эти системы могут служить основой для создания временных монтажных опорных систем.

При демонтаже части значительной высоты кожуха шахты для временных опорных систем используются, как правило, существующие колонны постоянных опорных систем или устанавливаются дополнительные колонны, входящие в общую систему.

При ремонте и демонтаже отдельных участков по высоте кожуха печи на этих участках сооружают локальные опорные системы, позволяющие демонтировать либо участок кожуха, либо его часть по всему периметру.

При создании временной монтажной опорной системы важно, чтобы большая ее часть была сооружена в доостановочный период, что позволяет уменьшить объем работ при остановке печи и сократить общую продолжительность ремонта. Однако, в связи с высокой степенью загазованности среды, работой механизмов, систем охлаждения и т.п. в большинстве случаев основной объем работ по монтажу опорных систем приходится выполнять в остановочный период.

К временным монтажным опорным системам предъявляется ряд основных требований:

- надежность опирания сохраняемых конструкций;
- максимальное использование элементов существующей постоянной опорной системы;
- возможность сохранения установленных конструкций временной опорной системы для последующего использования;
- минимальное число узлов сопряжения новых элементов со старыми конструкциями.

Временные опорные системы можно использовать не только при плановом ремонте, но и при срочной замене части кожуха печи вследствие его перегрева, деформации, при наличии большого числа местных разрывов и трещин. В этих случаях опорная система должна обеспечить возможность демонтажа всего дефектного участка кожуха.

Одной из сложных задач при устройстве временных опорных систем является необходимость восприятия и распределения при отсутствии кожуха печи или его части вертикальных и горизонтальных нагрузок и воздействий. Конструкции и узловые соединения колонн горна не предназначены для работы в условиях подобного рода нагрузок. В таких случаях необходима горизонтальная опорная система, которая, как правило, строится на существующих конструкциях, способных служить опорными дисками. К ним можно отнести связи по кровле зданий литейных дворов, систему балок рабочих площадок поддоменника, кольцевой воздухопровод горячего дутья в общей системе воздушного

тракта и т.п. Могут быть также использованы достаточно прочные отдельно стоящие вблизи печи сооружения (подпорные стены, фундаменты и пр.).

§ 18.3. Типы временных монтажных опорных систем

Компоновка монтажной опорной системы зависит от объема демонтируемой части кожуха печи и от компоновочной схемы постоянной опорной системы – количества колонн шахты и горна и взаимного их расположения в плане, а также предполагаемого объема замены кожуха.

Конструктивные формы опорных систем могут быть различными и для достижения поставленных целей имеется большое разнообразие технических решений. Однако, основная задача опорной системы – обеспечение устойчивости конструкций при отсутствии их «ядра» – кожуха печи – решается достаточно близкими по схеме конструктивными приемами.

Опорные системы принципиально могут быть классифицированы по следующему назначению:

- для снятия нагрузки от газопроводов грязного газа на кожух печи;
- для полной замены кожуха;
- для частичной замены кожуха шахты и купола;
- для замены кожухов шахты, заплечиков и горна;
- для замены части или всего кожуха шахты выше мораторного кольца;
- для кожуха печи, находящегося в аварийном состоянии.

Возможны и другие варианты объемов необходимых ремонтов. Однако, они в той или иной степени могут использовать основные положения компоновки опорных систем приведенной классификации.

Ниже приводятся примеры возможных конструктивных решений временных монтажных опорных систем для каждого из обозначенных типов.

Система для снятия опирания газопроводов грязного газа с кожуха печи. При демонтаже кожуха доменной печи или его

части, как отмечалось, необходимо освободить кожух от опирающихся на него конструкций, создающих вертикальные нагрузки и, в первую очередь, исключить опирание на него газопроводов грязного газа.

Для этого предусмотрено устройство опирания газопроводов через балки площадки балансиров на колонны колошникового копра с соответствующим их усилением.

Пример технического решения такой опорной системы показан на рис. 18.4.

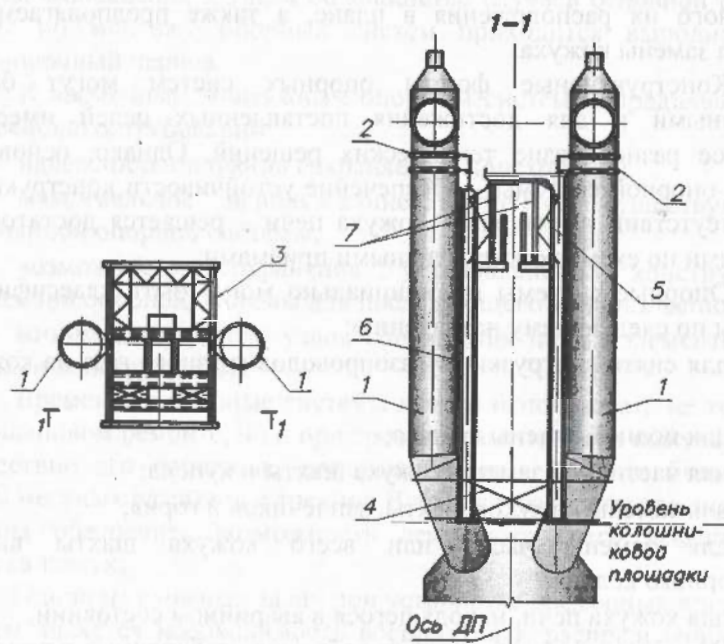


Рис. 18.4. Система для снятия опирания газопроводов грязного газа с кожуха печи:

- 1 – вертикальные газопроводы грязного газа; 2 – опорные элементы;
3 – балки площадки балансиров; 4, 5 – связевые системы; 6 – колонны колошникового копра; 7 – элементы крепления монтажной балки

Вертикальные газопроводы с помощью новых опорных элементов опираются на балки площадки балансиров и через них на колонны колошникового копра.

Для исключения передачи распорных усилий от газопроводов на их наклонных участках устанавливается система связей, замыкающая эти усилия.

На участке размещения монтажной балки также устанавливаются связи между колоннами копра и подвесками опорной консоли монтажной балки.

Кроме такого опирания газопроводы могут иметь дополнительные опоры на балки колошниковой площадки (см. рис. 3.17)

В продольном направлении колонны копра связываются системой связей.

Система для полной замены кожуха всей печи (рис. 18.5, 18.6). Существующая опорная система состоит из 7-ми колонн горна и 6-ти несоосных с ними в плане колонн шахты. Колонны шахты соединяются между собой попарно связевой системой. Верх колонн горна объединяется кольцевой коробчатой балкой, узлы опирания колонн шахты на колонны горна усиливаются, устанавливаются дополнительные горизонтальные связи. Исключается опирание газопроводов грязного газа на купол печи, через временные опорные узлы они опираются на колонны колошникового копра.

Колонны горна на уровне верха могут крепиться к кольцевому воздухопроводу горячего дутья временными связями, а на уровне середины – к конструкциям рабочей площадки. В связи с увеличением нагрузки на эти колонны они поэтапно усиливаются дополнительными связями, уменьшающими расчетную длину колонн, либо другим способом. При сохранении нижней части кожуха лещади печи возможно крепление к ней колонн горна.

Демонтаж и замена кожуха шахты производится по этапам.

I этап:

- установка вертикальных связей по колоннам шахты;
- монтаж кольцевой коробчатой балки ниже мораторного кольца по верху колонн горна;
- соединение колонн горна с кожухом ниже кольцевого воздухопровода горячего дутья связями;
- переопирание газопроводов грязного газа;
- демонтаж горизонтальных связей по высоте шахты печи;

– демонтаж кожуха от колошникового фланца до мораторного кольца;

– монтаж нового кожуха шахты.

II этап:

– демонтаж и замена кожуха горна и лещади от низа до заплечиков.

III этап:

– установка связей соединения колонн горна с его кожухом;

– соединение низа колонн шахты с новым кожухом шахты;

– демонтаж и замена кожуха заплечиков.

IV этап:

– монтаж нового кожуха купола печи;

– соединение газопроводов грязного газа с куполом;

– демонтаж элементов временной опорной системы.

Конструктивное решение временной связевой системы отличается если существующая опорная система состоит из четырех соосных в плане колонн горна и колонн шахты (рис. 18.7). Так как они не могут быть соединены между собой непрерывными связями из-за пересечения их с кожухом печи, между ними устанавливается промежуточная стойка, позволяющая создать замкнутую связевую систему. Колонны шахты временно жестко соединяются с колоннами горна.

Система для замены купола и части кожуха шахты (рис. 18.8, 18.9). Между колоннами шахты в зоне демонтируемого участка кожуха шахты устанавливается система вертикальных связей. Опираение газопроводов на временные опорные узлы переносится через балки площадки балансиров – на колонны колошникового копра. На уровне верха сохраняемой части кожуха между ней и колоннами шахты горизонтальная система связей – «звездочка» временно демонтируется с последующим восстановлением. К верху сохраняемой части кожуха печи связями привязываются колонны шахты.

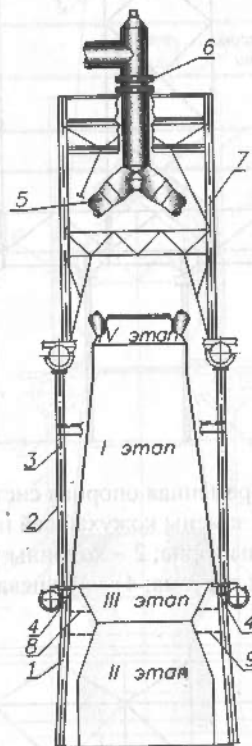


Рис. 18.5. Общий вид временной опорной системы для полной замены кожуха всей печи:

1 – колонны горна; 2 – колонны шахты;

3 – временная связевая система; 4 – кольцевая коробчатая балка;
5 – газопроводы грязного газа; 6 – опорные конструкции для опирания газопроводов грязного газа; 7 – колонны колошникового копра;
8, 9 – связевые системы

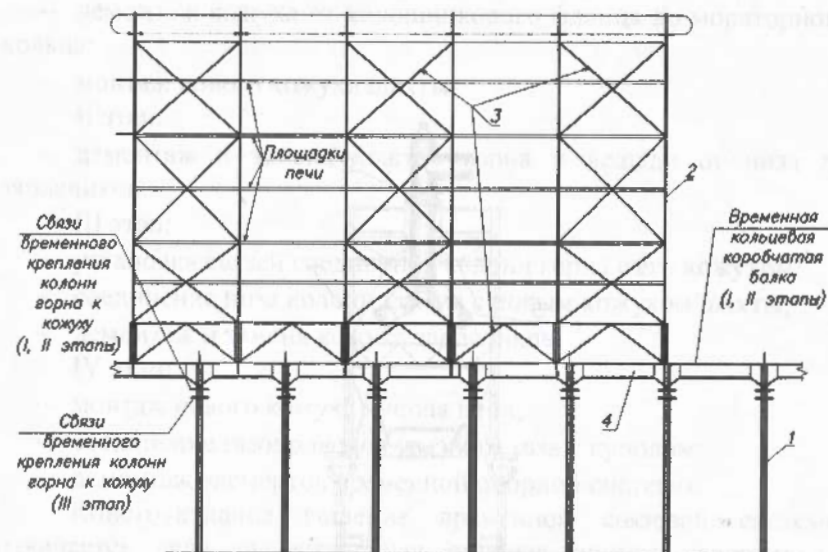


Рис. 18.6. Временная опорная система для полной замены кожуха всей печи:

1 – колонны горна; 2 – колонны шахты; 3 – временная связевая система; 4 – кольцевая коробчатая балка

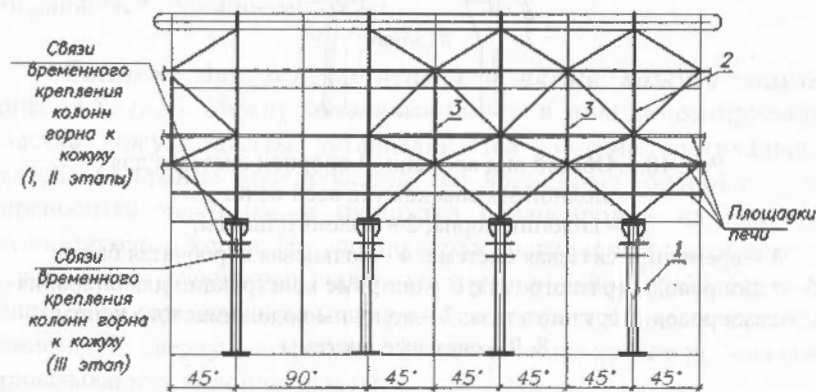


Рис. 18.7. Временная опорная система при четырех колоннах шахты: 1 – колонны горна; 2 – колонны шахты; 3 – промежуточные стойки

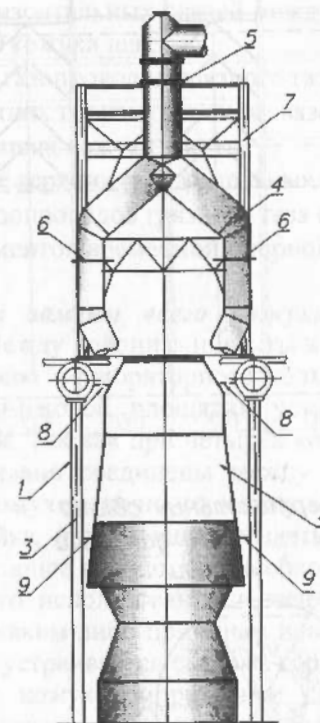
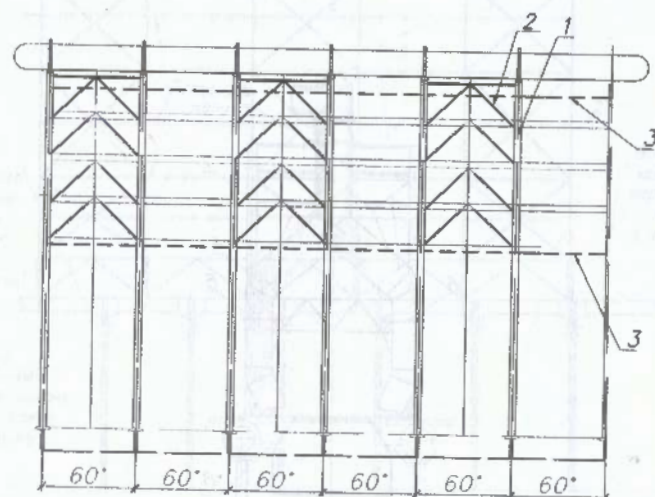


Рис. 18.8. Временная опорная система для частичной замены кожуха шахты и купола:

1 – колонны шахты; 2 – демонтируемая часть кожуха печи; 3 – временная связевая система; 4 – газопроводы грязного газа; 5 – опорные конструкции для опирания газопроводов грязного газа; 6 – временные связи; 7 – колонны колошниковой копра; 8, 9 – связевые системы



План вертикальных связей



Рис. 18.9. Временная опорная система для частичной замены кожуха шахты и купола:

1 – колонны шахты; 2 – временная связевая система;
3 – связевые системы

Демонтаж и замена кожуха производится в следующей последовательности:

- установка вертикальных связей по колоннам шахты на участке замены кожуха;
- установка горизонтальных связей между колоннами шахты и сохраняемой частью кожуха шахты;
- переопирание газопроводов грязного газа;
- демонтаж верхних горизонтальных связей – «звездочки»;
- демонтаж и замена кожуха шахты;
- восстановление верхних горизонтальных связей – «звездочки»;
- соединение газопроводов грязного газа с куполом;
- демонтаж элементов временной опорной системы

Система для замены всего кожуха шахты и купола (рис.18.10, 18.11). Между колоннами шахты в зоне демонтируемого участка кожуха шахты от мораторного кольца до опорной кольцевой балки колошниковой площадки устанавливается система вертикальных связей. Так как при четырех колоннах шахты они не могут быть непрерывно соединены между собой связями из-за пересечения их с кожухом печи, то между ними устанавливается промежуточная стойка, позволяющая создать непрерывную связевую систему. Мораторное кольцо, при необходимости, усиливается для возможности его использования в качестве горизонтального диска. Если это по каким-либо причинам невозможно, то в уровне верха колонн горна устраивается система горизонтальных связей к сохраняемой части кожуха, мораторное кольцо привязывается горизонтальными связями к кольцевому воздухопроводу горячего дутья.

При необходимости устраивается дополнительная связевая система между колоннами копра. Опираие газопроводов через временные опорные узлы переносится на колонны колошниковой копра.

Демонтаж и замена кожуха производится в следующей последовательности:

- установка вертикальных связей по всей высоте колонн шахты;
- установка горизонтальных связей между колоннами горна и сохраняемой частью кожуха шахты, мораторным кольцом и кольцевым воздухопроводом горячего дутья;

- переопирание газопроводов грязного газа;
- установка дополнительных горизонтальных связей между колоннами колошникового копра;
- демонтаж и замена кожуха шахты и купола;
- восстановление верхних горизонтальных связей — «звездочки»;
- соединение газопроводов грязного газа с куполом;
- демонтаж элементов временной опорной системы.

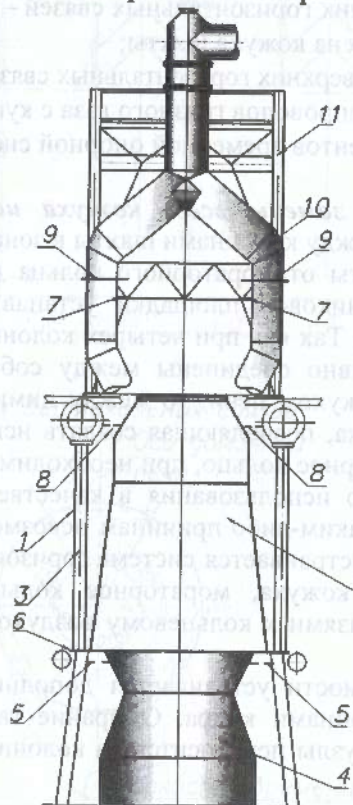


Рис. 18.10. Временная опорная система для замены всего кожуха шахты и купола:

- 1 — колонны шахты; 2 — демонтируемая часть кожуха печи;
 3 — временная связевая система; 4 — сохраняемая часть кожуха;
 5, 7, 8, 9 — горизонтальные связи; 6 — горизонтальные связи к воздухопроводу горячего дутья; 10 — газопроводы грязного газа; 11 — колонны колошникового копра

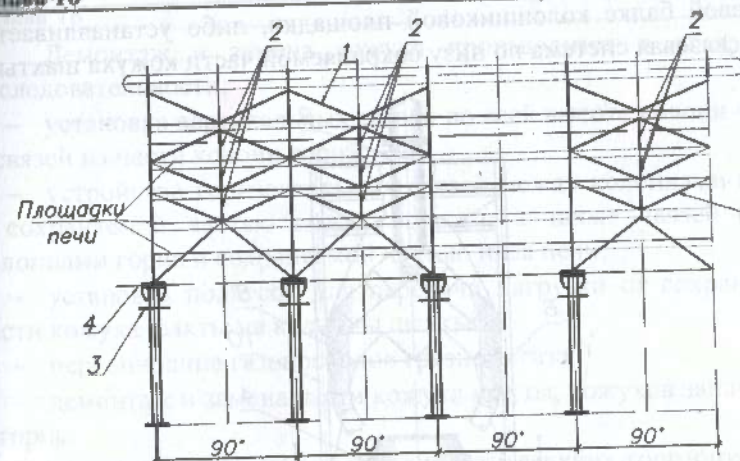


Рис. 18.11. Временная опорная система для замены всего кожуха шахты и купола:

- 1 — временная связевая система; 2 — промежуточные стойки;
 3 — горизонтальные связи; 4 — горизонтальные связи к воздухопроводу горячего дутья

Система для замены всего кожуха шахты или его части, кожухов заплечиков и горна (рис. 18.12). Между колоннами шахты от мораторного кольца до опорной кольцевой балки колошниковой площадки устанавливается система вертикальных связей. Так как они не могут быть непрерывно соединены между собой связями из-за пересечения их с кожухом печи, между ними устанавливается промежуточная стойка, позволяющая создать непрерывную связевую систему. Такие же связи устанавливаются по колоннам горна на участке заменяемых кожухов заплечиков и фурменной зоны. На уровне верха сохраняемой части кожуха между ним и колоннами горна устраивается горизонтальная система связей.

Сохраняемая часть кожуха шахты с помощью подвесок крепится к колоннам шахты.

Опираение газопроводов через временные опорные узлы переносится на колонны колошникового копра.

Если верхняя «звездочка» попадает на демонтируемый участок кожуха, то либо устраиваются горизонтальные связи по опорной

кольцевой балке колошниковой площадки, либо устанавливается новая связевая система по низу сохраняемой части кожуха шахты.

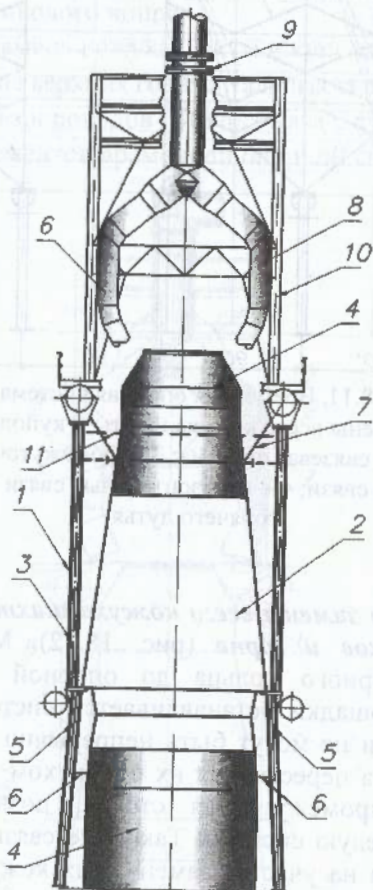


Рис. 18.12. Временная опорная система для замены всего или части кожуха шахты, кожухов заплечиков и горна:

- 1 – колонны шахты; 2 – демонтируемая часть кожуха печи;
- 3 – временная связевая система по колоннам шахты;
- 4 – сохраняемые части кожуха; 5 – временная связевая система по колоннам горна; 6 – горизонтальные связи; 7 – подвески;
- 8 – газопроводы грязного газа; 9 – опорные конструкции для опирания газопроводов грязного газа; 10 – колонны колошниковой копра;
- 11 – горизонтальные связи

Демонтаж и замена кожуха производится в следующей последовательности:

- установка вертикальных связей по всей высоте колонн шахты и связей на части колонн горна;
- устройство горизонтальных связей между колоннами шахты и сохраняемой частью кожуха шахты, а также связей между колоннами горна и сохраняемой частью низа печи;
- установка подвесок для передачи нагрузки от сохраняемой части кожуха шахты на колонны шахты;
- переопирание газопроводов грязного газа;
- демонтаж и замена части кожуха шахты, кожухов заплечиков и горна;
- восстановление, при необходимости, верхних горизонтальных связей – «звездочки»;
- демонтаж элементов временной опорной системы.

Система для кожуха печи, находящегося в аварийном состоянии. Бывают ситуации, при которых состояние кожуха печи требует немедленного проведения ремонтных работ. Чаще всего это связано с перегревом купола печи и верхней части кожуха колошника, что приводит к просадке и перекосу перегретой части кожуха и опорного колошникового фланца, сбою в работе конусов загрузочного устройства, возможному обрушению выше-расположенных конструкций.

Для возможности эксплуатации печи до ее капитального ремонта возникает необходимость в дополнительном автономном опирании деформированной части кожуха печи.

Пример технического решения такой временной опорной системы показан на рис.18.13. Ниже деформированной части кожуха устанавливают кольцевую опорную балку, через которую с помощью подвесок прикрепляют кожух к колоннам шахты.

Для исключения передачи на колонны шахты горизонтальной составляющей от усилий в подвесках в уровне узлов их креплений к колоннам устраивают горизонтальную связевую систему, воспринимающую эту составляющую.

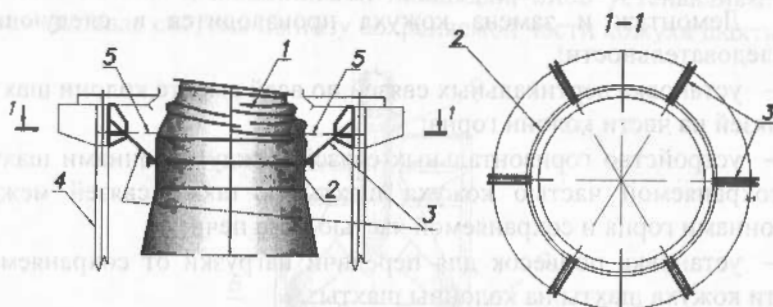


Рис. 18.13. Временная опорная система для ремонта кожуха печи, находящегося в аварийном состоянии:

- 1 – деформированная часть кожуха; 2 – опорное кольцевое ребро;
3 – подвески; 4 – колонны шахты; 5 – горизонтальные связи

ГЛАВА 19 ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

§ 19.1. Термины и определения

Для оценки технического состояния сооружений в нормативной и технической литературе приняты приведенные ниже термины и определения.

Безопасность – отсутствие недопустимого риска, связанного с возможностью нанесения любого ущерба жизни, здоровью и имуществу граждан, а также окружающей природной среды.

Диагностика здания (сооружения) – процесс установления технического состояния здания (сооружения).

Обследование – процесс получения качественных и количественных показателей эксплуатационной пригодности здания (сооружения), его частей и конструкций путем визуального осмотра, инструментальных измерений на натуре и в лабораторных условиях.

Обследование предварительное – вид обследования, при котором в качестве основного метода определения показателей эксплуатационной пригодности используют анализ технической документации и внешний осмотр экспертами здания (сооружения) и его частей.

Обследование детальное – вид обследования, при котором в качестве основного метода определения показателей эксплуатационной пригодности используют инструментальные тесты конструкций и материалов зданий (сооружений).

Обследование специальное – вид обследования, при котором в качестве основного метода определения показателей эксплуатационной пригодности используют специальные изыскания, исследования, натурные или модельные испытания и т.п.

Обследование сплошное – вид обследования, при котором обследованию подлежат все конструктивные элементы здания (сооружения).

Обследование выборочное – вид обследования, при котором обследованию подлежат только отдельные, наиболее изношенные конструктивные элементы здания (сооружения).

Обследование плановое – обследование, которое выполняется в сроки, заранее определенные регламентом эксплуатации здания (сооружения).

Обследование внеочередное – обследование, которое выполняется вследствие каких-либо нарушений эксплуатационного регламента.

Паспортизация технического состояния здания (сооружения) – обследование, диагностика и оценка технического состояния объекта специализированной организацией и определение на этом основании категории его технического состояния с последующим составлением Паспорта технического состояния здания (сооружения).

Ремонт – комплекс операций по восстановлению состояния объекта и (или) увеличения его долговечности.

Техническое состояние сооружения – совокупность качественных и количественных показателей, которые характеризуют пригодность сооружения и его частей по сравнению с предельно допустимыми значениями.

§ 19.2. Основные принципы эксплуатации сооружений доменного комплекса

Надежность и долговечность сооружений комплекса доменной печи зависят от обеспечения технологических параметров и принятых в проекте условий работы, а также от организации службы эксплуатации конструкций, систематического наблюдения за ними, периодической диагностики и оценки их технического состояния.

В настоящее время отсутствуют единые директивные документы по эксплуатации конструкций доменного комплекса, что создает неопределенность относительно объема и характера мероприятий, проведение которых необходимо для установления и поддержания их пригодности к безаварийной дальнейшей работе.

К общим принципам эксплуатации и промышленной безопасности металлических конструкций сооружений доменного комплекса можно отнести следующие:

- контроль качества изготовления и монтажа конструкций, исключение их повреждений на этих стадиях;

- соответствие проекту устанавливаемого оборудования;
- обеспечение с момента строительства соответствия проекту материалов конструкций и футеровки, схемы сооружения, компоновки систем «кожух – футеровка», тщательное соблюдение требований к величине и заполнению компенсационных зазоров, объему и качеству слаточных испытаний;
- немедленное устранение всех дефектов, выявленных при приемке сооружения в эксплуатацию;
- ввод в действие листовых футерованных конструкций, находящихся в процессе эксплуатации под действием высоких температур, инструментальный контроль и обеспечение минимальных взаимных воздействий в системе «кожух – футеровка» и исключение необратимых процессов в футеровке;
- регулярные систематические осмотры кожухов доменных печей, воздухонагревателей, пылеуловителей, воздухопроводов горячего и холодного дутья и других конструкций, работающих с избыточным давлением;
- проведение периодической технической диагностики кожухов и других конструкций с оценкой их технического состояния и разработкой мероприятий, обеспечивающих безаварийную дальнейшую эксплуатацию;
- организация постоянного наблюдения за техническим состоянием наиболее ответственных конструкций и сооружений с целью предупреждения отказов, своевременного выявления дефектов, повреждений и обеспечения требований промышленной безопасности;
- немедленный ремонт всех обнаруженных дефектов и исключение работы агрегатов и сооружений с недопустимыми повреждениями.

При проведении капитальных ремонтов для сохранения и использования существующих конструкций необходима оценка их технического состояния с определением возможности дальнейшей эксплуатации, допустимых эксплуатационных режимов работы, необходимости и объемов усиления и т.п. Особая роль здесь отводится диагностике технического состояния и мониторингу промышленной безопасности конструкций и сооружений доменного комплекса как комплексной задаче, включающей не только

контроль и оценку их состояния, но и контроль действующих нагрузок и воздействий, параметров технологического процесса и т.п.

В частности, необходимо систематически контролировать работу системы охлаждения, тепловые нагрузки на холодильники и перепады температур охлаждающей воды, величину отложений в трубопроводах, поведение оборудования агрегатов, чтобы не допустить несанкционированного увеличения нагрузок и воздействий, которые могут привести к повреждению и потере работоспособности конструкции. Следует контролировать уровень напряженно-деформированного состояния несущих металлических конструкций, являющийся обобщенным показателем работоспособности и промышленной безопасности.

Действующие в настоящее время в РФ «Правила безопасности в доменном производстве» [68], утвержденные Федеральным горным и промышленным надзором России (постановление № 26 от 24 апреля 2003 г.), не включают достаточного спектра требований к числу контролируемых параметров, необходимых для диагностики. Так, согласно этому документу вновь строящиеся и реконструируемые печи оборудуются лишь приборами контроля температуры кожуха печи по всей высоте. При отсутствии таких приборов температура кожухов печей, а также воздухонагревателей должна систематически не менее 2-х раз в месяц измеряться по всей высоте сооружения переносными контактными термометрами с занесением результатов в журнал. Контроль нагрузок и воздействий, параметров напряженно-деформированного состояния, влияющих на техническое состояние несущих конструкций, этими Правилами, а также другими нормативными документами не предусмотрен, что характерно и для украинских норм.

К указанным нагрузкам, воздействиям и параметрам следует относить:

- избыточное внутреннее давление в агрегатах и трубопроводах;
- температурный режим в агрегатах и трубопроводах;
- отложения пыли на площадках, кровлях зданий и других покрытиях, а также отложения и количество конденсата в агрегатах и трубопроводах;

– химический состав воздушногазовой среды, скорость коррозии и истирания стальных конструкций в процессе эксплуатации;

- режимы работы оборудования;
- состояние футеровки, системы охлаждения и температуру поверхности кожухов агрегатов;
- фактическое напряженно-деформированное состояние кожухов печи, воздухонагревателей и других конструкций.

§ 19.3. Диагностика технического состояния конструкций

Диагностика технического состояния конструкций представляет собой комплекс мероприятий по обеспечению надежности конструкций в период эксплуатации и своевременному выполнению их ремонта и усиления [87].

Целью диагностики является возможность оценки эксплуатационных параметров и критериев прочности конструкций, своевременное выявление дефектов, предупреждение и устранение негативных воздействий, вызванных технологическими особенностями режима эксплуатации. В задачи диагностики входит также своевременная разработка на основании ее результатов рекомендаций по обеспечению работоспособности и поддержанию общего ресурса конструкций и осуществление оперативного управления процессом обеспечения безопасности и эксплуатационной надежности сооружений.

Основным видом диагностики технического состояния конструкций являются их обследования, проводимые в том или ином объеме.

В соответствии с нормативными документами обследования проводятся поэтапно в следующем порядке.

1. Предварительное обследование:

- сбор и анализ технической документации;
- общий осмотр с оценкой состояния конструкций и выявлением наиболее изношенных, а также аварийных конструкций;
- составление программы инструментальных, специальных обследований.

На этом этапе при обнаружении аварийных повреждений необходимо немедленно выдать проектное решение по их устранению.

2. Детальное обследование:

- уточнение замерами сечений элементов, конструктивных схем, нагрузок и, при необходимости, физико-механических характеристик материалов;
- выявление, обмер и составление ведомостей дефектов и повреждений конструкций;
- анализ результатов и составление заключения о техническом состоянии конструкций и сооружения в целом.

Детальные обследования проводятся в следующих случаях:

- при больших сроках эксплуатации сооружения;
- при обнаружении во время предварительного обследования опасных дефектов и повреждений, вызывающих опасения за общую надежность сооружения;
- перед планируемой реконструкцией, техническим перевооружением или модернизацией, проводимых с сохранением существующих конструкций, но предопределяющих изменение условий эксплуатации и характера работы конструкций.

3. Специальное обследование:

- инженерно-геологические и инженерно-геодезические изыскания, испытание конструкций;
- длительные инструментальные наблюдения.

Специальные обследования проводятся в случаях недостаточности данных для принятия обоснованного решения о техническом состоянии сооружения.

По срокам проведения обследования конструкций различают:

а) периодические обследования, сроки которых устанавливаются предприятием, исходя из интенсивности эксплуатации и предполагаемого технического состояния конструкций;

б) внеочередные обследования, связанные с технологическими отказами и авариями на данном или подобных предприятиях, стихийными бедствиями, а также когда техническое состояние конструкций нарушает технологический процесс (чрезмерные прогибы, колебания и вибрации конструкций и т.п.).

Относительно кожухов доменных печей и воздухонагревателей в [59] предусмотрены специальные сроки их обследования, которые приведены в таблице 19.1.

Таблица 19.1

Периодичность обследования
кожухов доменных печей и воздухонагревателей

Наименование	Полезный объем, м ³	Среднестатистический ресурс работоспособного состояния, лет	Периодичность освидетельствования		
			Осмотр комиссией	Сроки обследования специализированными организациями, лет	
				первичное	вторичное
Кожух доменной печи	До 750	14	2 раза в месяц	5	5
	930-1086	16	2 раза в месяц	5	5
	1513-1719	16	2 раза в месяц	5	5
	2000-2700	16	2 раза в месяц	5	5
	3000-3200	16	2 раза в месяц	5	5
	5580	Нет данных	2 раза в месяц	5	5
Кожух воздухонагревателя	Площадь нагрева, м ²				
	До 4000	30	1 раз в месяц	12	5
	4800-6500	25	1 раз в месяц	10	5
	Свыше 6500	25	1 раз в месяц	10	5

Проведение технической диагностики является многофакторной задачей и критерии, по которым оценивается состояния конструкций, формализуются только после выполнения комплекса мероприятий, в объем которых входят:

- натурный осмотр конструкций и освидетельствование их состояния;
- инструментальное исследование элементов конструкций и всего сооружения в целом;
- лабораторные и натурные испытания материалов и конструкций;
- поверочный расчет конструкций с учетом действующих и перспективных нагрузок и воздействий;
- составление заключения о состоянии конструкций и сооружения в целом;
- разработка предложений по ремонту и усилению конструкций, обеспечивающих безаварийную дальнейшую эксплуатацию;
- разработка рабочей документации на ремонт, усиление и модернизацию конструкций.

Особое внимание должно уделяться вопросам обеспечения надежной, безаварийной работы и надлежащего технического состояния кожухов технологических агрегатов, так как они выполняют основные технологические и строительные функции.

Для определения и оценки технического состояния кожухов доменных печей, воздухонагревателей и других агрегатов выполняется обследование конструкций с выявлением и регистрацией их дефектов и повреждений.

Устанавливаемые при этом параметры и методы их определения показаны в таблице 19.2.

Основные дефекты и повреждения, выявляемые при обследовании, и возможные их признаки, видимые при осмотре конструкций сооружений комплекса доменной печи, приведены в таблице 19.3.

Таблица 19.2

Параметры технического состояния конструкций

Параметры	Методы определения
1	2
Соответствие конструкций и футеровки рабочему проекту, требованиям нормативных документов	Натурный осмотр, изучение технической документации, актов приемки и испытания конструкций
Соответствие действительного режима работы агрегата (температура дутья, газов, дыма, отходящей воды, давление дутья, газов и др.) проектному режиму	Анализ записей в агрегатном журнале и, при необходимости, опрос персонала
Качество сварных швов, особенно в местах их пересечений, примыкания штуцеров, усиления вырезов и проемов в кожухе, усиливающих накладок и др.	Осмотр конструкций, анализ исполнительной документации и записей в агрегатном журнале, актов с результатами контроля сварных швов
Наличие трещин на внутренней поверхности кожуха воздухонагревателя, связанных с коррозионным растрескиванием под напряжением, преимущественно в околосшовных зонах купола и районов кожуха с высокой температурой	Ультразвуковой контроль сварных швов в зонах их пересечения, в местах изменения геометрии кожуха, расположения ребер, стесняющих свободную деформацию
Наличие трещин, выпучиваний и других деформаций конструкций, местных перегревов и повреждений, отклонения от проекта положения, толщины и состава компенсирующих слоев, системы охлаждения и т.п.	Осмотр конструкций, анализ актов приемки и записей в агрегатном журнале
Информация о проведенных ремонтах и реконструкциях	Анализ записей в агрегатном журнале и изучение технической документации
Фактическая температура кожухов и других конструкций, находящихся в условиях термических воздействий	Инструментальные средства по специально разработанной программе

Окончание таблицы 19.2

1	2
Соответствие свойств материалов футеровки проектным требованиям	Анализ исполнительной документации и актов приемки
Температура наружного воздуха и скорость ветра, при которых производился монтаж конструкций	Анализ актов приемки

Таблица 19.3

Основные дефекты и повреждения конструкций

Дефект или повреждение	Признак определения
1	2
Кожух доменной печи	
Нарушение формы поперечного сечения	Вмятины, выпуклости, волнообразование
Трещины и продувы	Выход газа и горение факелов на кожухе
Депланации в сварных стыках	Смещение кромок листов
Перегретые участки металла	Изменение цвета поверхности металла*
Общий перегрев кожуха	Образование волн с потерей устойчивости кожуха и (или) с его наклоном
Изменение положения кожуха в пространстве	Положение вертикальных газоходов и колонн колошниковой копра, ремонтных опор под вертикальные газоходы и балок колошниковой площадки относительно кожуха и колонн шахты
Коррозия металла и сварных швов	Корка продуктов коррозии или отдельные язвенные повреждения на поверхности металла, на швах и в околошовной зоне
Недостаточная величина компенсационного зазора в футеровке шахты	Подъем с изгибом мораторного кольца
Качество сварных швов	Внешний вид, недостаточная высота швов, подрезы, вырывы в основном металле, незаваренные кратеры

Продолжение таблицы 19.3

1	2
Кожух воздухоподогревателя	
Нарушение формы поперечного сечения	Вмятины, выпуклости, волны
Трещины и продувы	Выход воздуха с высоким уровнем шума
Перегретые участки металла	Изменение цвета поверхности металла *
Наклон кожуха (как правило, в сторону камеры насадки)	Разные зазоры между днищем и фундаментом, повреждения анкерных креплений и узлов сопряжения кожуха со штуцерами
Повреждения анкеров	Трещины и разрывы анкерных креплений
Депланации в сварных стыках	Смещение кромок листов
Коррозия металла и сварных швов	Корка продуктов коррозии или отдельные язвенные повреждения на поверхности металла и на швах
Качество сварных швов	Внешний вид, недостаточная высота швов, подрезы, вырывы в основном металле, незаваренные кратеры
Кожух пылеуловителя	
Нарушение формы поперечного сечения	Вмятины, выпуклости, волны
Трещины и продувы	Выход воздуха с высоким уровнем шума
Перегретые участки металла	Изменение цвета поверхности металла*
Недостаточная прочность опорных узлов оболочки	Деформации опорных ребер и вмятины оболочки в этом районе
Качество сварных швов	Внешний вид, недостаточная высота швов, подрезы, вырывы в основном металле, незаваренные кратеры
Недостаточная прочность опорных узлов копра отсекающего клапана	Деформации опорных ребер в узлах опирания колонн копра и вмятины оболочки в этом районе

Окончание таблицы 19.3

1	2
Наклонный мост	
Высокая деформативность моста	Ощутимые вибрации и колебания главных балок моста и, особенно, прикрепленных элементов лестниц и площадок
Нарушена геометрия путей и повреждены рельсы и их стыки	Частые сходы с путей скипов
Нарушена изгибная ось главных балок	Частые сходы с путей груженого скипа
Нарушена геометрия или конструкция путей на опрокидывающей части моста	Застревание скипа при его опрокидывании или выходе из него
* Температуру, до которой нагревался металл, ориентировочно определяют по соответствующему ей цвету остывшей поверхности металла, так называемому цвету «побежалости». На поверхности стали до появления красного свечения видны желтые, синие или радужные цвета в зависимости от изменения толщины появившейся окисной пленки. В табл.19.4 показано ориентировочное соответствие этих параметров температуре нагрева.	

Таблица 19.4

№ п/п	Цвет металла	Температура нагрева, °C
1	Соломенный	220
2	Золотистый	230
3	Коричневый	240
4	Красно-коричневый	250
5	Пурпурный	260
6	Фиолетовый	280
7	Синий (васильковый)	300
8	Светло-голубой	320
9	Светло-серый	330-350

Оценку воздействия высокой температуры на сталь можно производить и по внешнему виду поверхности конструкции.

В таблице 19.5 [58] приведены рекомендации по определению уровня температурного воздействия и возможной дальнейшей эксплуатации конструкции.

Таблица 19.5

Внешние признаки	Режим температурных воздействий	Результаты испытания на твердость	Заключение об использовании	Проверка твердости
Участок мало деформирован и имеет на поверхности легко очищаемый нагар и обгоревшую кромку	Непродолжительное при температуре 400 – 600°C	Твердость соответствует марке стали	Используется без ограничений	Допускается не производить
Участок мало деформирован и имеет на поверхности нагар и тонкий трудно очищаемый слой окалины	Непродолжительное при температуре 700 – 900°C	Твердость соответствует марке стали	Используется без ограничений с запрещением горячей обработки	Проверяется в отдельных случаях
Участок мало деформирован и имеет отслаивающийся местами слой окалины	Непродолжительное при температуре свыше 900°C	Твердость снижена на 15%	Используется с ограничением несущей способности на 75%	Обязательна
Участок сильно деформирован и имеет толстый слой окалины	Длительное при температуре свыше 900°C	Твердость снижена на 30% и более	Не пригоден	
Участок сильно деформирован и имеет изломы, надрывы, оплавленные и пережженные участки	Длительное при температуре около 1400°C	Твердость снижена на 30% и более	Не пригоден	

Оценка защитных свойств существующего антикоррозионного покрытия производится визуально по внешнему виду, оценивается по площади и степени разрушения в баллах в соответствии с ГОСТ 9.407-84 (табл. 19.6).

Таблица 19.6

Балл по ГОСТ 9.407- 84	По площади разрушенного покрытия, % при наличии		По размерам разрушенного покрытия	
	отслаивания	коррозии металла	глубина отслаивания	диаметр коррозионных очагов, мм
1	Разрушение отсутствует			
2	До 5	До 1	Разрушение внешнего слоя видимое при уве- личении в 10 раз	До 0,5
3	5 – 25	1 – 5	Разрушение внешнего слоя, видимое невоору- женным глазом	0,5 – 1,0
4	25 – 50	5 – 15	Разрушение грун- товочного слоя	1,0 – 3,0
5	Свыше 50	Свыше 15	Разрушение до окрашиваемой поверхности	Свыше 3,0

Покрытие не должно иметь пропусков, трещин, пузырьков, морщин и других дефектов, влияющих на защитные свойства.

Степень очистки металла от окалины, ржавчины и старых слоев краски определяется требованиями к поверхности, в зависимости от планируемой системы восстановления покрытия и в соответствии с ГОСТ 9.402-2004 (табл. 19.7).

Таблица 19.7

Степень подго- товки поверх- ности перед ремонтным окрашиванием	Удаление загрязнений и продуктов	Характеристика подготовленной поверхности
1	2	3
I	Полное удаление старого лакокрасочного покрытия и продуктов коррозии	Удаление окислов до второй степени (не видны невоору- женным глазом). Дальней- шая подготовка поверхности проводится как для вновь изготавливаемых изделий

Окончание таблицы 19.7

1	2	3
II	Удаление старого лакокрасочного покрытия, ржавчины, отстающей большими кусками, окалины	На поверхности конструкции остаются: прочно прилегаю- щий несплошной слой грунтовки, отдельные точки ржавчины, небольшие куски окалины, плотно прилегаю- щие к основе, и легкий налет с ржавым оттенком в ранее прокорродированных местах
III	Удаление местных повреждений старого лакокрасочного покрытия, отстающего от основы	На поверхности конструкции остается неповрежденное лакокрасочное покрытие, плотно прилегающее к основе

§19.4. Оценка технического состояния конструкций и сооружений

Общая оценка технического состояния здания или сооруже-
ния, выполненная по результатам диагностики, служит основным
критерием для определения степени их надежности и долго-
вечности, выявления необходимости и объемов ремонта и
усиления, пригодности их для дальнейшей эксплуатации. Она
принимается по нормативным документам, в частности [20], в
зависимости от технического состояния отдельных конструкций,
входящих в состав сооружения.

В трактовке [79] процесс деградации конструктивного эле-
мента мостового сооружения на протяжении жизненного цикла
состоит из 5-ти дискретных состояний, приведенных в таблице
19.8.

Поскольку основной показатель технического состояния
элемента – его надежность в процессе эксплуатации, представ-
ляется одинаковым для мостовых переходов и промышленных
сооружений, можно считать идентичным и процесс деградации
элементов конструкций этих сооружений.

Таблица 19.8

Дискретное состояние	Характеристика
Исправное	Элемент отвечает всем требованиям проекта и действующих норм
Ограниченно исправное	Элемент частично отвечает требованиям действующих норм, но не нарушаются требования ни первой, ни второй групп предельных состояний
Работоспособное	Элемент частично отвечает требованиям проекта и действующих норм, однако не нарушаются требования первой группы предельных состояний, если не ограничивается нормальное функционирование сооружения
Ограниченно работоспособное	Элемент эксплуатируется в ограниченном режиме и требует специального контроля его состояния. Необходим капитальный ремонт
Неработоспособное	Элемент имеет признаки нарушений требований первой группы предельных состояний его невозможно использовать, и возникает необходимость прекращения эксплуатации элемента

В связи с этим, в соответствии с [20] техническое состояние конструктивных элементов классифицируется следующим образом:

исправное – все элементы удовлетворяют требованиям проекта и действующих нормативных документов;

работоспособное – при частичном отступлении от требований проекта и действующих норм, но без нарушений требований по предельным состояниям первой группы и при таких нарушениях требований предельных состояний второй группы, которые в конкретных условиях не ограничивают нормальное функционирование производства;

ограниченно работоспособное – в случаях, когда для обеспечения функционирования производства необходимо контролировать состояние конструкций, продолжительность их эксплуатации или параметры технологических процессов;

аварийное – при имеющемся нарушении (или невозможности в течение прогнозируемого срока предотвратить нарушение) требований по предельным состояниям первой группы.

С учетом приведенной классификации оценок технического состояния отдельных конструктивных элементов в [21] приняты пять ступеней оценок общего состояния здания или сооружения:

хорошее – конструкции, в основном, исправны, моральный износ не проявляется;

удовлетворительное – конструкции находятся в исправном и работоспособном состоянии, моральный износ не проявляется;

неудовлетворительное – конструкции находятся, в основном, в работоспособном и ограниченно работоспособном состоянии, имеются элементы, находящиеся в неработоспособном состоянии;

крайне неудовлетворительное – работоспособность конструкций утрачена, но общее предельное состояние не достигнуто и может быть предотвращено путем введения ограничений;

аварийное – работоспособность конструкций утрачена, имеется угроза обрушения.

При определении общей оценки технического состояния здания или сооружения учитываются обнаруженные дефекты и повреждения, их характер, количество и оценивается ориентировочный процент физического износа. Оценка влияния отдельных дефектов и повреждений производится с учетом динамики их развития по результатам предыдущих обследований и длительных наблюдений.

По степени опасности дефектов и повреждений и их значимости для работоспособности сооружения в целом они подразделяются на три категории – А, Б и В:

категория А – дефекты и повреждения особо ответственных элементов и соединений, представляющие непосредственную опасность разрушения;

категория Б – дефекты и повреждения, не представляющие в момент обнаружения непосредственной опасности для конструкции, но могут в дальнейшем вызвать повреждение других элементов (узлов, соединений) и при развитии перейти в категорию А;

категория В – дефекты и повреждения, не относящиеся к категориям А и Б и наличие которых не связано с угрозой разрушения.

С учетом наличия указанных дефектов и повреждений и степени их соответствия допустимым значениям или их превышения, устанавливается общая оценка технического состояния зданий и сооружений.

§ 19.5. Контроль фактического напряженного состояния конструкций

Уровень напряженно-деформированного состояния конструкций доменного комплекса является обобщающим критерием их прочности и работоспособности, а также оценки ведения технологического процесса.

Как уже отмечалось, характер и величина внутренних нагрузок и воздействий, действующих на кожух доменной печи, зависят от длительности эксплуатации печи, этапа технологического процесса и режима его ведения, принимая во внимание, что при резком нарушении технологического процесса эти факторы могут радикально изменяться как по величине, так и району возникновения.

Поэтому установление фактических условий работы конструкций является одним из важнейших мероприятий по обеспечению длительной и надежной эксплуатации сооружения, а также своевременному выявлению возможности возникновения опасных состояний и аварийных ситуаций. Такие наблюдения особенно важны для конструкций технологических агрегатов, где напряженно-деформированное состояние нестабильно, изменяется во времени и связано с характером ведения технологического процесса.

Отслеживание динамики изменения параметров напряженно-деформированного состояния позволяет вовремя формулировать предложения по корректировке расчетных схем или изменению режима работы.

Наиболее напряженными зонами кожуха печи являются зоны максимальных температур, внутреннего давления и массы материалов плавки. К таким зонам в первую очередь относятся лещади, горн, фурменная зона.

Так, в зонах горна, лещади и расположения фурменных приборов внутренняя температура достигает наибольших значений – до 1200 – 1400° С, а разгары футеровки, «вымывание» блоков и кладки лещади увеличивают воздействия на кожух и усугубляют его напряженное состояние. Особенно заметен высокий уровень

напряжений в районе горна и лещади на 35 – 40 сутки после задувки печи с дальнейшей их стабилизацией и последующим постепенным снижением. В среднем, по результатам расчетов и измерений, уровень напряжений в этих зонах достигает 200 – 240 МПа, а радиальное расширение кожуха при максимальных напряжениях характеризуется величиной 8 – 10 мм.

Изменение статической схемы и нагрузок на кожух в процессе эксплуатации можно рассмотреть на примере лещади.

Вначале кампании печи, когда кладка цела и верхние ряды кладки лещади еще не всплыли, самые высокие напряжения в металле кожуха отмечаются в верхней наиболее нагретой зоне лещади. Однако, по мере разрушения кладки, всплытия ее верхних рядов и образования ямы разгара зона высоких температур опускается ниже в сохранившиеся слои массива. При этом температурный распор в верхней зоне уменьшается с одновременным его ростом в нижней зоне кожуха лещади.

Аналогичная изменчивость нагрузок наблюдается и в воздухонагревателях. Так, со временем меняются физико-механические свойства огнеупоров, материалов компенсирующих слоев и др. Меняются также величины зазоров и возможности их дальнейшего закрытия.

При капитальном ремонте воздухонагревателя с заменой кожуха и сохранением футеровки радикально меняются характер и величина нагрузок на кожух, что связано с ограниченными возможностями деформирования материалов компенсирующих слоев при повторных разогревах.

Отдельный вопрос – ввод в эксплуатацию доменной печи после капитальных ремонтов II разряда, которые, как правило, проводятся без предварительного выпуска жидкого чугуна, так называемого «козла», скопившегося в объеме разгара лещади. Известно, что при бесконтрольном разогреве этот чугун может создавать неформализованные воздействия на кожух, приводящие в некоторых случаях к его разрушению.

В связи с нестабильностью нагрузок и воздействий актуальным является длительное наблюдение за работой кожухов эксплуатирующихся доменных печей и воздухонагревателей с целью своевременного выявления и предупреждения критических

ситуаций, способных привести к повреждению металлоконструкций. Длительный непрерывный контроль состояния кожуха позволяет отслеживать рост напряжений, своевременно фиксировать их предельные значения и до стабилизации напряженного состояния принимать технологические меры по снижению нагрузки на кожухи, исключая возникновение «пиковых» напряжений, и тем самым избежать таких ситуаций. Контроль также обеспечивает вывод печи на стабильный режим работы с минимальными механическими напряжениями.

Наиболее ответственным периодом работы воздухонагревателей с точки зрения обеспечения длительной прочности является их разогрев. На этом этапе происходит выгорание и заполнение проектных зазоров в кладке, ее обжатие высоким внутренним давлением на кожух с соответствующим уровнем напряжений в футеровке. При отсутствии контроля напряжений в кожухе это может привести к необратимым процессам в кладке, ее повреждениям и непроектным воздействиям на кожух. Для исключения таких ситуаций эффективно применение так называемого «поддува» воздухонагревателя. Он состоит в том, что при зафиксированных высоких напряжениях в кожухе в процессе разогрева внутрь агрегата периодически подается дутьевой воздух под давлением, что приводит к радиальному деформированию кожуха с увеличением его диаметра и беспрепятственному подъему – «проскальзыванию по кладке» с соответственным снижением уровня напряжений.

Организация контроля напряжений в кожухе воздухонагревателя во время его разогрева и подачи дутья позволяет выявить необходимость этой операции и определить время ее выполнения, что имеет особое значение при повторных разогревах воздухонагревателей после их ремонтов.

§ 19.6. Определение действительного напряженного состояния кожухов агрегатов

Проведение измерений на агрегатах доменного комплекса представляет собой достаточно сложную задачу. Это определяется многими факторами и, в частности, специфическими условиями

эксплуатации и связанными с ними требованиями, предъявляемыми к контрольно-измерительной аппаратуре.

Контроль состояния кожухов осложняется тем, что контролируемая поверхность одного агрегата исчисляется сотнями квадратных метров, а также невозможностью доступа к их внутренней поверхности.

Процесс оценки напряженного состояния эксплуатируемых конструкций более сложный, так как одной из основных проблем здесь является определение начальных (нулевых) напряжений, т.е. напряжений, существующих в конструкции до момента проведения измерений. Напряжения, измеренные под нагрузкой, как приращения к нулевым значениям, соответствуют действующему уровню напряжений.

Измерения, проводимые при помощи различного рода тензометрических приборов, дают лишь информацию о приращении напряжений и деформаций по отношению к некоторому исходному, нулевому состоянию, соответствующему моменту снятия начальных отсчетов. В случае, когда состояние конструкции близко к ненапряженному, измеряемые приращения напряжений и деформаций близки к действительному напряженно-деформированному состоянию.

Существует ряд методов контроля, которые дают возможность получить оценку действующих напряжений в конструкциях, находящихся под нагрузкой. Все они обладают определенными недостатками и не нашли широкого применения на практике, так как большинство из них ограничиваются анализами физико-механических свойств металла и его химического состава.

В институте «Днепропроектстальконструкция» (г. Днепропетровск) под руководством инженера С.М. Родова разработан так называемый метод «обезгруживания», позволяющий ориентировочно оценить уровень действующих напряжений в кожухе технологического агрегата, находящегося в поле напряжений. В основе этого метода лежит представление о том, что напряженно-деформированное состояние конструкции включает напряжения от эксплуатационных нагрузок и напряжения, возникшие при изготовлении конструкции, сварке и ее монтаже.

Метод «обезгруживания» состоит в том, что после серии измерений в различных режимах работы участок кожуха, содержащий точку измерений, вырезается механическим инструментом, практически исключаям наклеп металла в месте реза. После вырезки и извлечения участка происходит его разгрузка и снимаются напряжения, действующие при эксплуатации. Оставшиеся напряжения имеют самоуравновешенную эпюру и в расчет не принимаются.

Таким образом, показания тензометрических приборов, измеряющих деформации на обезгруженном участке, принимаются как начальные (нулевые), соответствующие отсутствию напряженного состояния. Добавки, полученные при измерениях на кожухе работающего агрегата, определяют действительное напряженное состояние кожуха агрегата в контролируемых точках.

Указанный метод неоднократно применялся для оценки уровня напряженно-деформированного состояния кожухов воздухонагревателей при переводе их на повышенные эксплуатационные параметры.

При диагностике напряженно-деформированного состояния агрегата с момента его пуска, когда начальные (нулевые) отсчеты могут быть получены до нагружения или нагрева конструкции без выполнения сложных мероприятий по вырезке и обезгруживанию, задача значительно упрощается. В этом случае необходимо только измерить приращения деформаций и в увязке с начальными отсчетами можно получить уровень напряженно-деформированного состояния в контролируемой точке.

Для таких ситуаций существует значительное количество способов, приборов и аппаратуры, позволяющих достаточно объективно оценить динамику деформации конструкции под нагрузкой. Однако для условий доменного комплекса все они имеют ряд недостатков и не в состоянии обеспечить длительный контроль параметров.

В связи с этим была разработана переносная аппаратура и приборы, в большей степени отвечающие условиям работы в действующем доменном цехе и позволяющие с помощью визуального снятия отсчетов получать информацию в течение относительно длительного периода времени.

В институте «Днепропроектстальконструкция» разработаны длиннобазные тензометрические устройства – ДТУ, которые в наибольшей степени отвечают требованиям эксплуатации в условиях работы доменной печи. Они позволяют производить измерения на большой базе (порядка 2 м) и практически исключают составляющую местных изгибных деформаций от несовершенств кожуха. Таким образом, установка ДТУ только на наружной поверхности кожуха позволяет с достаточной точностью оценить осевые составляющие напряжений.

При определении мест установки ДТУ следует иметь в виду, что проведенные ранее исследования показали наличие наибольших напряжений на границах изменения материалов и конструкции футеровки.

Комплект ДТУ (рис.19.1) состоит из двух датчиков Т1 и Т2, устанавливаемых в каждой точке для измерения деформаций по направлениям главных напряжений. Датчик Т1, имеющий базу $l_1 = 2$ м, устанавливают горизонтально. С его помощью производят измерение линейных деформаций в кольцевом направлении. Датчик Т2, имеющий базу измерений $l_2 = 1$ м, устанавливают вертикально и измеряют линейные деформации в меридиональном направлении – вдоль образующей поверхности кожуха.

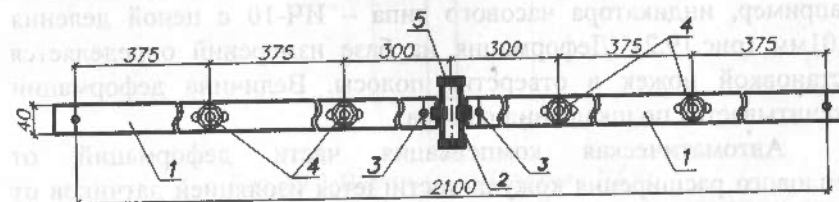


Рис. 19.1. Горизонтальный датчик ДТУ:

1 – гибкие стальные полосы; 2 – пружинный хомут; 3 – отверстия для измерений; 4 – прижимное устройство; 5 – рамка хомута

Конструкция ДТУ проста в изготовлении и обеспечивает надежность измерений при длительных наблюдениях за агрегатами. Точность измерений с помощью ДТУ существенно увеличена по сравнению с другими способами вследствие уменьшения относительной погрешности при измерениях на

большой базе. ДТУ, как отмечалось, нечувствительны к местному изгибу, связанному с несовершенством геометрической формы кожуха.

Конструкция ДТУ автоматически компенсирует деформации кожуха, вызываемые изменением температуры агрегата и внешней среды, что позволяет не увязывать измерение деформаций кожуха с изменениями температуры внешней среды и упрощает определение напряженного состояния кожуха по измеренным деформациям.

Датчик Т1 состоит из двух гибких стальных полос, имеющих общую ось. Полосы своими дальними концами прикреплены к кожуху. Места крепления определяют базу измерений, которая равна 2100 мм. Ближние концы полос, расположенные около середины базы, стянуты пружинным хомутом, состоящим из двух стержней $\varnothing 4$ мм, соединенных по оси датчика болтовым шарниром. Введение шарнира на траверсе повышает деформативность хомута, обеспечивая практическое постоянство натяжения полос в пределах ожидаемых деформаций кожуха агрегата.

Прижимные устройства фиксируют положение полосы, прижимая ее к кожуху.

Датчик Т2 имеет такую же конструкцию. Измерение деформаций производится с помощью измерительного устройства, например, индикатора часового типа – ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм (рис. 19.2). Деформация на базе измерений определяется установкой ножек в отверстия полосы. Величина деформации отсчитывается по шкале индикатора.

Автоматическая компенсация части деформаций от теплового расширения кожуха достигается изоляцией датчиков от внешних воздействий, например, наклейкой асбестового картона.

Для периодического снятия показаний датчиков и определения напряженного состояния применяют также оптические приборы. В частности, можно отметить специально разработанные оптические компараторы, в которых на станине на базе 210 мм неподвижно закреплены два микроскопа, состоящие из объективов и окуляров. В одном окуляре помещена неподвижная измерительная сетка, а в другом – шкала с отсчетным устройством.

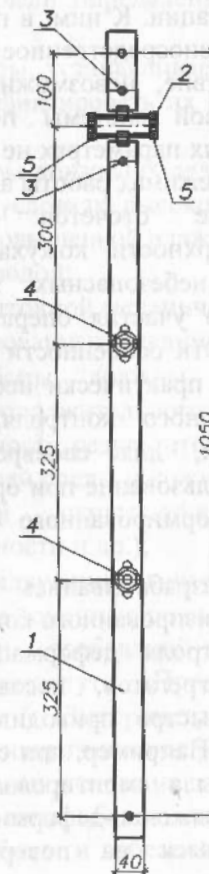


Рис. 19.2. Вертикальный датчик ДТУ:

1 – гибкие стальные полосы; 2 – пружинный хомут; 3 – отверстия для измерений; 4 – прижимное устройство; 5 – рамка хомута

§ 19.7. Автоматизированные системы диагностики напряженно-деформированного состояния кожухов агрегатов

Эпизодический контроль напряжений кожухов доменных печей и воздухонагревателей, производимый в основном при пусковой раздувке в течение короткого времени, имеет ряд существенных недостатков, которые ограничивают возможность

контроля при их эксплуатации. К ним, в первую очередь, следует отнести визуальное непосредственное снятие результатов измерений и, как следствие, невозможность создания на этой основе автоматизированной системы получения непрерывной информации об измеряемых параметрах не только при раздувке, но и при эксплуатационных режимах работы агрегатов.

Визуальное снятие отсчетов показаний приборов, расположенных по поверхности кожуха, требует выполнения верхолазных работ в небезопасных зонах с повышенной загазованностью, а также участия операторов в течение всего периода контроля и т.п. Эти особенности в большинстве случаев делают затруднительным, практически неосуществимым, ведение систематического регулярного контроля, в том числе и в нестандартных ситуациях, для своевременного и быстрого принятия мер, т.е. их использование при организации длительного контроля напряженно-деформированного состояния конструкций невозможно.

В разное время разрабатывались и устанавливались на агрегатах системы автоматизированного контроля, использовавшие различные приборы контроля деформаций. Однако, тяжелые условия эксплуатации агрегатов, несовершенство первичной аппаратуры достаточно быстро приводили к выходу из строя приборов и всей системы. Например, при строительстве доменной печи объемом 5000 м³ была смонтирована автоматизированная система контроля напряженно-деформированного состояния кожуха печи, базировавшаяся на поверхностных контактных термопарах, которая вышла из строя в первые же дни эксплуатации печи в результате неприемлемых для приборов условий работы.

В то же время необходимость создания такой системы обусловлена целым рядом факторов, среди которых тенденция к проведению капитальных ремонтов доменных печей второго и даже первого разряда с полным или частичным использованием существующего кожуха, а также использование кожухов воздухонагревателей с полной или частичной заменой футеровки и с сохранением кожуха. Имеются и другие предпосылки к ее созданию, в том числе и возможность включения такой системы в качестве подсистемы в АСУТП, которой оснащаются все доменные печи.

В связи с этим были определены основные требования к системе:

- первичные приборы, устанавливаемые на наружной поверхности кожуха, должны фиксировать их «нулевые» показатели при отсутствии нагрузки;
- первичные приборы должны обладать длительной работоспособностью в сложных условиях высокой загазованности среды и высокой температуры, повышенной влажности и непосредственного длительного контакта с водой;
- обеспечение достаточной механической прочности приборов на случай несанкционированных механических воздействий;
- первичные приборы должны сохранять стабильность показаний в течение продолжительного времени (1 год и более) и обеспечивать независимость результатов измерений от изменения температуры окружающей среды и кожуха в интервале 20 – 150°С, вредных воздействий окружающей среды (влажности, температуры, загазованности и др.);
- возможность ее включения в качестве подсистемы в АСУТП, которой оснащаются все доменные печи.

С учетом указанных требований и в развитие этого направления в проектно-институте «Промспецпроект» корпорации «Промстальконструкция» (г. Днепропетровск) впервые разработана система диагностики напряженно-деформированного состояния кожуха доменной печи, основанная на датчиках – преобразователях деформаций струнного типа, обладающих высокой стабильностью и надежностью в работе и обеспечивающих дистанционный контроль измеряемых параметров (автор системы и руководитель работ к.т.н. З.А.Шульман) [88].

Системы были установлены после капитальных ремонтов I разряда на доменной печи объемом 5000 м³ в 2003 г. и на доменной печи объемом 2700 м³ в 2008 году. Они обеспечили диагностирование прочности кожухов во всех режимах и периодах работы – от пусковой раздувки до выхода на заданный режим и в последующий период эксплуатации.

Основой системы является разработанный «Программно-технический комплекс» (ПТК) автоматизированной диагностики напряженно-деформированного состояния кожуха печи, который

может функционировать как в автономном автоматическом режиме, так и входить в качестве подсистемы в АСУТП доменной печи.

В состав ПТК входят следующие компоненты:

1. Датчики (преобразователи) линейных деформаций струнные, измерительные, накладные ПЛДС-400 для измерения кольцевых и меридиональных деформаций.
2. Датчики (преобразователи) взаимных перемещений ПЛПС-20 для измерения радиальных перемещений (деформаций) кожуха.
3. Многоканальный программируемый терминал (МПТ) для подключения рабочих и резервных преобразователей.
4. Комплектующие кабели, коммуникационные шкафы и др.
5. Программное обеспечение для управления терминалом, считывания с него информации, первичной обработки результатов измерения и формирования базы данных.

В программно-технический комплекс входят также контроль температуры кожуха и струны преобразователей для исключения погрешностей измерений, вызванных разностью этих температур.

Датчики устанавливаются до начала раздувки печи на холодном кожухе с фиксированием начальных (нулевых) отсчетов на представительских участках, позволяющих судить об общем уровне напряженно-деформированного состояния кожуха. Для их защиты от случайных механических повреждений предусмотрено устройство специальных защитных кожухов, предотвращающих прямое попадание в преобразователи пыли, воды и т.п.

Датчики не требуют обслуживания в период эксплуатации. При выходе преобразователя из строя он подлежит замене с соответствующей корректировкой исходных данных.

Принцип действия струнного преобразователя состоит в изменении частоты собственных колебаний струны при ее деформации и изменении в ней напряжений. Если концы струны закрепить на исследуемой конструкции, например, на кожухе агрегата, в котором имеются механические напряжения, то возникшие под действием этих напряжений удлинения участка кожуха (базы измерения) будут сообщены струне. На основании этого, измеряя изменение собственной частоты поперечных колебаний струны, можно определить относительное удлинение материала конструкции, к которой прикреплена струна.

При изменении температуры конструкции, на которой закреплен струнный преобразователь, имеет место термическое удлинение базы, определяемое величиной линейного коэффициента теплового расширения материала. Так как преобразователь прочно закреплен на конструкции и его чувствительный элемент (струна) обладает значительно меньшей жесткостью, то относительное удлинение базы, обусловленное изменением температуры, полностью передается преобразователю. При этом если коэффициент теплового расширения чувствительного элемента преобразователя не отличается от коэффициента теплового расширения материала конструкции, если преобразователь и конструкция нагреваются до одинаковой температуры, т.е. находятся в одном температурном поле, то изменение температуры кожуха не будет оказывать влияния на результат измерения.

Таким образом, применение для измерения деформаций струнных преобразователей практически полностью компенсирует изменение температуры.

Программное обеспечение позволяет получать информацию в автоматическом режиме одновременно по всем установленным преобразователям в любой заданной временной системе, а также по индивидуальному запросу.

Обработка и отображение результатов измерений осуществляется на машинном носителе с построением необходимых таблиц, графиков и отображением сигнальных предупреждений о критической ситуации.

На участках, где расположены струнные датчики, смонтированы поверхностные термодпары для контроля температуры кожуха, а также датчики горизонтальных деформаций кожуха печи, контролирующие изменение величины радиуса кожуха печи.

Технические характеристики измерительных преобразователей обеспечивают измерение и долговременный контроль напряжений в диапазоне $-50 \dots +500$ МПа при температуре кожуха до 150°C и перемещений $0 \dots 20$ мм при температуре окружающей среды до 70°C .

Сбор и первичная обработка информации, поступающей от датчиков деформаций и перемещений, осуществляется в автоматическом режиме непрерывно или по запросу оператора многоканальным программируемым терминалом, разработанным

на основе промышленного микроконтроллера. Терминал работает под управлением центрального компьютера АСУТП доменной печи и обеспечивает ввод и запоминание измерительной информации по введенной в него программе. Кроме того, терминал обеспечивает диагностику его основных узлов, состояние линий подключений и исправность преобразователей на основе анализа разброса их показаний. По команде центрального компьютера в текущий момент времени терминал опрашивает в определенной последовательности все преобразователи и передает данные текущего опроса. Время опроса одного датчика 2 с, режим работы – круглосуточный, непрерывный.

Системы успешно работают с момента пуска доменных печей и показали весьма высокую надежность и стабильность.

Учитывая работу систем в автоматизированном режиме и возможность включения их в АСУТП, они могут использоваться при организации длительного контроля напряженно-деформированного состояния кожухов агрегатов и других конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анализ аварий металлоконструкций и состояние кожухов доменных печей.* Отчет и НИР. – Днепропетровск: ВНИИмехчермет, 1978. – 96 с.
2. *Андоньев С.М., Филиппов О.В., Кудинов Г.А.* Охлаждение доменных печей. – М.: Metallurgy, 1972. – 386 с.
3. *Байшев Ю.П.* Доменные печи и воздухонагреватели (конструкции, эксплуатационные воздействия, свойства материалов, расчеты). – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 1996. – 993 с.
4. *Байшев Ю.П., Дробышевский Н.И., Филиппов А.С.* Расчет напряжений и деформаций при ручной многопроходной сварке кожуха доменной печи. Деп. в ВИНТИ. – М.: 1995. – № 2892-В95. – 33 с.
5. *Байшев Ю.П., Филиппов А.С.* Расчет остаточных напряжений при стыковой автоматической сварке толстых стальных листов. Деп. в ВИНТИ. – М.: 1996. – № 2621-В96. – 19 с.
6. *Байшев Ю.П., Наседкин В.И., Кожин В.И.* Расчетная оценка статической и циклической трещиностойкости кожухов доменных печей и воздухонагревателей. Деп. в ВИНТИ. – М.: 1995. – № 2891-В95. – 19 с.
7. *Байшев Ю.П., Наседкин В.И.* Расчет НДС кожухов доменных печей и воздухонагревателей в зонах концентрации напряжений. Деп. в ВИНТИ. – М.: 1996. – № 851-В96. – 17 с.
8. *Байшев Ю.П., Наседкин В.И.* Динамические нагрузки от осадки шихты в доменной печи // Промышленное и гражданское строительство. – 1995. – № 11. – С. 40-41.
9. *Байшев Ю.П., Наседкин В.И.* Нагрузки на доменную печь от температурного распора наклонного газохода // Промышленное и гражданское строительство. – 1996. – № 1. – С. 28.
10. *Волоков Ю.П., Бабушкин Н.М., Носенко В.Н. и др.* Анализ простоев доменных печей по отрасли. – М.: Черметинформация, 1981. – 40 с.
11. *Востров В.К.* Трещиностойкость и долговечность кожухов доменных печей и воздухонагревателей // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 11. – С. 40-43.

12. Гейченко В.Н., Любин А.Е., Сацкий В.А. и др. К вопросу о материалах для кожухов доменных печей // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1984. – № 3. – С. 4-5.
13. Гейченко В.А., Любин А.Е. и др. Материал кожухов воздухонагревателей и воздухопроводов доменных печей // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1984. – № 4. – С. 17-18.
14. Горицкий В.М., Кулемин А.М. Восстановление механических свойств стали 09Г2С кожуха доменной печи // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2005. – № 5. – С. 4-16.
15. Горицкий В.М. Тепловая хрупкость стали. – М.: *Металлургия*, 2007. – 381 с.
16. Горицкий В.М., Шнейдеров Г.Р., Малов В.П. Причины трещинообразования в куполе воздухонагревателя доменной печи // *Безопасность труда в промышленности*. – 2008. – № 11. – С. 21-22.
17. Грацилев В.М., Любин А.Е., Миллер В.Я. Реконструкция, ремонт и техническая эксплуатация стальных конструкций доменной печи. – М.: *Металлургия*, 1984. – 128 с.
18. Графский И.Ю., Данилов М.П., Казакевич М.И., Любин А.Е., Тюленев С.Д. Аэродинамические коэффициенты для пакетов труб промышленного назначения // *Строительство трубопроводов*. – 1973. – № 2. – С. 18-20.
19. Грудев Т.Д., Востров В.К., Галыбин А.Н. Трещинообразование в кожухах доменных печей и воздухонагревателей от локального нагрева // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 1982. – № 1. – С. 21-22.
20. ДБН 362-92 Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що експлуатуються.
21. ДБН В.1.2 – 2:2-2006 Навантаження і впливи.
22. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. *Металлургия чугуна*. – К.: Вища школа, 1974. – 486 с.
23. Иосилевич Е.С. Аналіз критеріїв оцінки напружено-деформованого стану самонесучого кожуха доменної печі великого об'єму // *Будівництво України*. – 2006. – № 7. – С. 41-44.
24. Инструкция по обследованию и ремонту воздухонагревателей доменных печей / Отчет о НИР. – Днепропетровск: ДнепроПСК-ЦИПСК, 1968. – 22 с.

25. Исследование работы кожуха высокотемпературного воздухонагревателя № 4 доменной печи № 10 метзавода им. Дзержинского / Отчет о НИР. – Днепропетровск: ДнепроПСК, 1971. – 229 с.
26. Исследование работы кожуха воздухонагревателя с выносной камерой горения доменной печи № 9 Криворожского метзавода / Отчет о НИР. – Днепропетровск: ДнепроПСК, 1976. – 163 с.
27. Исследование напряженного состояния воздухонагревателей № 5 и № 6 метзавода «Азовсталь» / Отчет о НИР. – Днепропетровск: ДнепроПСК, 1975. – 139 с.
28. Исследование работы анкерных креплений воздухонагревателей доменных печей / Отчет о НИР. – М.: ЦНИИПСК, 1970. – 64 с.
29. Исследование действительной работы высокотемпературных воздухонагревателей с шаровой насадкой / Отчет о НИР. – Днепропетровск: ДнепроПСК, 1989. – 81 с.
30. Исследование причин разрушения кожухов доменных печей воздухонагревателей и газопроводов. Разработка рекомендаций по увеличению их долговечности и ремонтнопригодности / Отчет о НИР. – М.: ЦНИИПСК, 1981. – 100 с.
31. Исследование действительной работы и разработка рекомендаций по совершенствованию конструкций шахт доменных печей из крупноблочных охлаждаемых панелей со стальными толстостенными трубами и гидростойким бетоном / Отчет о НИР. – Днепропетровск: ДнепроПСК, 1989. – 46 с.
32. Казакевич М.И., Любин А.Е. Проектирование металлических конструкций надземных промышленных трубопроводов. – К.: Будівельник, 1980. – 144 с.
33. Расчет трубопроводов на прочность: Справочник / Камерштейн А.Г., Рождественский М.Н., Ручимский М.А. – М.: Недра, 1969. – 440 с.
34. Кандаков Г.П. Исследование конструкций воздухопроводов горячего дутья доменной печи. Автореф. канд. дис. М., 1974. – 34 с.
35. Кикин А.И., Васильев А.А., Кошутин Б.Н. Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий. – М.: Стойиздат, 1969. – 415 с.
36. Корнеев М.М. Стальные мосты. – К.: ВАТ «Мостобуд», 2003. – 546 с.

37. Кудинов Г.А., Лысенко Е.Е. Надежность работы горна и лещади со временных доменных печей. – М.: Черметинформация. – 1980. – Сер. 4. – Вып. 2. – 65 с.
38. Леонидов Н.К. Сооружения и оборудование доменных цехов. – М.: Metallurgizdat, 1955. – 400 с.
39. Лессиг Е.Н., Лилеев А.Ф., Соколов А.Г. Листовые металлические конструкции. – М.: Изд-во по стр-ву, 1970. – 488 с.
40. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1976. – 408 с.
41. Любин А.Е., Сафронков В.Ф., Крейндель А.Л., Тюленев С.Д. Стальные конструкции надземного трубопровода большого диаметра // Промышленное строительство. – 1967. – № 11. – С. 28-29
42. Любин А.Е. О типизации конструктивных деталей трубопроводов // Промышленное строительство. – 1968. – № 6. – С. 12-15.
43. Любин А.Е., Сафронков В.Ф. Зависимость предельных прогибов надземных трубопроводов от их уклонов // Промышленное строительство. – 1968. – № 12. – С. 39-40.
44. Любин А.Е., Сафронков В.Ф. Расчет опорных колеи жесткости трубопроводов больших диаметров // Строительство трубопроводов. – 1969. – № 2. – С. 19-21.
45. Любин А.Е. Упрощенный сальниковый компенсатор для негабаритных трубопроводов // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 1970. – № 3. – С. 18-19.
46. Любин А.Е. О предельном состоянии изгибаемых трубопроводов низкого давления // Строительная механика и расчет сооружений. – 1972. – № 2. – С. 64-65.
47. Любин А.Е., Сафронков В.Ф. Металлические конструкции нового воздушонагревателя доменной печи // Сталь, Metallurgiya. – 1976. – № 2. – С. 112-113.
48. Любин А.Е., Шаломов Б.Я. Работа воздушонагревателей в оптимизированном режиме // Сталь, Metallurgiya. – 1977. – № 1. – С. 25-27.
49. Любин А.Е., Крейндель А.Л., Сафронков В.Ф., Тюленев С.Д. Металлические конструкции воздушонагревателя с выносной камерой горения // Сталь, Metallurgiya. – 1976. – № 2. – С. 112-113.
50. Любин А.Е. Создание опорных монтажных систем для сокращения продолжительности ремонтов доменных печей // Metallurgiya. – 1988. – № 3. – С. 22.

51. Любин А.Е., Медведев А.А., Родов С.М., Шаломов Б.Я. О причинах разрушения кладки комбинированной лещади доменной печи // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. Metallurgiya. – 1987. – № 1. – С. 17-18.
52. Любин А.Е., Иосилевич Е.С. Современные тенденции развития конструктивных решений металлоконструкций доменной печи // Тези доп. V міжнарод. наук.-техн. конф. «Будівельні металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку», Київ, 19-22 вересня 2006 р. – 100 с.
53. Манушин Д.Г. Некоторые вопросы напряженного состояния воздушонагревателей доменных печей. Автореф. канд. дис. М., 1974. 35 с.
54. Медведев А.А., Любин А.Е., Шаломов Б.Я. Исследование состояния кожуха воздушонагревателя в зоне местного перегрева // Проблемы прочности. – 1988. – № 3. – С. 118-119.
55. Мельников Н.П., Зелятров В.Н. Выбор стали для строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1967. – 135 с.
56. Мельников Н.П. Конструктивные формы и методы расчета ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1972. – 546 с.
57. Мельников Н.П. Развитие металлических конструкций. – М.: Стройиздат, 1965. – 278 с.
58. Методика определения технического состояния кожухов доменных печей и воздушонагревателей РД 11-288-99 / Утверждена постановлением Госгортехнадзора РФ от 02.06.99 № 35.
59. Миллер В.Я., Корчагин В.А., Тодоконников В.Г. Стальные конструкции комплекса доменной печи и газоочистки. – М.: Стройиздат, 1965. – 275 с.
60. Миллер В.Я., Любин А.Е. Конструкции крупнейшей в СССР доменной печи // Промышленное строительство и инженерные сооружения. – 1967. – № 6. – С. 7-9.
61. Миллер В.Я., Любин А.Е. Основные технические решения центрального узла доменной печи объемом 5000 м³ Криво-рожского металлургического завода им. В.И.Ленина // Строительство металлургических предприятий ЦБТИ, Минтяжстроя УССР. – 1973. – Вып. 6. – С. 14-17.
62. Металлические конструкции. Специальный курс / Под общ. ред. Н.С. Стрелецкого. – М.: Изд-во по стр-ву, 1965. – 367 с.

63. *Металлические конструкции.* / Под общ. ред. Н.С. Стрелецкого. – М.: Изд-во по стр-ву, 1960. – 776 с.
64. *Металлические конструкции. Справочник проектировщика* / Под общ. ред. В.В. Кузнецова. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – Т. 2. – 576 с.
65. *Нагрузки и воздействия на здания и сооружения* / Под общ. ред. А.В. Перельмутера. – К.: Сталь, 2005. – 487 с.
66. Овчаренко Н.Л. Повреждение горна доменных печей // Доменное производство: Сб. статей. – М.: Металлургия. – 1959. – С. 166-171.
67. Паришаков В.М. и др. Определение экономически выгодного уровня нагрева дутья в конкретных условиях доменной плавки // Сталь, Metallurgizdat. – 1977. – № 6. – С. 27-28.
68. *Правила безопасности в доменном производстве.* ПБ 11-542-03
69. *Программа расчета футерованных конструкций доменных комплексов РАФК-ПК.* – М.: ЦНИИПСК, 1975. – 251 с.
70. *Расчет и конструирование трубопроводов.* Справочное пособие / Под ред. Б.В. Зверькова. – Л.: Машиностроение, 1979. – 245 с.
71. Розов Р., Любин А. Стальные конструкции для газоочистки типовой доменной печи объемом $V = 2700 \text{ м}^3$ // Промышленное строительство и инженерные сооружения. – 1965. – № 6. – С. 18-19.
72. *Рекомендации по определению нагрузок на отдельно стоящие опоры и эстакады трубопроводов.* – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко. Стройиздат, 1973. – 65 с.
73. *Руководство по расчету стальных конструкций доменных печей большого объема.* – М.: ЦНИИПСК, 1975. – 250 с.
74. Сахновский М.М., Любин А.Е., Зевин А.Д. Уроки одной аварии // Промышленное строительство и инженерные сооружения. – 1978. – № 2. – С. 31-32.
75. *Сварные строительные конструкции.* Справ. издание / Лобанов Л.М., Шимановский В.Н., Шимановский А.В. и др. – В 3-х томах. – Т. 3. – К.: Изд-во «Сталь», 2003. – 680 с.
76. Солодарь М.Б., Кузнецова М.В., Плишкин Ю.С. Металлические конструкции вытяжных башен. – Л.: Стройиздат, 1975. – 180 с.
77. Сорокин Л.А. Работа конструкций доменных печей. – М.: Металлургия, 1976. – 352 с.

78. *Стальные конструкции* / Стрелецкий Н.С., Генийев А.Н., Балдин В.А., Беленя Е.И., Лессиг Е.Н. / Под общ. ред. Стрелецкого Н.С. – М.: Госстройиздат, 1952. – 852 с.
79. *Стан та залишковий ресурс фонду будівельних конструкцій в Україні* / За ред. д.т.н. Перельмутера А.В. – К.: Вид-во «Сталь», 2002. – 166 с.
80. Старицкий В.И. Газовое хозяйство заводов черной металлургии. – М.: Металлургия, 1973. – 494 с.
81. Стрелецкий Н.С., Беленя Е.И., Веденников Г.С. и др. Металлические конструкции. Спец. курс / Под ред. Н.С. Стрелецкого. – М.: Стройиздат, 1965. – 361 с.
82. *Справочник проектировщика. Металлические конструкции* / Под ред. Кузнецова В.В. – В 3-х т. – Т.2. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 504 с.
83. *Справочник проектировщика. Металлические конструкции промышленных зданий и сооружений* / Под ред. Мельникова Н.П. – М.: Стройиздат, 1962. – 618 с.
84. *Справочник проектировщика. Металлические конструкции* / Под ред. Мельникова Н.П. – М.: Стройиздат, 1980. – 775 с.
85. Филиппов А.С., Байшев Ю.П. Расчет термонапряжений при электрошлаковой сварке кожуха доменной печи. Деп. в ВИНТИ. – М.: 1996. – № 2619-В96. – 16 с.
86. Шапиро Г.А. Действительная работа стальных конструкций промышленных цехов. – М-Л.: Госстройиздат, 1952. – 285 с.
87. Шимановский А.В., Гордеев В.Н., Королев В.П. и др. Техническая диагностика и предупреждение аварийных ситуаций конструкций зданий и сооружений. – К.: Изд-во «Сталь», 2008. – 461 с.
88. Шульман З.А., Любин А.Е., Шульман И.З., Иосилевич Е.С. Автоматизированная система технической диагностики кожуха доменной печи // Зб. доповідей V Міжнарод. наук.-техн. конф. «Будівельні металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку», Київ, 19-22 вересня 2006р. – С. 177-181.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
ГЛАВА 1 Общие сведения о комплексе сооружений доменной печи и условиях их эксплуатации	5
§ 1.1. Основы технологического процесса получения чугуна. Состав комплекса доменной печи и назначение его сооружений	5
§ 1.2. Взаимосвязь конструктивных форм стальных конструкций и технологических процессов. Основные рациональные компоновочные решения	24
§ 1.3. Особенности условий эксплуатации металлических конструкций объектов доменного комплекса и предъявляемые к ним требования	26
§ 1.4. Основные этапы развития конструктивных форм металлических конструкций сооружений доменного комплекса	31
ГЛАВА 2 Особенности условий работы металлоконструкций	35
§ 2.1. Влияние температурного режима	35
§ 2.2. Влияние агрессивной среды	49
§ 2.3. Термическое расширение стальных конструкций и материалов футеровки	54
§ 2.4. Охлаждение доменных печей	56
§ 2.5. Влияние технологических факторов, нагрузок и силовых воздействий на напряженно-деформированное состояние кожухов агрегатов	64
ГЛАВА 3 Собственно доменная печь	71
§ 3.1. Эволюция конструктивных решений доменных печей	71

§ 3.2. Конструкции, входящие в состав собственно доменной печи	78
§ 3.3. Технические решения кожуха доменной печи	79
§ 3.4. Опорные системы доменной печи	107
§ 3.5. Площадки опорных систем доменной печи	114
§ 3.6. Колошниковое устройство доменной печи	124
§ 3.7. Кольцевой воздухопровод горячего дутья	130
ГЛАВА 4 Блок воздушонагревателей	134
§ 4.1. Эволюция конструктивных форм	134
§ 4.2. Обеспечение надежности кожухов воздушонагревателей	140
§ 4.3. Воздушонагреватель с внутренней камерой горения	141
§ 4.4. Бесшахтный воздушонагреватель	162
§ 4.5. Воздушонагреватель с вынесенной камерой горения	165
§ 4.6. Эстакада воздушонагревателей	173
ГЛАВА 5 Системы газо - воздухопроводов комплекса доменной печи	177
§ 5.1. Трубопроводы	177
§ 5.2. Опоры трубопроводов	181
§ 5.3. Технологическое оборудование	187
§ 5.4. Уменьшение влияния температурных деформаций	189
§ 5.5. Воздухопровод горячего дутья	196
§ 5.6. Воздухопровод холодного дутья	206
§ 5.7. Газопровод чистого доменного газа	207
§ 5.8. Дымопроводы	207
§ 5.9. Воздухопровод воздуха горения	209
§ 5.10. Установки утилизации тепла	209
ГЛАВА 6 Труба для взятия печи «на тягу»	211
§ 6.1. Назначение, компоновка	211

§ 6.2. Основные конструктивные решения	211
ГЛАВА 7 Отвод из доменной печи колошникового грязного доменного газа и грубая его очистка	216
§ 7.1. Технологическая схема отвода доменного газа	216
§ 7.2. Вертикальные и нисходящие газопроводы грязного доменного газа	218
§ 7.3. Пылеуловитель	225
ГЛАВА 8 Монтажная балка	238
§ 8.1. Назначение, конструктивные формы	238
§ 8.2. Балки консольного типа	238
§ 8.3. Двухопорные балки	238
ГЛАВА 9 Шахты лифта и лестниц	245
§ 9.1. Каркасные шахты лифта	245
§ 9.2. Трубчатые шахты лифта	248
§ 9.3. Переходные площадки и мосты	249
ГЛАВА 10 Конструкции для подачи шихтовых материалов	251
§ 10.1. Общие сведения	251
§ 10.2. Скиповые подъемники	254
§ 10.3. Основные схемы мостов скиповых подъемников	258
§ 10.4. Мост закрытого типа	261
§ 10.5. Мост открытого типа	263
§ 10.6. Конвейерная подача материалов	267
ГЛАВА 11 Здание доменной печи	269
§ 11.1. Общие сведения	269
§ 11.2. Особенности конструктивных форм	272

ГЛАВА 12 Газоочистка доменного газа	279
§ 12.1. Назначение, состав сооружений	279
§ 12.2. Скруббер	282
§ 12.3. Трубы Вентури	285
§ 12.4. Электрофильтр	286
§ 12.5. Водоотделитель	288
§ 12.6. Каплеуловитель-циклон	289
ГЛАВА 13 Свеча для дожигания избытков доменного газа	292
§ 13.1. Назначение	292
§ 13.2. Конструктивные формы свечей	292
ГЛАВА 14 Основные положения расчета	297
§ 14.1. Нагрузки и воздействия	297
§ 14.2. Расчетные коэффициенты	310
14.2.1. Коэффициенты надежности по нагрузкам	310
14.2.2. Коэффициенты условий работы γ_c	312
§ 14.3. Особенности расчета конструкций	314
14.3.1. Кожух доменной печи	314
14.3.2. Кожух воздушонагревателя	320
14.3.3. Наклонный мост	324
14.3.3.1. Нагрузки и воздействия на главные балки	324
14.3.3.2. Расчет устойчивости открытого пояса главной балки	326
14.3.4. Колонны опорной системы доменной печи	328
14.3.5. Анкерные устройства кожухов воздухонагревателей	331
14.3.6. Трубопроводы	332
14.3.7. Расчет дисковых компенсаторов	338

ГЛАВА 15 Материал конструкций	343
§ 15.1. Свойства сталей	343
§ 15.2. Основные принципы выбора материала	347
§ 15.3. Марки стали для конструкций сооружений доменного комплекса	354
ГЛАВА 16 Дефекты и повреждения конструкций	360
§ 16.1. Характеристика дефектов и повреждений	360
§ 16.2. Кожухи доменных печей	366
§ 16.3. Кожухи воздухонагревателей	370
§ 16.4. Воздухопровод горячего дутья	374
§ 16.5. Колошниковые копры	376
§ 16.6. Пылеуловитель и нисходящие газоходы	377
§ 16.7. Наклонные мосты	377
§ 16.8. Дефекты соединений	378
§ 16.9. Повреждения антикоррозионного покрытия	380
§ 16.10. Методы устранения дефектов и повреждений	381
§ 16.11. Расследование и установление причин аварий металлоконструкций	392
ГЛАВА 17 Усиление конструкций сооружений доменного комплекса	396
§ 17.1. Основные принципы усиления конструкций	396
§ 17.2. Усиление листовых конструкций	397
§ 17.3. Страховочно-предупредительные мероприятия и связанные с ними усиления	402
ГЛАВА 18 Капитальный ремонт и реконструкция доменных печей	405
§ 18.1. Основные положения	405
§ 18.2. Общие положения по ремонту доменных печей с частичной или полной заменой кожухов	411

§ 18.3. Типы временных монтажных опорных систем	415
ГЛАВА 19 Эксплуатация и диагностика технического состояния металлоконструкций	429
§ 19.1. Термины и определения	429
§ 19.2. Основные принципы эксплуатации сооружений доменного комплекса	430
§ 19.3. Диагностика технического состояния конструкций	433
§ 19.4. Оценка технического состояния конструкций и сооружений	443
§ 19.5. Контроль фактического напряженного состояния конструкций	446
§ 19.6. Определение действительного напряженного состояния кожухов агрегатов	448
§ 19.7. Автоматизированные системы диагностики напряженно-деформированного состояния кожухов агрегатов	453
Литература	459

Научное издание

Александр Ефимович Любин

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
СООРУЖЕНИЙ КОМПЛЕКСА
ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ЭКСПЛУАТАЦИЯ.
ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ**

Ш...Любин А.Е. Металлические конструкции сооружений комплекса доменной печи. Проектирование. Эксплуатация. Диагностика технического состояния. – 472 с., рис. 197, табл. 69.

Редактор

Т.И. Лукашевич

Компьютерная верстка,
техническое редактирование

Н.А. Чабан

Подписано в печать 10.03.2010. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсет. Гарнитура Times New Roman.

Печать офсет. Усл. печ. л. 27,59. Уч.-изд. л. 25,94.

Тираж 500 экз. Заказ. № 0085.

ООО «Издательство «Сталь».

02660, ГСП-660, г. Киев, просп. Освободителей, 1,
тел./факс 516-45-02, тел. 516-55-92.