А.Е.Любин

КОЖУХИ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

ДЕЙСТВИТЕЛЬНАЯ РАБОТА ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

«Сталь»
Киев - 2011

А. Е. Любин

КОЖУХИ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

ДЕЙСТВИТЕЛЬНАЯ РАБОТА
ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Вадиму Николаевичу
Гордееву
С глубоким уважением

«Сталь»
Киев – 2011

УДК669.162.2+669.162.23]-758.36
ББК34.3-5-04
Л93
Любин А. Е.
Л93 Кожухи доменных печей и воздухонагревателей. Действительная работа. Промышленная безопасность. – К.: Изд-во «Сталь», 2011. – 268 с., рис. 106, табл. 28.
ISBN 978-966-1555-70-8

Рассмотрены проблемы действительной работы кожухов доменных печей и воздухонагревателей. Приведены основные нагрузки и воздействия на кожухи во все периоды эксплуатации, критерии оценки прочности и разработаны пороговые значения критериев для различных этапов эксплуатации, направленные на обеспечение промышленной безопасности. Изложены специально разработанные методы и средства диагностики напряженного состояния кожухов.

Освещены результаты натурных экспериментальных исследований и на этой основе сформулированы основные условия минимизации нагрузок и, соответственно, снижения напряженно-деформированного состояния кожухов. Систематизированы наиболее часто встречающиеся повреждения кожухов, обозначены вероятные причины их возникновения и даны рекомендации по их устранению.

Для инженерно-технических работников проектных организаций, работников служб эксплуатации металлургических предприятий, студентов высших учебных заведений при изучении курса «Металлические конструкции», а также для аспирантов, ведущих исследования в этой области.

УДК669.162.2+669.162.23]-758.36
ББК34.3-5-04
Любін О. Ю.
Л93 Кожухи доменних печей і повітронагрівачів. Реальна робота. Промислова безпека.– К.: Вид-во «Сталь», 2011. – 268 с., рис. 106, табл. 28.
ISBN 978-966-1555-70-8

Розглянуто проблеми реальної роботи кожухів доменних печей та повітронагрівачів. Наведено основні навантаження та впливи, які охоплюють усі періоди експлуатації, критерії оцінки міцності та розроблено порогові значення, спрямовані на забезпечення промислової безпеки. Висвітлено спеціально розроблені методи та засоби діагностики напруженого стану кожухів.

Наведено результати природних експериментальних досліджень і на цій засаді сформульовано основні умови мінімізації навантажень та, відповідно, зниження напружено-деформованого стану кожухів. Систематизовано пошкодження кожухів, що найчастіше зустрічаються, визначено імовірні причини їх виникання та надано рекомендації щодо їх усунення.

Для інженерно-технічних працівників проектних установ, працівників експлуатаційних служб металургійних підприємств, студентів вищих навчальних закладів при вивченні курсу «Металеві конструкції», а також для аспірантів, які проводять дослідження у цій галузі.

© А.Е. Любин, 2011
© Издательство «Сталь», 2011

ISBN 978-966-1555-70-8

ВВЕДЕНИЕ

Сооружения металлургических предприятий, в большинстве своем, относятся к объектам повышенной опасности, во время работы которых могут возникать нештатные ситуации. Анализ эксплуатации этих сооружений показывает, что чаще всего такие ситуации бывают в доменном производстве, которое связано с высокими энергиями и температурами, переработкой больших объемов жидкого металла, природного, доменного и коксового газов.

На доменное производство приходится более 26% всех аварий, из которых почти 15% происходят из-за повреждения кожухов доменных печей, прорывов горна, лещади и т. п. [37], а также в связи с повреждениями кожухов воздухонагревателей. Это делает весьма актуальным и необходимым поиск технических решений и технологических приемов, направленных на снижение промышленных рисков и вероятности возникновения нештатных ситуаций.

Аварии кожухов доменных печей и воздухонагревателей возникают в непрогнозируемых местах, по различным трудно формализуемым причинам.

Восстановление доменных печей после аварий связано с большими потерями продукции, длительными остановками производства и значительными капиталовложениями, а иногда и с человеческими жертвами. При этом в зависимости от масштаба аварий и состояния конструкций печи применяются различные способы их ремонта и реконструкции.

При выработанном технологическом ресурсе сооружений и неудовлетворительном состоянии конструкций на одном из европейских заводов, с учетом генерального плана развития предприятия был избран весьма экзотический «радикальный» способ реконструкции доменного цеха, показанный на рис.1 [2].

Для выявления причин повреждений и возможности предупреждения нештатных ситуаций необходим комплексный системный подход к изучению проблемы взаимосвязи параметров воздействия и состояния технологического процесса с элементами конструкций и обеспечением их промышленной безопасности, являющейся определяющей для доменного производства.

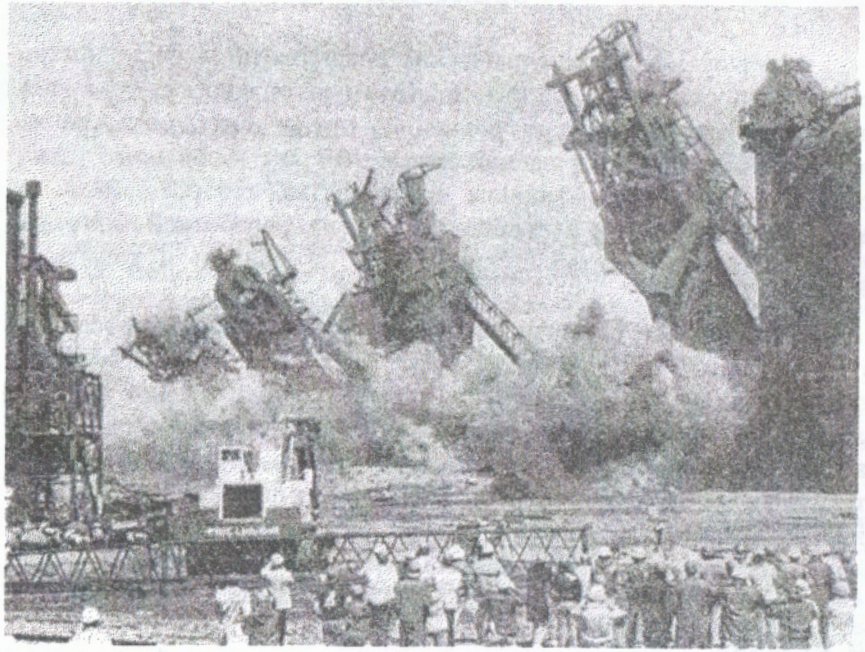


Рис. 1. Радикальное решение проблемы реконструкции доменного цеха

Кожухи доменных печей и воздухонагревателей имеют сложные конструктивные формы и являются уникальными сооружениями доменного комплекса. В процессе проектирования, несмотря на их технологическое назначение, они рассматриваются как строительные металлоконструкции. Однако они не всегда подчиняются законам формообразования, присущим строительным металлоконструкциям, и затруднены для теоретического исследования параметров их состояния.

Основная особенность работы таких конструкций состоит в том, что действующие на них нагрузки и воздействия и, соответственно, их напряженно-деформированное состояние нестабильны и существенно меняются во время эксплуатации [35].

В частности, для доменной печи, основное назначение которой служить агрегатом для ведения доменной плавки, характерной особенностью является систематическая смена технологических операций, входящих в общий процесс производства чугуна, и связанное с этим изменение действующих нагрузок.

Такая нестационарность процесса, в первую очередь, порождена его основным противоречием, заключающимся в непрерывности самого доменного процесса плавки, с одной стороны, и периодичности загрузки печи и выпуска жидких продуктов плавки – с другой.

К иным причинам, нарушающим стационарный характер нагрузок, можно отнести:

– остановки печи на краткосрочный ремонт;

– изменения видов выплавляемого чугуна, что приводит к существенным корректировкам как теплового, так и газодинамического режимов печи;

– технологические отклонения, вызывающие неполадки в работе печи (канальный ход газов, ускоренный разгар футеровки и прогар холодильников, настылеобразование и т. п.).

Нестационарный характер доменного процесса приводит во время эксплуатации печи к соответствующей нестационарности по величине и по зоне возникновения максимального воздействия основных нагрузок, к которым можно отнести внутреннее давление газовой среды, расширение огнеупорной кладки и холодильников, вызванное термическими воздействиями, а также давление от массы шихтовых материалов и жидких продуктов плавки.

Длительные экспериментальные наблюдения за динамикой напряженного состояния кожухов в процессе эксплуатации достаточно ярко иллюстрируют отсутствие прямой формализованной взаимосвязи между ним и технологическими параметрами, а в ряде случаев показывают и ее алогичность.

Изменения в конструкции доменной печи, происходящие за время эксплуатации, в свою очередь, в значительной степени влияют на технологические процессы внутри печи, так же изменяя нагрузки и воздействия по величине, району их возникновения и во времени.

Повреждения кожухов доменных печей, в основном, связаны с разгаром кладки, выходом из строя системы охлаждения, нештатной работой оборудования, изменением во времени физико-механических свойств огнеупорных материалов и т. п.

Что касается воздухонагревателей, то характерной особенностью их работы является последовательное чередование двух

совершенно разнохарактерных технологических режимов – «нагрев» и «дутье». Воздействия и нагрузки во время работы агрегата в этих режимах приводят к различному напряженному состоянию в кожухе и футеровке, которые, взаимодействуя между собой, создают нестационарные, изменяющиеся во времени нагрузки на кожух.

Анализ поведения таких конструкций возможен лишь в комплексе теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих учесть влияние практически не формализованных нагрузок и воздействий, а также изменение исходных положений и служебных характеристик материалов в процессе эксплуатации. Изучение действительной работы конструкций таких сооружений, как правило, базируется на обобщении наблюдений за их поведением во время эксплуатации и увязке его с динамикой нагрузок и состояния конструкций.

Из исследований, относящихся к этим проблемам, можно отметить монографии Миллера В. Я. и др. «Стальные конструкции комплекса доменной печи и газоочистки» [31], Байшева Ю. П. «Доменные печи и воздухонагреватели (конструкции, эксплуатационные воздействия, свойства материалов, расчеты)» [1], Сорокина Л. А. «Работа конструкций доменных печей» [35], Горицкого В. М. «Тепловая хрупкость стали» [11], исследования, выполненные в институтах ЦНИИпроектстальконструкция» (Москва, Российская Федерация) и «Днепрпроектстальконструкция» (г. Днепропетровск, Украина).

Ряд аспектов проблемы рассмотрен в монографии автора «Металлические конструкции комплекса сооружений доменной печи» [23].

В числе работ, касающихся технологических проблем безопасности эксплуатации доменных печей, следует отметить работы, проводимые Институтом черной металлургии НАН Украины (г. Днепропетровск, Украина), в том числе, работы В. И. Большакова [2, 3, 4], а также другие исследования, выполненные в этом институте [5, 6, 32, 37, 38].

Учитывая особую ответственность рассматриваемых сооружений в обеспечении промышленной безопасности объектов комплекса доменной печи, понимание особенностей их действительной работы может оказать существенное влияние на развитие конструктивных форм и принятие технических решений по увеличению долговечности конструкций, их промышленной безопасности и оптимальному ведению технологического процесса.

Настоящая монография посвящена анализу работы кожухов доменных печей и воздухонагревателей, взаимосвязи их напряженно-деформированного состояния с технологическим процессом, нагрузками и воздействиями, другими элементами конструкций, составляющими эти сооружения, обобщению результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований и рекомендациям по обеспечению их длительной надежной эксплуатации и промышленной безопасности.

Часть работ выполнена в институте «Днепрпроектстальконструкция» (г. Днепропетровск, Украина) лабораторией отдела специальных конструкций, возглавляемого автором в течение 25 лет, другая часть – Корпорацией «Промстальконструкция» (г. Днепропетровск, Украина), выполнявшей исследования в последнее десятилетие.

В проведении исследований и анализе их результатов в институте «Днепрпроектстальконструкция» принимали непосредственное участие сотрудники лаборатории – руководители работ – инженеры Родов С. М., Шаломов Б. Я., Владимирский И. Б, а также участники работ – инженеры Медведенко А.А., Горошникова Е. Л., Сокол Е. Г., Шульга И. Я., Свитыч Н. Д., Лютин Б. Н., Бурда В. А., Нетесина И. Ю., техники Охрименко В. Н., Горошников А. П., Павленко В. А. и др.

В Корпорации «Промстальконструкция» натурные экспериментальные работы выполнялись под руководством канд. техн. наук. Шульмана З. А., постановка задач и анализ результатов – под руководством автора. Непосредственное участие в работах принимали инж. Иосилевич Е. С., Есипова Е. А., Мацюк В. И, Джемилов Р. Ш., Тюников М. Г.

Все участники работ внесли значительный вклад в изучение и анализ работы этих сложных инженерных сооружений и поиск закономерностей взаимосвязи их надежности с параметрами технологического процесса.

В книге не рассматриваются вопросы методики постановки

экспериментальных исследований, обработки полученных данных, а освещены лишь результаты контрольных измерений и их анализ, а также проблемы, связанные с использованием специально разработанных методов оценки напряженного состояния конструкций, нестандартной специальной аппаратуры и методики ее применения.

Классификация нагрузок и воздействий, критерии оценки напряженно-деформированного состояния кожухов, анализ результатов контроля состояния кожуха доменной печи объемом 5000 м^3 и их графическая обработка выполнены инж. ИосилевичЕ. С.

Теоретическое исследование узла сопряжения кожуха воздухонагревателя с плоским днищем выполнено инж. МедведенкоА. А.

Автор выражает большую благодарность всем участникам работ по проведению исследований.

Отдельная благодарность моим коллегам – главным инженерам проектов Иосилевич Е. С. и Пушкаревой Г. С. за профессиональную критику и полезные советы при рассмотрении рукописи.

Автор признателен инж. Есиповой Е. А. за помощь в оформлении иллюстраций.

ГЛАВА 1 КОНСТРУКТИВНЫЕ ФОРМЫ КОЖУХОВ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ И ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ

§ 1.1. Кожух доменной печи

Выплавка чугуна представляет собой сложный технологический процесс, осуществляемый в сооружениях комплекса доменной печи, входящих в состав доменного и других цехов металлургического предприятия.

На рис. 1.1 показан общий вид объектов комплекса сооружений доменной печи, который, по существу, представляет собой отдельное промышленное предприятие, основной и единственной задачей которого является обеспечение работы собственно доменной печи, в которой непосредственно происходит технологический процесс выплавки чугуна.

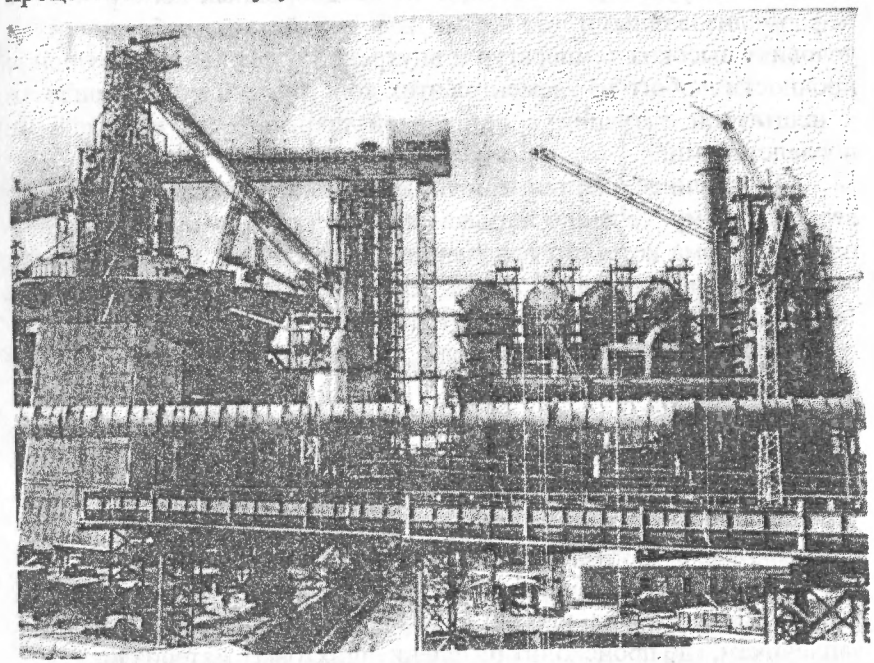


Рис. 1.1. Общий вид комплекса сооружений доменной печи

В то же время, каждое из этих сооружений выполняет свои технологические функции: в доменной печи происходит переработка загружаемого сырья и получение чугуна, блок воздухонагревателей производит и подает в печь горячий дутьевой воздух, наклонный мост или галерея шихтоподачи доставляют сырьевые материалы в доменную печь, пылеуловитель и система газоочистки очищают образовавшийся в печи газ от пыли и т. д.

Производительность современного доменного цеха достигает 10 млн. т чугуна в год и более. Поэтому вопрос о надежной эксплуатации и промышленной безопасности каждого сооружения имеет решающее значение.

Из всего многообразия объектов комплекса наиболее ответственными и небезопасными являются доменная печь и воздухонагреватели, работающие под воздействием разнообразных технологических нагрузок. Они представляют собой весьма сложные сооружения, состоящие из неоднородных конструкций с неформализованными условиями взаимодействия, работающих в условиях высоких температур и внутреннего давления. Нарушение прочности любого из элементов этих конструкций может привести к нештатной ситуации с остановкой производства и тяжелыми последствиями.

Внутреннее очертание печи, являющейся шахтной печью, по вертикальному сечению называется профилем, наиболее рациональная форма которого основана на многолетнем мировом опыте эксплуатации доменных печей. В горизонтальных поперечных сечениях по всей высоте печь круглая.

Классический профиль печи состоит из следующих частей (рис. 1.2):

– колошник (1) – верхняя цилиндрическая часть рабочего пространства, куда загружаются шихтовые материалы;

– шахта (2) – наибольшая по объему часть печи, имеющая форму усеченного конуса с большим основанием внизу, где нагревается шихта и проходят основные восстановительные процессы;

– распар (3) – наиболее широкая часть печи в форме цилиндра, расположенная ниже шахты и образующая плавный переход к заплечикам, где происходит плавление шихтовых материалов;

– заплечики (4) – 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 (5) – 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.

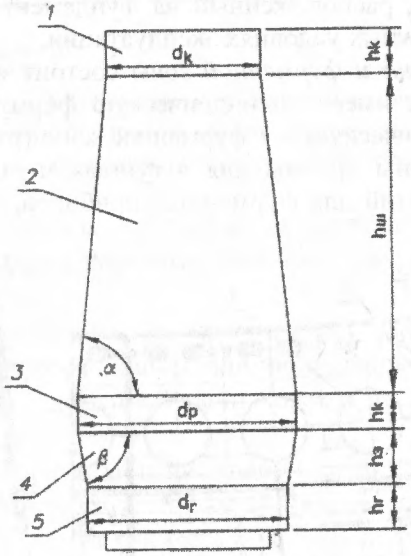


Рис. 1.2. Классический профиль доменной печи:
1 – колошник; 2 – шахта; 3 – распар; 4 – заплечик; 5 – горн;
$h_г$ – высота горна; $h_з$ – высота заплечиков; $h_р$ – высота распара;
$h_ш$ – высота шахты; $h_к$ – высота колошника; $d_г$ – диаметр горна;
d_k – диаметр колошника; $d_р$ – диаметр распара; α – угол наклона стен шахты; β – угол наклона стен заплечиков

Основной конструктивной частью доменной печи является ее стальной кожух, представляющий собой ряд сопряженных соосных цилиндрических и конических оболочек различной толщины, с большим числом отверстий различного размера и конфигурации, предназначенных для обеспечения технологического процесса и крепления оборудования.

Кожухи доменных печей, как правило, находятся в поле двухосного напряженного состояния – растяжения или трехосного – растяжения с изгибом в зонах сопряжения оболочек.

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

Кожух лещади – участок цилиндрической формы кожуха печи, внутри которого находится жесткий массив из огнеупорных блоков и кладки, расположенный на фундаменте, находящийся в чрезвычайно сложных условиях эксплуатации.

Кожух горна и фурменной зоны состоит из двух оболочек, одна из которых имеет цилиндрическую форму в зоне металлоприемника и коническую – в фурменной зоне (рис. 1.3). В кожухе горна расположены проемы для чугунных и шлаковых леток, а также ряд отверстий для фурменных приборов, подающих в печь горячий воздух.

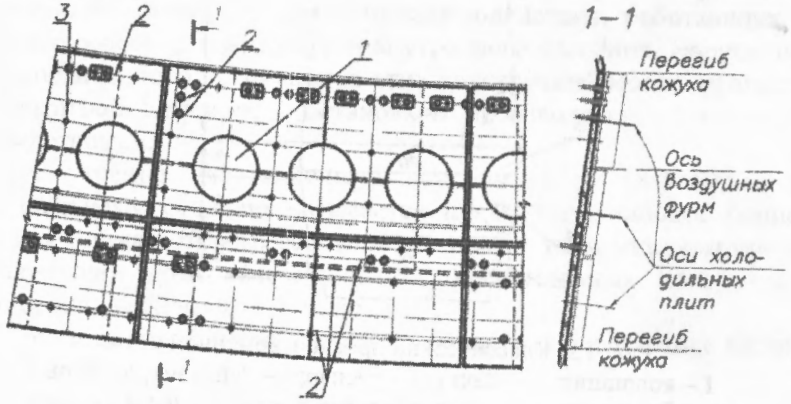


Рис. 1.3. Участок кожуха горна и фурменной зоны:
1, 2, 3 – отверстия для фурменных приборов, выводных трубок холодильных плит и штуцеров закачки раствора соответственно

Кожух заплечиков имеет вид обратного конуса, расширяющегося кверху (рис. 1.4), препятствующего быстрому опусканию шихты в горн, поскольку в заплечиках начинаются процессы плавления и шлакообразования. Своей окружностью малого диаметра он сопрягается с кожухом фурменной зоны и горна, окружностью большого диаметра – с распаром.

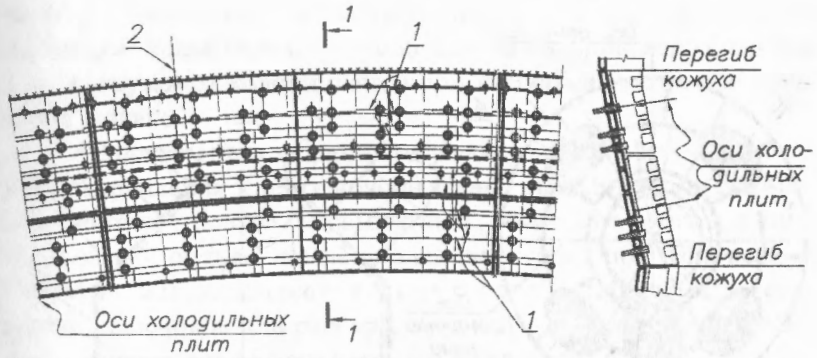


Рис. 1.4. Участок кожуха заплечиков:
1, 2 – отверстия для выводных трубок холодильных плит и штуцеров закачки раствора соответственно

Мораторное кольцо, устанавливаемое на печах с несамонесущим кожухом на месте перелома геометрии кожуха после нижнего пояса кожуха шахты.

Кожух распара и шахты представляет собой единую конструкцию, отличающуюся лишь толщиной футеровки в зоне распара, а для самонесущей доменной печи кожухи этих участков могут быть раздельными.

Кожух распара имеет цилиндрическую форму и является наиболее широкой частью печи, соединяющей заплечики с шахтой. Кожух шахты печи имеет коническую форму практически до верха, где она переходит в цилиндрическую оболочку колошника.

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

Кожух купола печи имеет форму конуса и несет на себе ряд важных технологических и строительных функций (рис. 1.5). На него опираются загрузочное устройство, газоходы грязного доменного газа и, при отсутствии колошникового копра, технологическое оборудование, лестницы и площадки загрузочного устройства.

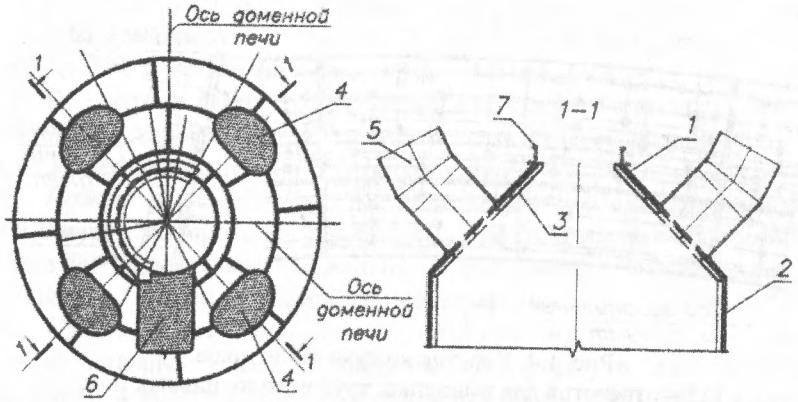


Рис. 1.5. Кожух купола доменной печи:
1, 2 – кожухи купола и колошника соответственно; 3 – холодильные или защитные плиты купола; 4 – отверстия для газопроводов грязного газа; 5 – вертикальные газопроводы грязного газа; 6 – проем для смены лотка загрузочного устройства; 7 – опорный колошниковый фланец

Металлическая оболочка кожуха современной доменной печи изготавливается из листовой стали повышенной и высокой прочности классов С345 или С440 соответственно (марок 09Г2С, 14Г2, 10ХСНД, 15ХСНД, 06Г2Б, 16Г2АФ и др.), обладающих необходимыми показателями ударной вязкости, достаточной термостойкостью и пластичностью.

Кожухи всех доменных печей имеют практически близкую по геометрии форму с некоторыми конструктивными отличиями, наиболее существенным и принципиальным из которых является наличие или отсутствие мораторного кольца.

Это кольцо, устанавливаемое в месте перелома кожуха при переходе от распара к шахте на границе изменения конструкции кладки и смены типа охлаждения, служит для опирания нависающей части кладки шахты и гашения возникающей при этом разности горизонтальных распоров.

На ряде доменных печей мораторное кольцо используется как элемент кольцевой балки швеллерного сечения, состоящей из нижнего пояса – собственно моратора, вертикальной стенки – первого пояса шахты и верхнего пояса – горизонтального листа площадки. Такая балка, опирающаяся на колонны горна, воспринимает нагрузки от колонн шахты при несовпадении их с колоннами горна в плане.

Одновременно мораторное кольцо служит для горизонтального закрепления к нему колонн горна, выполняемого с помощью незатянутых болтов повышенной точности, что допускает автономный подъем его над колоннами горна при разогреве печи. Теоретически мораторное кольцо с одной стороны опирается на кожух заплечиков или распара, с другой – подвешивается к кожуху шахты, передавая от него нагрузки на колонны горна.

Фактически, пока футеровка над моратором полностью не разрушена, вследствие температурного вертикального расширения кладки и холодильников нижней части печи, во время эксплуатации шахта приподнимается, отрывая моратор от колонн горна.

В доменных печах современной конструкции в связи с увеличением объема и повышением внутреннего давления воздуха мораторное кольцо не устанавливают, поскольку оно понижает общую несущую способность кожуха. Такое решение превращает кожух в самонесущую конструкцию.

Иногда для удобства ремонта в конструкции безмораторных печей предусматривается так называемый *ложный моратор*, предназначенный для передачи массы верхней части печи на колонны и, одновременно, развязывающий их в горизонтальной плоскости.

§ 1.2. Кожух воздухонагревателя

Воздухонагреватель доменной печи, как аппарат регенеративного типа, одновременно с совершенствованием конструкций доменной печи также прошел большой путь развития [23].

Наиболее широкое применение нашел *воздухонагреватель с внутренней камерой горения* (рис. 1.6).

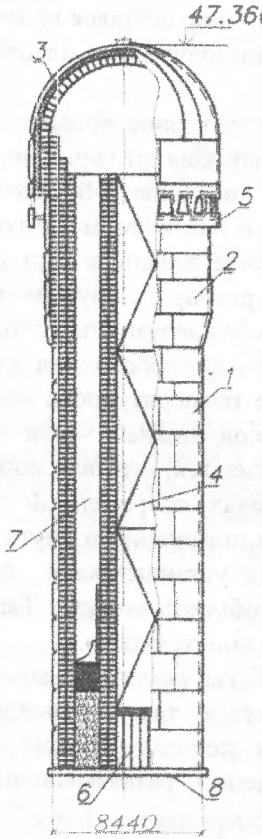


Рис. 1.6. Высокотемпературный воздухонагреватель:
1, 2 – кожух в низкотемпературной и высокотемпературной зонах соответственно; 3 – кладка купола; 4 – блоки насадки; 5 – кольцевая балка для опирания кладки купола; 6 – поднасадочное устройство для опирания блоков насадки; 7 – камера горения; 8 – днище

Используемая для первых воздухонагревателей относительно низкая – до 700–800 °С – температура вдуваемого в доменную печь воздуха и невысокое его давление – до 0,08–0,1 МПа – не предъявляли значительных требований к конструктивному решению и 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 достаточную надежность и долговечность агрегата. Вертикальный рост стен совместно с кладкой купола был небольшим и не превышал величины имеющегося зазора между кладкой и кожухом купола. Такая компоновка получила широкое распространение при строительстве как низкотемпературных воздухонагревателей, обеспечивающих нагрев воздуха до 1200 °С, так и, в последующем, высокотемпературных, нагревающих воздух до 1450–1500 °С.

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

Интенсификация технологических процессов привела к необходимости увеличения параметров работы – повышению давления воздуха в воздухонагревателях в пределах до 0,25–0,5 МПа и температуры под куполом до значений 1250–1450 °С. Это привело к увеличению толщины кладки в высокотемпературной зоне, проявило негативные качества совмещения кладки купола с кольцевыми периферийными стенами и усугубило влияние неосесимметричного расположения камеры горения.

Кроме того, для высокотемпературных воздухонагревателей, в связи с ростом температурных перемещений, величина зазора между кладкой купола и кожухом оказалась недостаточной.

Эти проблемы вызвали необходимость пересмотра ряда технических решений. Основным здесь было отделение кладки купола от периферийной кладки и расположение ее на специальной кольцевой балке. Тем самым, массивы кладки были разделены, перемещения кладки купола стали относительно невелики и не превышали величину зазора между кладкой и кожухом купола, а вертикальные перемещения периферийной кладки уменьшились, и она получила возможность независимого вертикального роста.

Были также применены новые материалы футеровки, заполнения деформационных слоев, изменены конструкции футеровки, разработаны новые узлы крепления кожуха к фундаменту, а также новые конструктивные формы аппарата в целом.

Толщина футеровки высокотемпературной зоны была увеличена, и для нее были применены высокообожженные динасовые огнеупоры, позволяющие довести температуру под куполом до 1500 °С.

Поскольку конструктивно высокотемпературный воздухонагреватель отличается от низкотемпературного более мощной футеровкой в зоне высоких температур, диаметр кожуха на этом участке был увеличен.

В таблице 1.1 приведены характеристики воздухонагревателей, которыми оснащались типовые доменные печи, запроектированные в 50–60-х годах прошлого века.

Таблица 1.1

Характеристики воздухонагревателей

Объем печи, $м^3$	Год выпуска проекта	Число аппаратов на печь	Диаметр D, м	Высота, H, м	Температура под куполом, °С	Температура дутья, °С	Тип аппарата
1033	1954	3	8,5	33,99	1100	950	Низкотемпературный
1386	1954	3	9,0	45,96	1100	950	Низкотемпературный
1513	1955	3	9,0	48,35	1150	1000	Низкотемпературный
1719	1957	4	9,0	36,00	1200	1000	Низкотемпературный
1719	1958	4	9,0	38,00	1450	1200	Высокотемпературный
2000	1960	4	9,0	44,60	1450	1200	Высокотемпературный
2700	1965	4	9,5*/10,0	48,54	1450	1200	Высокотемпературный
3200	1969	4	10,0*/10,5	50,60	1500	1350	Высокотемпературный

* В числителе указан диаметр низкотемпературной зоны кожуха, в знаменателе – высокотемпературной.

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

Выделение камеры горения из общего кожуха позволило получить раздельные сосуды с симметричным воздействием температурного поля и равномерным распором футеровки. Это в значительной степени улучшило общее напряженно-деформированное состояние конструкций. Широкое применение таких воздухонагревателей сдерживали их высокая стоимость и необходимость больших площадей застройки, что в условиях доменных цехов весьма проблематично.

Дальнейшие разработки привели к созданию так называемого *бесшахтного воздухонагревателя* принципиально новой конструктивной формы. Вертикальная камера горения была ликвидирована, а горение газа происходило в горизонтальной кольцевой форкамере, расположенной в районе купола воздухонагревателя.

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

ГЛАВА 2 НАЗНАЧЕНИЕ И РОЛЬ КОЖУХОВ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

§ 2.1. Кожух доменной печи

Доменная печь со сплошным металлическим кожухом, созданная в начале XIX века взамен печи, состоящей из кирпичной кладки, стянутой металлическими обручами, позволила получить главное – полную герметичность внутреннего пространства печи, что дало возможность повышения давления газовой среды и, соответственно, привело к увеличению производительности агрегата.

Применение сварки листов кожуха позволило радикально повысить его прочность и надежность, ликвидировав массовое количество отверстий под заклепки и, тем самым, убрать большую часть очагов концентрации напряжений, а отсутствие самих заклепок позволило получить гладкую внутреннюю поверхность кожуха и, за счет этого, снизить трение кладки о кожух, возникающее при ее термических перемещениях. Меньшая податливость сварных соединений была возмещена использованием более деформативных материалов для компенсирующих слоев.

Первая цельносварная доменная печь в СССР была введена в эксплуатацию в 1948 г. Применение сварки в домностроении дало новый импульс в развитии конструктивных форм и технологических процессов. В сочетании с этим форсированное развитие черной металлургии и постоянная интенсификация режимов работы печей привели к дальнейшему их совершенствованию.

Основными факторами формообразования конструкций кожуха доменной печи являются требования к обеспечению технологического процесса. Важнейшие из них – герметичность, стойкость к высоким температурам, прочность и малая деформативность.

Проблема прочности кожуха печи является наиболее актуальной в спектре общей надежности агрегата, так как длительность эксплуатации печи во многом зависит от его безотказной службы. Кожух печи имеет сложную конструктивную форму, отличающуюся неоднородностью и находящуюся в условиях различных термических и механических воздействий. Как

уже было отмечено, эти воздействия меняются в процессе эксплуатации, следуя за изменениями состояния футеровки и холодильников, что, в свою очередь, корректирует напряженно-деформированное состояние кожуха.

Форма кожуха печи, состоящая из оболочек различной конфигурации, вызывает появление краевых эффектов в зонах их сопряжения, в значительной степени усложняющее его общее напряженно-деформированное состояние.

Анализируя направления развития конструктивных форм доменной печи, к наиболее перспективным решениям, улучшающим это состояние, можно отнести следующие [26]:

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

2. Переход на цилиндрическую форму кожуха горна (вместо традиционной конической формы), устраняющий распорное воздействие вертикального температурного расширения холодильников и огнеупорной кладки, а также ликвидирующий 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, снижающее опасность трещинообразования в районе отверстий.

4. Установка 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, позволяющими уменьшить концентрацию напряжений в зоне отверстий.

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

– увеличением толщины кожуха купола для доменных печей большого объема в пределах 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;

– для доменной печи без колошникового копра изменением геометрии купола путем устройства дополнительного перелома в образующей конуса, что позволяет «сгладить» явление краевого эффекта, а также устройством отдельной системы связей по низу газопроводов грязного газа, либо использованием балок площадок колошникового устройства, опирающихся в этом случае на газопроводы, одновременно в качестве затяжек с целью уменьшения изгибающих моментов и осевых усилий от распора.

Кожух доменной печи входит в состав многослойной оболочки, представляющей собой систему «кожух-холодильники-компенсационный слой-футеровка», и является сложной конструкцией, выполняющей различные независимые функции.

Так, кожух доменной печи, кроме восприятия нагрузок и усилий от внутреннего давления газов и температурного распора футеровки, создает в последней сжимающие усилия, препятствующие преждевременному ее растрескиванию. Он также служит опорой для холодильников и другого оборудования и является основной несущей конструкцией, обеспечивающей общую пространственную устойчивость всей системы сооружений центрального узла, связанной конструктивно с кожухом.

Систематизируя приведенные назначения кожуха, можно выделить три основные его функции:

– технологическая функция кожуха – обеспечение герметичности доменной печи при воздействии всех внутренних нагрузок в период технологического процесса;

– строительная функция кожуха – восприятие нагрузок от внутреннего давления футеровки, газовой среды, шихтовых

материалов и жидких продуктов плавки, воздействия смежных конструкций, примыкающих к кожуху, а также обеспечение общей пространственной устойчивости всей системы центрального узла;

– конструктивная функция кожуха – опирание холодильных плит, оборудования и механизмов, технологических площадок для обслуживания, газопроводов и пр.

§ 2.2. Кожух воздухонагревателя

Кожух воздухонагревателя имеет практически то же назначение, что и кожух доменной печи. Он обеспечивает герметичность агрегата и создает сжимающие усилия в футеровке стен, исключая появление в ней растянутых зон и связанного с этим трещинообразования.

Однако, нагрузки на него и условия работы несколько иные.

Роль кожуха воздухонагревателя можно проследить по эволюции его конструктивной формы [23].

Впервые в 1830 г. нагрев дутья был осуществлен в трубчатых воздухонагревателях рекуперативного типа. Дутье пропускали через чугунные трубы, которые обогревались снаружи продуктами горения твердого топлива. Максимальная температура в таких воздухонагревателях не могла быть поднята выше 400–450 °С.

В 1857 г. был построен регенеративный кирпичный воздухонагреватель, получивший в дальнейшем всеобщее распространение. Он состоял из цилиндрического кожуха и огнеупорной кладки, расположенной по его периферии. Пространство внутри кладки было заполнено насадкой, нагреваемой продуктами горения твердого топлива, сжигаемого на колосниковой решетке. Впоследствии колосниковая топка была заменена газовой, представляющей собой отделенную от насадки камеру.

Кожух воздухонагревателя, как и кожух доменной печи, по существу, является комплексной многофункциональной конструкцией, представляющей собой многослойную оболочку с неоднородными слоями – «кожух-компенсационный слой-футеровка».

Каждый слой играет свою функциональную роль:

– кожух воздухонагревателя, также как и кожух печи, герметизирует его внутренний объем и, одновременно, создает в футеровке сжимающие реактивные усилия, предотвращая тем самым ее преждевременное растрескивание и разрушение; он также может служить опорной поверхностью для примыкающих лестниц, площадок и т. п.;

– компенсационный слой, позволяя радиальное и вертикальное термическое расширение футеровки, дает ей необходимую свободу, снижая тем самым ее механическое воздействие на кожух;

– футеровка защищает кожух от воздействия температур и одновременно создает одну из основных нагрузок на него – распор, вызванный ее термическим расширением.

ГЛАВА 3 НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОЖУХИ

§ 3.1. Кожух доменной печи

Кожух доменной печи работает в условиях специфических нагрузок и воздействий, по характеру и стабильности существенно отличающихся от нагрузок и воздействий на строительные конструкции зданий и сооружений.

Поскольку доменная печь является, в первую очередь, агрегатом, обеспечивающим технологический процесс, все нагрузки и воздействия на кожух отражают влияние составляющих этапов этого процесса на его напряженно-деформированное состояние.

Так, на первом этапе работы печи – при ее задувке – на кожух действуют внутреннее давление и температура газовоздушной среды, температурный распор кладки. На следующем этапе, при загрузке печи, кожух, кроме того, воспринимает давление загруженных в печь шихтовых материалов, а в дальнейшем, ниже фурменной зоны, и гидростатическое давление жидких продуктов плавки.

При этом в течение всего технологического процесса параметры нагрузок нестабильны и изменяются в зависимости от характера процесса. Так, достаточно изменчивы величины внутреннего давления, температурного распора футеровки. Воздействие футеровки на кожух в значительной степени связано также с ее техническим состоянием, объемом выгорания и пр.

Внутреннее давление газовой среды, доходящее под колошником современных печей до 0,2–0,3 МПа, является изменяющейся циклической нагрузкой, параметры цикла которой зависят от работы турбовоздуходувных машин, воздухонагревателей, состояния воздухопроводов холодного и горячего дутья, фурменных приборов и т. п. Величина давления, связанная также с режимом работы печи и выпуска продуктов плавки, может меняться в широком диапазоне: от максимального расчетного значения до полного сброса давления при переводе печи на «тихий ход».

Термическое расширение футеровки и холодильников, создающее давление на кожух до 1,0–1,5 МПа и достигающее максимальных величин, как правило, в районе лещади, горна и

фурменных приборов, распределяется неравномерно по высоте и периметру печи.

Механическое давление на кожух печи шихтовых материалов и продуктов плавки, действующее на протяжении всего периода эксплуатации печи, практически постоянно по величине и носит квазистатический характер. Однако при возникновении нештатных ситуаций, таких, как обрыв шихты после ее подвисания, трактуемого в [32] как «технологическая авария», указанная нагрузка имеет ярко выраженный динамический характер. Коэффициенты динамичности могут достигать значений: при верхнем зависании – 2,10 (при $H = 1$ м) и 3,10 (при $H = 2$ м), при нижнем зависании – 1,74 (при $H = 0{,}5$ м) и 2,85 (при $H = 1$ м) [1].

Кроме того, в период возведения и ремонтов в кожухе печи возникают усилия, связанные с работой монтажной балки, других монтажных приспособлений и механизмов, носящие, как правило, локальный характер, что приводит к местным перенапряжениям оболочки кожуха. Особенно ярко этот фактор проявляется в конструкциях печи без колошникового копра, с опиранием монтажной балки непосредственно на вертикальные газоходы грязного газа и далее – на купол печи.

Значительным воздействием для оболочки кожуха доменной печи являются также нагрузки, возникающие в процессе его испытания внутренним давлением после возведения и перед пуском в эксплуатацию

Таким образом, очевидно, что напряженно-деформированное состояние кожуха доменной печи определяется комплексной совместной работой и взаимодействием всех составных частей его многослойной конструкции, связано с конструктивными решениями, условиями эксплуатации, и, в значительной степени, зависит от состояния и изменений конструктивной формы и материалов, входящих в состав многослойной оболочки кожуха в процессе эксплуатации.

Как видно из краткой характеристики перечисленных выше основных видов нагрузок и воздействий, по своей величине и зоне возникновения они нестабильны, носят сложный нестационарный характер, зависят от хода технологического процесса и других факторов, меняющихся во времени.

Из изложенного очевидно, что широкий спектр изменяющихся во времени и зависящих от технологического процесса нагрузок и воздействий на кожух не формализован для всех этапов технологического процесса и работы печи.

Нагрузки и воздействия формализовать практически невозможно, поэтому при оценке напряженно-деформированного состояния кожуха печи их можно рассматривать только в идеализированном виде, позволяющем сформулировать основные условия прочности и оценить их взаимосвязь с параметрами технологического процесса.

Перечень таких, частично идеализированных, основных нагрузок и воздействий на кожух доменной печи, классифицированных в соответствии с действующими нормативными документами [16], приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Классификация нагрузок на кожух доменной печи

Характер нагрузки		Наименование нагрузки
1		2
Постоянные		Вес кожуха, футеровки, постоянного оборудования (холодильные плиты, амбразуры и т. п.).
Основные	Кратковременные	Вес стационарного оборудования и его воздействия (загрузочное устройство, сосуды и др.). Вес осадков и отложений. Вес отложений производственной пыли. Рабочее давление газовой среды. Гидростатическое давление продуктов плавки и сыпучих материалов. Температурные технологические воздействия при нормальной работе. Динамические нагрузки от оборудования.

Окончание таблицы 3.1

1		2
Основные	Длительные	Вес людей, ремонтных материалов на площадках с предельными или эксплуатационными расчетными значениями.
		Нагрузки от стационарного оборудования, в том числе, динамические с предельными или эксплуатационными расчетными значениями, при его перегрузках, связанных с технологическим процессом, монтажом, ремонтами и пр.
		Испытательные нагрузки.
		Температурные и ветровые климатические воздействия с предельными или эксплуатационными расчетными значениями.
		Ветровые, гололедные и снеговые нагрузки с предельными или эксплуатационными расчетными значениями.
Эпизодические		Нерегулярно возникающие нагрузки, связанные с нарушениями технологического процесса и поломкой оборудования, в том числе, аварийного характера: осадка шихты, аварийное динамическое воздействие конусов, температурные воздействия при разрушении футеровки или выходе из строя системы охлаждения и др.
		Вес осадков и отложений в агрегатах при резком нарушении режима эксплуатации.
		Сейсмические воздействия.

Учитывая принятые при идеализации нагрузок допущения, очевидно, что достоверная оценка уровня напряженно-деформированного состояния кожуха печи, позволяющая достаточно объективно прогнозировать его прочность и надежность дальнейшей эксплуатации, может быть получена только с помощью экспериментальных наблюдений.

§ 3.2. Кожух воздухонагревателя

В отличие от кожухов доменных печей кожухи воздухонагревателей работают в условиях достаточно стабильных по величине нагрузок и воздействий. Основные виды нагрузок здесь те же – внутреннее давление воздушной среды, ее температура и вызванный ее воздействием рост и распор футеровки. Здесь, как и в доменной печи, нагрузки и воздействия на кожух связаны с параметрами технологического процесса, состоянием футеровки и ее конструктивными изменениями в процессе эксплуатации. На кожух воздухонагревателя действует широкий спектр нагрузок, формализация которых в полной мере практически невозможна, и для анализа напряженно-деформированного состояния также возникает необходимость их идеализации.

Таким образом, здесь так же, как и для доменной печи, напряженно-деформированное состояние кожуха определяется его совместной работой с футеровкой, связано с конструктивными решениями, условиями эксплуатации и состоянием конструкций.

В то же время, отличительным признаком некоторых воздействий и нагрузок на кожух воздухонагревателя является их формализованная цикличность, связанная с чередованием технологических процессов «нагрев», «дутье». При переходе с одного процесса на другой происходит изменение внутреннего давления от $P = 0$ до $P = P_{max}$ и температуры внутренней воздушной среды от значения ее при остывшем воздухонагревателе после цикла «дутье» до значения при нагретом воздухонагревателе после цикла «нагрев».

Принимая во внимание, что процессы «нагрев», «дутье» длятся примерно по 3–4 часа, количество циклов изменения нагрузки достигает в течение года 2–3 тыс. Такая постоянная цикличность с изменением нагрузки от внутреннего давления от нуля до максимума снижает долговечность кожуха в связи с возникновением малоцикловой усталости металла, и ресурс выносливости кожуха определяется количеством циклов $N \le 10^5$.

Кроме основных нагрузок и воздействий, связанных с технологическим процессом, существенное влияние на напряжен-

но-деформированное состояние кожуха оказывают климатические воздействия – солнечное излучение и ветер при отсутствии закрытого здания воздухонагревателей.

Следует также отметить влияние на кожухи воздухонагревателей нагрузок от примыкающих систем газо- и воздухопроводов, особенно от воздухопровода горячего дутья.

Как правило, в районе доменной печи и воздухонагревателей системы воздухопроводов весьма жесткие и не способны без применения специальных устройств компенсировать возникающие усилия от температурных деформаций.

Определенное влияние на усилия в оболочке кожуха доменной печи оказывают нагрузки, возникающие в процессе его испытания внутренним давлением, величина которого на 25% превышает расчетное рабочее давление.

В таблице 3.2 приведен перечень идеализированных основных нагрузок и воздействий на кожух воздухонагревателя с классификацией их в соответствии с действующими нормативными требованиями [16].

Таблица 3.2

Классификация нагрузок на кожух воздухонагревателя

Характер нагрузки		Наименование нагрузки
1		2
Постоянные		Вес кожуха, площадок, футеровки, постоянного оборудования (примыкающих газо- и воздухопроводов и пр.).
Основные	Кратковременные	Вес стационарного оборудования и его воздействия. Вес отложений производственной пыли. Рабочее давление газовой среды. Температурные технологические воздействия при нормальной работе. Динамические нагрузки от оборудования.

Окончание таблицы 3.2

1		2
Основные	Длительные	Вес людей, ремонтных материалов на площадках с предельными или эксплуатационными расчетными значениями. Нагрузки от стационарного оборудования, в том числе, динамические с предельными или эксплуатационными расчетными значениями, при перегрузках, связанных с технологическим процессом, монтажом, ремонтами и пр. Испытательные нагрузки. Температурные и ветровые климатические воздействия с предельными или эксплуатационными расчетными значениями.
Эпизодические		Нерегулярно возникающие нагрузки, связанные с нарушениями технологического процесса и поломкой оборудования, в том числе, аварийного характера, такие как температурные воздействия при разрушении футеровки. Сейсмические воздействия.

ГЛАВА 4 ОСОБЕННОСТИ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

§ 4.1. Доменная печь

Кожух доменной печи находится под постоянным воздействием специфических нагрузок и длительный, не прогнозируемый по времени, период может эксплуатироваться в экстремальных условиях «пиковых» воздействий. Это в ряде случаев приводит к сравнительно невысокой длительности его эксплуатации и, зачастую, создает условия для возникновения нештатных ситуаций.

Учитывая, что доменная печь является основным сооружением комплекса, и выход ее из строя влечет за собой остановку, иногда аварийную, всего технологического процесса, становится очевидной необходимость обеспечения ее высокой надежности и промышленной безопасности.

Особенностью работы кожуха доменной печи, как отмечалось, является совмещение им функций сложного инженерного строительного сооружения и технологического агрегата. Выполняя заданные им технологические функции, кожух подвергается постоянному воздействию различных во времени высоких температур, давлению газовой среды, значительным механическим нагрузкам, коррозионным воздействиям и т. п. При этом сложность и многофакторность ведения технологического процесса далеко не всегда обеспечивает стабильность расчетных эксплуатационных нагрузок и воздействий. Такая неформализованная связь между параметрами технологического процесса и воздействиями на кожух затрудняет прогнозирование и возможность обеспечения его прочности, что в определенных ситуациях может привести к его повреждениям.

Появляющиеся при этом трещины в кожухе опасны как источники просачивания газа, а в нижней зоне печи, в кожухе металлоприемника, в дальнейшем могут служить путем для прорыва чугуна. Такой прорыв является одной из наиболее опасных аварий производства, надолго выводящей доменную печь из строя.

Участки кожуха доменной печи, выполняя каждый свои специфические функции технологического процесса, находятся в различных условиях нагружения.

Кожух лещади и горна работает в весьма тяжелых условиях и является одним из наиболее ответственных участков печи. Кроме обычного радиального воздействия кладки на кожух, его коническая форма обуславливает возникновение дополнительного распора, вызванного вертикальным температурным расширением кладки, действующей в такой форме, как клин. Работа кожуха в этой зоне осложняется также большим количеством отверстий для чугунных и шлаковых леток, фурменных приборов, системы охлаждения, а также тяжелым температурным режимом окололеточной зоны и наличием переломов очертания по высоте.

Кожух заплечиков воспринимает относительно небольшой температурный распор, так как при вертикальном росте кладка перемещается в зону увеличенного радиуса окружности.

Кожух шахты состоит из двух зон – охлаждаемой и неохлаждаемой. В охлаждаемой зоне кожух воспринимает температурный распор кладки и давление газовой среды. Существенное влияние на прочность здесь оказывают многочисленные отверстия под выводные трубки и крепежные болты холодильных плит.

Купол печи воспринимает нагрузку от вертикальных газоходов и при отсутствии колошникового копра – от загрузочного устройства. Купол сильно ослаблен отверстиями в месте примыкания газоходов, а также в местах установки контрольно-измерительных приборов и, в ряде случаев, проемом для смены подвижного лотка загрузочного устройства типа фирмы Paul Wurth (Люксембург) и т. п.

Все это совместно с воздействием внутреннего, избыточного давления создает сложное напряженное состояние в кожухе купола печи.

Перечисленные характерные особенности работы доменной печи предъявляют высокие требования к ее комплексной конструкции, для создания которой особое значение имеют достоверные критерии, определяющие ее эксплуатационную надежность [32].

Характерной особенностью процесса доменной плавки является его идеализируемая непрерывность, что при соблюдении требований стабильности должно было бы обуславливать стационарный характер нагрузок и воздействий, воспринимаемых конструкциями печи в процессе эксплуатации, и их напряженно-деформированное состояние.

Однако реальный доменный процесс носит весьма нестационарный характер, что обусловлено следующими причинами [18]:

– основным противоречием доменного процесса, заключающимся, с одной стороны, в непрерывности доменной плавки и периодичности загрузки печи, и выпуске жидких продуктов плавки – с другой (см. табл. 4.1), 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, настылеобразование и т. п.).

Таблица 4.1

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

Проблема повышения стойкости кожухов доменных печей относится к числу наиболее актуальных, так как от срока безотказной службы кожуха зависит продолжительность межремонтных периодов.

Техническое состояние кожуха печи, в первую очередь, зависит от конструктивных форм и работы технологических конструкций и оборудования. Среди основных факторов, влияющих на него, следует отметить:

– изменение конструктивной формы системы «кожух-футеровка-холодильники» в ходе кампании печи;

– различный характер силовых воздействий в пределах отдельных зон, зависящий от системы охлаждения, наличия проемов и отверстий и т. п.

– нестационарность хода печи, вызванная колебательным характером внутреннего давления, температуры, что приводит к

нестабильности величин силовых воздействий, связанных с параметрами работы печи по высоте и периметру.

Прочность и герметичность кожуха нарушается примыкающими конструкциями системы охлаждения – в зонах сплошных холодильников отверстиями для подводящих и отводящих воду и пар трубок, а также болтов, прикрепляющих холодильники. Размеры отверстий обычно сравнительно невелики, но большое их количество существенно ослабляет кожух [1, 31].

В связи с этим, наряду с равномерным воздействием на кожух внутреннего давления газовой среды, во всех зонах кожуха печи наблюдаются дополнительные возмущения напряженного состояния. К ним, в частности, следует отнести:

– неравномерный распор футеровки вследствие температурного расширения;

– напряжения, возникающие в зонах ослабления отверстиями, местах расположения кладки футеровки впритык к кожуху, переломов вертикального профиля;

– угрозу местных перегревов, вызванных разрушением футеровки или нарушениями в работе системы охлаждения;

– возникновение сосредоточенных усилий в местах соприкасания плитовых холодильников за счет их взаимных поворотов.

Одним из наиболее опасных факторов является местный перегрев металла кожуха, при котором за счет стесненности деформации (расширяющийся при нагреве металл окружен холодной недеформируемой зоной) возникают напряжения, зачастую значительно превосходящие предел текучести металла кожуха.

Исследования работы кожухов доменных печей и воздухонагревателей дает достаточно обширную информацию о нештатных температурных воздействиях, не предусмотренных проектом. Имеются данные о температуре отдельных зон кожуха печи, достигающей 300–600 °С [21].

Перегрев кожухов радикально меняет их напряженное состояние, вызывает деформирование контура поперечного сечения, выпучивание и волнообразование с последующим появлением трещин. Как правило, именно термические воздействия приводят к сложному распределению напряжений, связанному с местным

перегревом кожуха, и становятся основной причиной трещинообразования.

По трактовке [39] возможны два вида напряжений, вызванных температурными воздействиями на кожух.

Первый вид – это напряжения в кожухе, появляющиеся вследствие расширения кладки и холодильных плит и/или из-за малой деформативности материалов компенсационного зазора.

Второй вид – это напряжения в кожухе, появляющиеся вследствие его местного перегрева.

Напряжения первого вида определяются внешними силовыми воздействиями и, соответственно, ими уравновешиваются.

Напряжения второго вида для кожуха внутренне уравновешены.

Оба вида напряжений в зонах вне концентраторов напряжений создают плоско-напряженное (двухосное) состояние, и перед появлением трещины здесь возможно появление пластических деформаций, а сами трещины могут возникнуть внезапно с появлением хрупкого излома.

Воздействие температуры нестабильно. Оно может быть как длительным, постоянным (сотни и тысячи часов), так и кратковременным, повторяющимся (десятки минут), что связано с особенностями технологического процесса, временем обнаружения дефекта и замены износившейся футеровки или вышедших из строя холодильников. Так, температура кожуха печи в зонах выпуска чугуна или шлака циклично изменяется – повышается при выпуске продукта и снижается после выпуска до нормальной. Это происходит столько раз, сколько произведено выпусков.

Кроме того, воздействие температуры вызывает в металле появление процесса теплового охрупчивания, который повышает вероятность хрупкого разрушения. Охрупчивание металла также изменяет характеристики трещиностойкости и снижает размеры допустимых безопасных параметров трещин и других дефектов.

Локальные воздействия запредельных температур приводят к повышению максимальных растягивающих напряжений, которые, в свою очередь, вызывают пластические деформации в кожухе, служащие основой возникновения третьей составляющей напряжений в направлении толщины кожуха (Z-направлении).

Таким образом, кожухи в этих локальных зонах подвергаются трехосному растяжению, наиболее опасному с точки зрения перехода локальных зон металла в хрупкое состояние при наличии концентраторов [7].

Такие процессы, развивающиеся в сварных соединениях кожухов при длительных и повторяющихся температурных воздействиях, при наличии двух- и трехосного напряженного состояния повышают риск хрупкого разрушения.

Известно, что одна из причин перехода локальных зон металла сварных соединений в хрупкое состояние и снижения характеристик сопротивления хрупкому трещинообразованию – развитие в металле тепловой хрупкости в процессе эксплуатации при температурах 300...500 °С [7].

При таких условиях эксплуатации происходят изменения структуры металла с изменением его контролируемых механических свойств, приводящие к их деградации. При этом явление тепловой хрупкости смещает температурную зависимость критического коэффициента напряжений в сторону более высоких температур на 85 °С.

Изменяемые физико-механические свойства и структура металла кожухов, находящихся в эксплуатации, могут служить одним из критериев прогнозирования их долговечности.

В результате местного перегрева, особенно в районах чугунных леток, при выпуске чугуна появляются большие местные сжимающие напряжения, превышающие в ряде случаев предел упругости материала. При охлаждении до обычной температуры появляются, наоборот, растягивающие напряжения и, очевидно, деформации растяжения.

По исследованиям, проведенным в [28], на величину термоупругих напряжений непосредственно влияет стесненность деформаций вдоль образующей оболочки кожуха. При этом соотношение меридиональных и кольцевых напряжений в области пятна локального перегрева составляет 1:3.

Общая картина напряженно-деформированного состояния при местном перегреве нестабильна и в меньшей степени связана с нагрузками и воздействиями. Основным фактором, определяющим его, является температура поверхности и габариты горячего «пятна».

Проведенные натурные экспериментальные исследования показали весьма сложную картину напряженно-деформированного состояния кожуха, в ряде случаев не увязываемую 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. Это может быть объяснено 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 [35].

Это подтверждает наличие общего весьма сложного напряженного состояния, различного по величине в разных зонах кожуха печи [18]. Такая нестабильность напряженно-деформированного состояния кожуха печи, трудно фиксируемая расчетом, приводит к необходимости обоснования промышленной безопасности кожуха печи результатами экспериментальных исследований.

Так, если внутреннее давление газовой среды действует на кожух равномерно и напряжения в кожухе связаны с ним 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 напряжениями от равномерного воздействия на кожух внутреннего давления газовой среды и температурного расширения футеровки, возникают дополнительные напряжения в зоне ослабления отверстиями, а также в местах устройства кладки впритык к кожуху и в местах переломов профиля кожуха.

Напряженно-деформированное состояние кожуха, в первую очередь, зависит от работоспособности многослойной оболочки

«кожух-холодильники-компенсирующий слой-футеровка», системы охлаждения, характеристик огнеупорных материалов футеровки и компенсирующих слоев, физико-механические свойства которых изменяются в зависимости от их температуры и должны отвечать условиям эксплуатации, сохраняясь неизменными во времени.

При интенсификации доменного процесса, происходившего в 70-е годы прошлого столетия, имело место значительное число простоев и аварий печей, основная часть которых связана с разрывами кожухов.

В [3] выполнен анализ влияния технологических особенностей доменной плавки на аварии и простои доменных печей, связанные с разрывами и трещинами кожухов. Установлена взаимосвязь образования разрывов и трещин кожухов печей с нарушениями в технологии ведения доменного процесса (периферийный ход газового потока в печи, неудовлетворительное качество железорудного сырья и т. п.).

Механизм появления трещин в разных зонах печи различен, однако, например, для шахт доменных печей возможна следующая схема.

После прогара кладки и образования гарнисажа шихта вступает в непосредственный контакт с холодильниками, которые выходят из строя, вызывая нагрев кожуха, повышение уровня его напряженно-деформированного состояния и, соответственно, появление трещин. Этому могут способствовать фактические нагрузки, в большинстве случаев, превышающие расчетные, а также газопроницаемость материалов, заполняющих зазоры, что приводит к проникновению горячих газов к кожуху печи и недостаточному теплообмену между кладкой и холодильниками.

Интересна также взаимосвязь прочности кожуха с состоянием его конструктивных элементов, обеспечивающих технологический процесс. Один из возможных сценариев влияния этой взаимосвязи на прочность кожуха шахты печи и развитие аварийной ситуации показан на рис. 4.1 [3, 37].

Приведенный сценарий трещинообразования в кожухе печи достаточно убедительно демонстрирует зависимость долговечности кожуха от работы доменной печи.

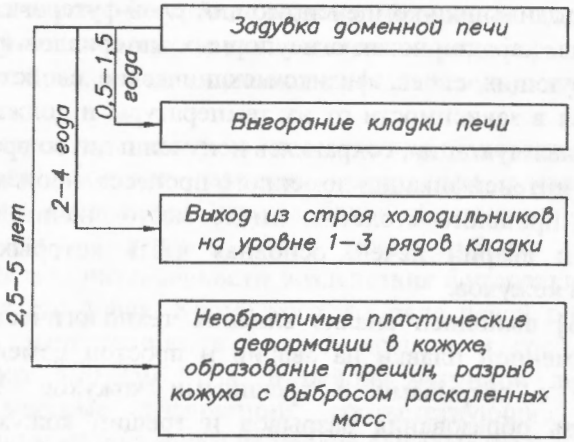


Рис. 4.1. Возможный сценарий развития нештатных ситуаций

Изучение работы конструкций доменных печей в условиях интенсивного ведения технологического процесса показывает, что весьма часто происходят повреждения кожуха и футеровки в зонах горна и лещади – наиболее уязвимых зон в конструкции современной доменной печи. Такие повреждения проявляются в виде перегревов, нарушения плотности кладки в ее периферийной части и, как следствие, растрескивания кожуха.

Рассмотрение отдельных участков доменной печи с различными технологическими процессами позволяет проанализировать причины нестабильности нагрузок и воздействий во времени. Достаточно наглядно это видно из процессов, проходящих в *лещади* доменной печи [22].

В период эксплуатации доменной печи огнеупорная кладка лещади изнашивается, и, как уже отмечалось, в ней образуется углубление-разгар, в котором накапливается значительный объем чугуна. Размеры разрушения кладки определяются конструкцией лещади, качеством огнеупоров, длительностью кампании, температурой в горне. Глубина ямы разгара может достигать 4 м и более, и в ней может накапливаться до 2000 т чугуна [17].

Характерное распределение температур в области лещади показано на рис. 4.2.

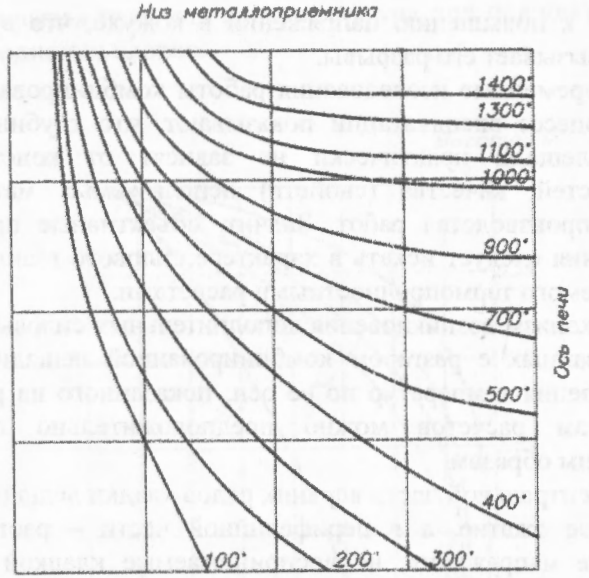


Рис. 4.2. Характерное распределение температур в области лещади

Прогрессирующий разгар кладки, иногда вплоть до фундамента, расстройство швов кладки в периферийной зоне с проникновением чугуна в швы, скопление большого количества жидкого чугуна в лещади меняют картину напряженно-деформированного состояния и создают опасность прорыва чугуна наружу, что, в конечном счете, приводит к нештатной ситуации и сокращению кампании печи.

Явления, вызывающие эти повреждения, слабо изучены, и потому еще недостаточно разработаны способы проектного прогнозирования поведения конструкции при длительной эксплуатации, а также способы своевременного получения информации о состоянии кожуха и футеровки для принятия предупредительных управляющих мер.

Анализ известных аварий, связанных с разрушением кожуха доменной печи в районе горна и лещади, дает основание предполагать, что эти явления возникают в результате расстройства швов кладки, проникновения в швы жидкого чугуна с последующим увеличением его объема во время остывания [25]. Этот процесс

приводит к повышению напряжений в кожухе, что в некоторых случаях вызывает его разрывы.

Современные исследования работы комбинированной лещади в процессе эксплуатации показывают, что глубина и форма разгара лещади практически не зависят от конструктивных особенностей, качества (свойств) используемых материалов и способа производства работ. Значит, объективные причины его образования следует искать в характере силового взаимодействия, определяемого термопрочностными расчетами.

Механизм возникновения дополнительных силовых воздействий, связанных с разгаром комбинированной лещади, с учетом распределения температур по ее оси, показанного на рис. 4.3, по результатам расчетов можно предположительно представить следующим образом.

В центральной части верхних рядов кладки лещади возникает радиальное сжатие, а в периферийной части – растягивающие кольцевые напряжения, не воспринимаемые кладкой (рис. 4.4). Зона сжимающих напряжений занимает лишь небольшую часть толщины нижнего ряда кладки горна, примыкающую к стенкам металлоприемника.

В начале кампании, когда кладка еще цела, температурное расширение в большой степени компенсируется упругими свойствами деформативной прокладки – набойки. Расчетные кольцевые напряжения в металле кожуха верхней, быстрее нагревающейся зоны лещади значительно превосходят напряжения, возникающие в его менее нагретых нижних частях. Однако, по мере разрушения верхних слоев лещади температурный распор в этой зоне уменьшается, а в связи с постепенным нагревом еще сохранившегося сплошного массива кладки величина напряжений в нижних участках кожуха увеличивается.

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, что создает условия для попадания чугуна в зону раскрытия радиальных швов. За счет радиальных сил происходит обжатие и выпучивание верхнего ряда

кладки, открывая путь для прохода чугуна под подошву верхнего ряда углеродистых блоков.

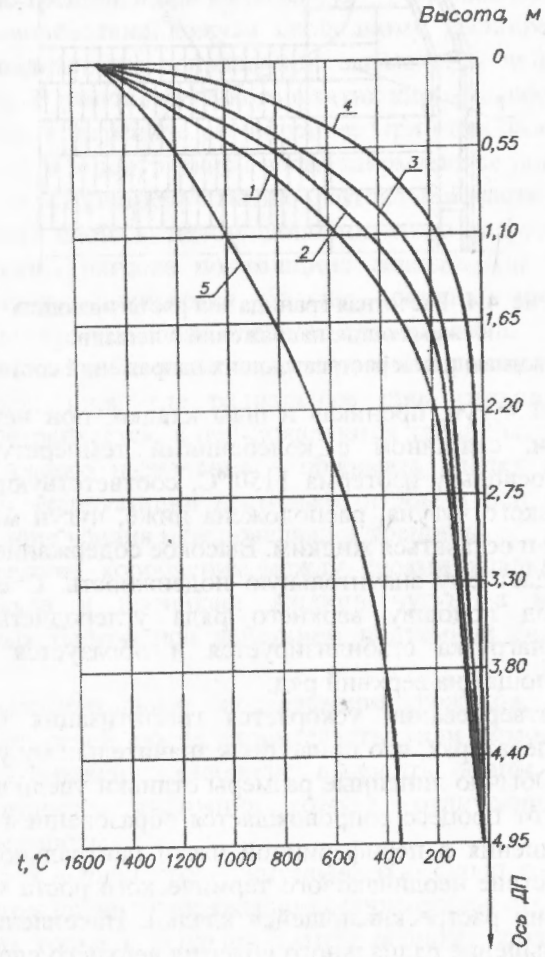


Рис. 4.3. Характерное распределение температур по оси лещади:
1, 2, 3, 4 – нагрев в течение 96, 192, 288 и 384 часов соответственно;
5 – стационарный режим

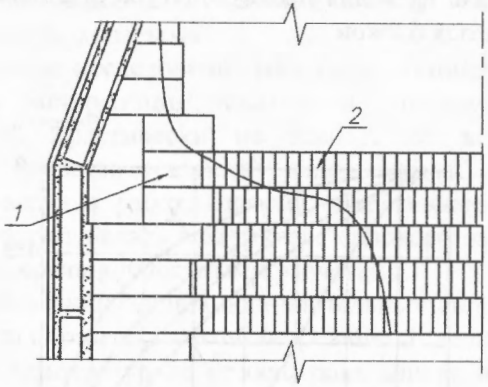


Рис. 4.4. Расчетная граница зон растягивающих и сжимающих напряжений в лещади:
1, 2 – зона сжимающих и растягивающих напряжений соответственно

Жидкий чугун, проникая в швы кладки, при неустойчивом режиме печи, связанном с колебаниями температуры, может застывать. Поскольку изотерма 1150 °С, соответствующая затвердеванию жидкого чугуна, расположена ниже, чугун может вновь расплавиться и оставаться жидким. Высокое содержание фосфора в металле придает ему значительную подвижность. С его проникновением под подошву верхнего ряда углеродистых блоков, поперечная нагрузка стабилизируется и образуется подъемная сила, действующая на верхний ряд.

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 всплытию основной части углеродистых блоков верхнего ряда. Далее процесс повторяется до тех пор, пока чугун будет, не затвердевая, проникать под новые ряды кладки.

Проникновение чугуна в периферию лещади опасно и тем, что чугун, заполняя раскрытые швы в непосредственной близости к

кожуху, остывает, расклинивая при этом блоки, ускоряет разрушение кладки, приводит к возникновению чрезмерных нагрузок на кожух, местным перегревам, и, как следствие, образованию трещин, а при их развитии – разрывов кожуха.

Противодействие кожуха свободному расширению кладки лещади в радиальном направлении вызывает в ней радиальные силы сжатия. В результате такого сжатия кирпича, соответственно, возникает его поперечное расширение. При этом зазоры в кладке уменьшаются, а в центральной части закрываются полностью. Это приводит к двустороннему сжатию центральной части слоя.

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 появляется центральная уплотненная зона и периферийная зона, 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 между слоями кладки образуются пустоты, куда и проникает жидкий чугун, а верхний слой углеродистых блоков под действием подъемной силы стремится всплыть.

Экспериментальные исследования кожухов, проведенные при задувке печей после строительства или ремонта с полной заменой футеровки, позволили выделить этапы напряженно-деформированного состояния кожуха, отличающиеся разным характером работы.

Первый период продолжительностью около года характеризуется ростом уровня напряженно-деформированного состояния во всех точках горна и лещади. В этом периоде наблюдаются *три этапа* изменения напряженно-деформированного состояния.

Первый этап продолжительностью 1–1,5 месяца характеризуется большой интенсивностью повышения напряжений кожуха, преимущественно в районе металлоприемника и верхнего ряда лещади. В течение этого этапа наблюдаются отдельные моменты

падения напряжений с последующим их повышением. Интенсивность повышения напряжений в более глубоких рядах лещади на этом этапе отстает от роста напряжений на уровне первого ряда.

На *втором этапе* первого периода происходит снижение интенсивности роста напряжений в кожухе на уровне горна и первого ряда лещади, но возрастает интенсивность роста напряжений на уровне более глубоких рядов лещади (наибольший рост замечен примерно на уровне 4–5-го рядов).

Третий этап этого периода характеризуется затуханием интенсивности роста напряжений во всех уровнях кожуха горна и лещади.

В дальнейшем, во *втором периоде* эксплуатации печи, продолжающемся обычно до остановки ее на капитальный ремонт II разряда, наблюдается некоторая стабилизация напряжений, в среднем, до уровня 140–170 МПа.

Колебания напряжений в этом периоде не превышают ± 20–30 МПа.

После этого отмечается *третий период* изменения напряженного состояния кожуха во время остановки печи, когда температура в ней снижается до температуры окружающей среды. Ко времени окончания ремонта напряжения в кожухе в районе первого ряда лещади снижаются в среднем на 40 МПа, а остаточные напряжения остаются на уровне около 100 МПа.

При анализе результатов непрерывного контроля были отмечены колебания напряжений с амплитудой до 30 МПа, происходящие в течение нескольких часов. Установление причин этих колебаний требует дополнительных исследований.

Совершенно иная картина динамики напряженного состояния кожуха печи в районе горна и лещади наблюдается при вводе печи в эксплуатацию после капитального ремонта II разряда, перед которым не произведен предварительный выпуск жидкого чугуна, скопившегося в лещади при ее разгаре во время предшествующей эксплуатации. Оставшийся, затвердевший за время ремонта, чугун (так называемый «козел»), расширяясь вновь при разогреве печи после ремонта, оказывает значительное механическое воздействие на кожух и футеровку, раздвигая ее, и зачастую, разрушая.

Режим работы печи на этом этапе может квалифицироваться

как нестационарный, требующий принятия мер по контролю и стабилизации технологического процесса и оптимизации его параметров. По трактовке [3] такие меры относятся к так называемому «кризисному менеджменту» и должны выполняться на основании данных о напряженно-деформированном состоянии кожуха.

Основания для принятия таких мер подтверждаются и тем, что любой аварии предшествуют нестандартные ситуации, развитие которых постепенно приводит к этой аварии с различными последствиями [6].

Анализ результатов многократного проведения контроля напряжений при задувках печей после капитальных ремонтов II разряда без предварительного выпуска жидкого чугуна показал, что задувочный период здесь длится примерно 1–1,5 месяца и может быть разбит на пять этапов (рис. 4.5), которые обобщенно можно характеризовать следующим образом.

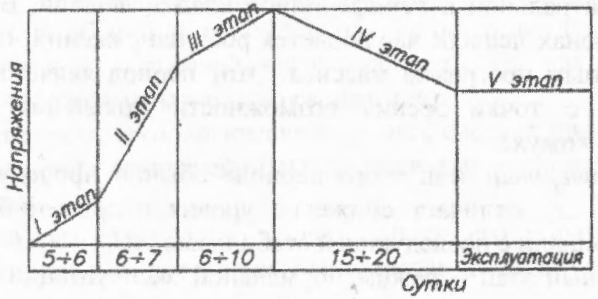


Рис. 4.5. Характерные этапы напряженного состояния кожуха лещади при задувках печи после капитального ремонта II разряда без предварительного выпуска жидкого чугуна

На первом этапе в течение 5–6 суток с момента начала задувки печи происходит медленный рост деформаций кожуха, определяемый тихим ходом печи при низком давлении под колошником.

Второй этап длится, как правило, 6–7 суток. Наблюдается интенсивный рост деформаций кожуха лещади, связанный с последовательным повышением температуры застывшего в яме разгара чугуна – «козла». Чаще всего максимальные кольцевые

напряжения отмечаются в верхней, более нагретой, зоне лещади.

Следует иметь в виду, что в отдельных случаях, на II этапе задувочного периода напряжения в кожухе горна и лещади могут достигать величины предела упругой работы материала кожуха. Это может быть объяснено снижением или исчерпанием компенсационной способности кладки при повторном ее разогреве, вследствие закоксования углеродистой набойки и произошедших в кладке деформаций ползучести, имеющих необратимый характер, и другими причинами, прежде всего, несоответствием перемещений термического расширения размерам компенсационных слоев.

Третий этап имеет протяженность 6–10 суток. Здесь отмечается снижение темпов роста деформаций при росте их уровня. В этот период происходит относительная стабилизация температурных деформаций застывшего в яме разгара чугуна. Тепловой поток расходуется на прогрев периферийной кладки горна и лещади, а также центральной и периферийной кладки лещади. В средней и нижней зонах лещади наблюдается рост напряжений, связанный с постепенным прогревом массива. Этот период является наиболее опасным с точки зрения возможности появления трещин и разрывов кожуха.

Четвертый этап этого периода обычно продолжается 15–20 суток. Его отличает снижение уровня напряжений в кожухе горна и лещади с последующей стабилизацией.

Пятый этап – режим нормальной эксплуатации. Снижение уровня напряжений здесь связано, вероятно, с полным прогревом на границе чугуна и периферийной кладки, при котором происходит постепенное размягчение и расплавление «козла».

Такая ситуация, нестабильная в процессе эксплуатации, требует особого внимания к прочности кожуха в этом районе, так как любая трещина здесь является источником просачивания газа и в дальнейшем может послужить причиной прорыва чугуна, что является одной из наиболее опасных аварий, надолго выводящей доменную печь из строя. При этом следует иметь в виду, что появлению разрывов кожуха вследствие расстройства швов кладки всегда предшествует изменение напряженного состояния кожуха. Это важное обстоятельство не всегда используется для получения систематической информации о состоянии конструкции.

Контроль напряжений в кожухе печи при ее задувке после капитального ремонта без предварительного выпуска чугуна из ямы разгара позволяет фиксировать динамику напряжений во всем периоде задувки – в начальный период после ввода печи в эксплуатацию и в период стабилизации напряжений в кожухе в ходе нормальной эксплуатации. В случае, если будут зафиксированы резкие изменения в напряженном состоянии кожуха, это будет свидетельствовать об отклонении от нормальной работы конструкций и необходимости принятия срочных предупредительных управляющих мер по корректировке параметров технологического процесса.

При высоких напряжениях и, особенно, высокой динамике их роста к таким мерам могут быть отнесены различные технологические мероприятия, в том числе, временное понижение расхода и температуры дутья, ограничение использования для дутья фурменных приборов, расположенных в зоне максимальных напряжений, особенно в районе входа прямого воздухопровода горячего дутья в кольцевой воздухопровод, где, как правило, фиксируются максимальные напряжения и др.

Форсировать технологический процесс следует при наметившемся понижении напряжений на достигнутых параметрах и их стабилизации.

Форма разгара кладки лещади, сроки его образования и степень разрушения футеровки периферийной части зависят от конструктивных особенностей печи.

Так, шамотная лещадь на доменных печах старой конструкции, выполненная в виде сплошного цилиндрического массива без нижнего охлаждения, в современных условиях оказалась весьма нестойкой.

Современная комбинированная лещадь (рис. 4.6), центр которой выполнен из высокоглиноземистого кирпича, а по периферии и снизу – из углеродистых блоков с охлаждением снизу, является более стойкой по сравнению с шамотной лещадью. Разгар ее устойчивый, неглубокий – 500–800 мм. Срок службы печей с такой лещадью между капитальными ремонтами I разряда бывает в 2 раза больше.

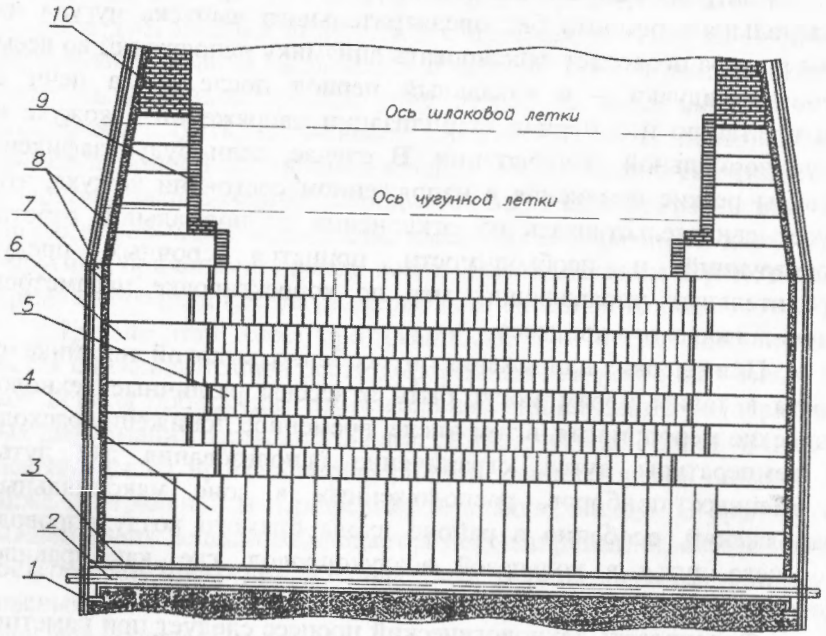


Рис. 4.6. Компоновка лещади доменной печи:
1 – фундамент печи; 2 – охлаждение лещади; 3 – днище печи;
4 – графитированные блоки; 5 – высокоглиноземистый кирпич;
6 – углеродистые блоки; 7 – углеродистая масса; 8 – холодильные плиты;
9, 10 – шамотный кирпич

Однако конструкцию огнеупорной кладки комбинированной лещади нельзя считать удовлетворительной с точки зрения ее механической прочности при деформационных процессах. Предусмотренные «Инструкцией по футеровке и сушке доменных печей и их вспомогательных устройств» [20] компенсационные зазоры не обеспечивают полную компенсацию теплового расширения кладки и особенно ее высокоглиноземистого массива. Защемление высокоглиноземистых огнеупоров между двумя рядами углеродистых блоков на периферии препятствует свободному вертикальному росту центрального массива, что приводит к большим вертикальным перерезывающим усилиям в углеродистых блоках.

Проведенные расчеты напряженно-деформированного состояния лещади с учетом ее неравномерного нагрева показали, что

сжатие верхних слоев лещади происходит в радиальном направлении. В периферийной же кладке присутствуют кольцевые растягивающие напряжения, которые кладкой не воспринимаются. Именно они инициируют расстройство швов в кладке и появление радиальных трещин.

С течением времени растянутая зона увеличивается, и в стационарном режиме для нижних слоев ее граница смещается от границы центрального массива к оси доменной печи. При этом зона сжимающих напряжений занимает лишь небольшую часть нижнего ряда кладки, примыкающую к стенкам металлоприемника. Таким образом, при наличии каких-либо повреждений в этой зоне появляется возможность проникновения чугуна через периферию лещади под верхний ряд огнеупорной кладки и ниже, вплоть до границы, определяемой изотермой затвердевания чугуна.

Приведенные особенности процессов, возникающих в лещади, нагрузок и воздействий, изменяющихся с течением времени, требуют систематической информации о напряженном состоянии кожуха лещади для обеспечения его достаточной прочности в различные периоды эксплуатации печи путем корректировки параметров технологического процесса.

В связи с этим, только контроль действительного уровня напряженно-деформированного состояния кожуха может обеспечить обратную связь технологиического процесса с прочностью несущих конструкций печи и обоснованное принятие необходимых мер по оптимизации его параметров.

Неформализованностью нагрузок и воздействий отличается зона *горна и фурменных приборов*. Кожух горна работает в весьма тяжелых условиях и является одним из наиболее ответственных элементов печи. Кроме обычного радиального воздействия кладки на кожух, его коническая форма обуславливает возникновение дополнительного распора, вызванного вертикальным температурным ростом кладки и оказывающим на кожух клиновое воздействие.

Напряженное состояние кожуха в этой зоне осложняется большим количеством отверстий для чугунных и шлаковых леток, фурменных приборов, тяжелым температурным режимом окололеточной зоны, изменениями геометрии кожуха по высоте. На напряжения в кожухе влияет и то, что интенсивно нагреваясь и

охлаждаясь, соответственно при выпуске чугуна и последующем охлаждении, металл кожуха окололеточной зоны стремится деформироваться, чему препятствуют примыкающие участки кожуха, сохраняющие относительно постоянную температуру.

Совокупность приведенных факторов приводит к нестабильности нагрузок и воздействий на кожух горна и делает их зависимыми от технологического процесса.

Напряженно-деформированное состояние кожуха *шахты* также нестабильно и находится в прямой зависимости от ряда факторов, в том числе, примененного типа холодильных плит, наличия или отсутствия (выгорания) футеровки и т. п.

Применение сменяемых холодильных плит требует устройства вырезов, в значительной мере ослабляющих кожух и, кроме того, создающих дополнительную концентрацию напряжений, коэффициент которой доходит до 4–6. Применение, в ряде случаев, в нижней части шахты горизонтальных холодильников также предполагает большие вырезы, значительно ослабляющие кожух.

Кладка футеровки шахты имеет коническую форму и, как правило, выполняется ступенчатыми участками, что создает неравномерное давление на кожух печи, величина которого, в свою очередь, зависит от состояния кладки в процессе эксплуатации.

Как следует из сказанного, кожух доменной печи работает в условиях воздействия высоких и неравномерных температур, давления газа, жидкого чугуна, химических воздействий продуктов плавки и пр. В процессе эксплуатации эти воздействия вызывают деформации огнеупорной кладки, компенсирующего слоя и кожуха, в результате чего в последнем возникают высокие напряжения. При этом в кладке также возникают напряжения, способствующие ее износу. Степень этого износа зависит, в первую очередь, от конструктивной формы доменной печи, ее размеров и материалов.

Для снижения давления, передаваемого на кожух кладкой при нагреве, зазор между кожухом и кладкой заполняется деформирующимся материалом, что должно обеспечить компенсацию расширения кладки, ее роста и более равномерное распределение давления кладки на кожух.

В местах пересечений различных по форме оболочек возникают изгибающие усилия, значительно повышающие общий уровень напряженно-деформированного состояния.

Таким образом, уровень напряженно-деформированного состояния кожуха печи связан не только с нагрузками и воздействиями, которые сами по себе нестабильны по величине, зоне и времени возникновения, носят сложный нестационарный характер, зависящий от хода технологического процесса и других факторов, изменяющихся во времени, но и от формы и состояния конструкций, стадии технологического процесса и т. п.

Анализ ряда аварий показал, что причиной их являются нарушения в работе футеровки и системы охлаждения печей. На многих кожухах имеет место выход из строя холодильников, перегрев и, как следствие, деформации и разрывы кожуха.

На стойкость кожуха доменной печи влияет и технология ведения доменного процесса. Если отдельные факторы, определяющие ход доменной плавки, незначительно влияют на прочность кожуха, то их совокупность может оказать существенное воздействие на прочность конструкций.

Так, в [3] отмечено, что периферийный ход печи при выгоревшей кладке может повлечь интенсивный прогар холодильников и привести к аварийной ситуации. Это может быть, как следствие образования местных газовых потоков, одной из причин образования трещин в кожухе печи объемом 5000 м^3 в зоне примыкания газоотводов. Очевидно, что этому сопутствуют большие напряжения в кожухе.

Анализ результатов обследований и испытаний показал, что в кожухе доменной печи возникают растягивающие напряжения как по кольцу, так и в вертикальном направлении. Как известно, наличие двухосного, а в отдельных зонах и трехосного, растяжения снижает степень деформативности кожуха и способствует его хрупкому разрушению. При этом отмечено, что в кожухе лещади и горна эти напряжения зачастую достигают предела текучести материала кожуха.

В кожухе шахты напряжения иногда также превышают предельный уровень. Однако, разрушения кожуха, как правило, начинаются здесь в местах расположения концентраторов (переломов геометрии кожуха, депланаций листов кожуха в стыках, вырезов под отверстия и пр.).

Выполненные расчеты и результаты обследований и испытаний говорят о многофакторном влиянии на напряженно-деформированное состояние кожуха печи комплекса нагрузок и воздействий, связанных с технологическим процессом, что делает достаточно сложным формализацию критериев, определяющих общую прочность конструкций.

Наиболее надежными в этих условиях можно считать результаты измерения фактических напряжений, которые дают объективный критерий для общей оценки напряженно-деформированного состояния кожуха доменной печи.

§ 4.2. Воздухонагреватели

Технологический процесс, происходящий в воздухонагревателе, создает весьма сложные специфические условия работы для кожуха и других элементов, входящих в состав этой конструкции.

Внутри воздухонагревателя, представляющего собой цилиндрический сосуд, по периферии располагается огнеупорная кладка, а внутреннее пространство заполняется так называемой насадкой, состоящей из огнеупорных блоков, которые расположены над колосниковой решеткой, где происходит горение газового топлива.

Горение происходит в отдельной камере, расположенной несимметрично в боковой части внутреннего объема агрегата (рис. 1.6). Эта схема воздухонагревателя является классической и со многими усовершенствованиями широко применяется в промышленности.

Воздухонагреватель является комплексной конструкцией, представляющей собой многослойную оболочку с неоднородными слоями – «кожух-компенсационный слой-футеровка». Каждый из них играет определенную роль:

– футеровка защищает кожух от воздействия высоких температур и, одновременно, создает одну из основных нагрузок на него, вызванную ее термическим расширением;

– компенсационный слой обеспечивает возможность радиального и вертикального расширения футеровки, дает ей необходимую свободу, снижая, тем самым, ее механическое 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 ее преждевременного растрескивания.

Отсутствие обоснованной статистики отказов не позволяет определить достаточно четкие критерии достижения 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 надежности и промышленной безопасности, оказывается подход, включающий мероприятия по повышению надежности отдельных элементов и деталей конструкций.

При вводе в эксплуатацию воздухонагреватели первоначально подвергаются сушке и разогреву, а затем переводятся на постоянный эксплуатационный режим. В период разогрева воздухонагревателя происходит постепенный нагрев слоев футеровки стен, насадки и купола до высоких температур, сопровождающийся ее термическим расширением.

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 и воздух, необходимый 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 после прохода по каналам насадки продукты горения, с максимальной температурой 400 °С выходят из воздухонагревателя через дымовые штуцера обычно в дымовой боров или в отдельный дымопровод, а затем через дымовую трубу выбрасываются в атмосферу.

После достижения куполом заданной температуры и окончания нагрева воздухонагреватель ставится на дутье. При этом прекращается горение газа в горелке, и в каналы нагретой насадки через поднасадочное устройство подается холодный воздух. Поднимаясь по ним вверх, он нагревается, проходит наиболее 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 воздухопровод горячего дутья – в доменную печь.

Футеровка периферийных стен при нагревании не может свободно расширяться, поскольку ее многослойная конструкция уложена вплотную к стальному кожуху. Так как кожух защищен от нагревания теплоизоляционным материалом и частично огнеупорной кладкой, при повышении температуры внутри воздухонагревателя его диаметр за счет теплового расширения увеличивается незначительно. Огнеупорная кладка нагревается до высокой температуры и, хотя она обладает меньшим по сравнению с кожухом коэффициентом теплового расширения, ее размеры существенно увеличиваются. Этому увеличению размеров футеровки препятствует кожух, вызывая радиальное силовое взаимодействие между кожухом и футеровкой по поверхности контакта, в результате чего кожух оказывается растянут, а футеровка сжата.

Одновременно с радиальным увеличением размеров происходит температурное расширение в меридиональном (вертикальном) направлении. При этом перемещениям футеровки препятствуют силы трения, возникающие на поверхности контакта футеровки и кожуха, которые увеличиваются по мере увеличения радиальных сил. В результате действия сил трения кожух в меридиональном направлении так же растянут, а основная часть футеровки так же сжата.

Величина и распределение сил трения, а, следовательно, и вызванные ими меридиональные напряжения зависят от тех же параметров, что и кольцевые (радиальные) усилия, а также от коэффициентов трения между элементами конструкции.

Разогрев воздухонагревателя, характеризуемый интенсивностью подъема температуры футеровки, составом носителей тепла и местом их ввода в воздухонагреватель, а также организацией отвода продуктов сушки, оказывает существенное влияние на возникновение начальных повреждений огнеупорных кострукций воздухонагревателя.

На величину напряжений также влияют свойства материалов футеровки – величина модуля упругой пластичности, коэффициент линейного расширения, величина усадки и ползучести кладки в функции от температуры, давления и времени.

Для кожухов воздухонагревателей так же, как и для кожухов доменных печей остро стоит вопрос опасности их локального перегрева и возникновения «горячего пятна», приводящих к появлению трещин в растянутой зоне футеровки, проникновению через них горячего воздуха и снижению характеристик сопротивления хрупкому трещинообразованию – развитию в металле тепловой хрупкости в процессе эксплуатации при температурах 300...500°С [11].

По мере увеличения степени охрупчивания стали резко уменьшается критический размер (глубина) трещины, вызывающей хрупкое разрушений листовой футерованной конструкции. Так, для кожуха воздухонагревателя, изготовленного из стали 09Г2С, критический размер трещины в стыковом сварном соединении толщиной 14 мм равный 32 мм снижается до 2 мм после охрупчивания на 62 °С [10, 12, 15].

В случаях, если в применяемых конструкциях футеровки не обеспечивается обжатие всех ее окатов, то окаты, расположенные ближе к кожуху, зачастую оказываются растянутыми, и в кладке, плохо воспринимающей растяжение, появляются неплотные швы, нарушающие целостность футеровки.

В период нормальной эксплуатации при циклической работе воздухонагревателя в режимах «дутье», «нагрев» возможно дальнейшее раскрытие щелей. Это связано с тем, что при постановке воздухонагревателя на дутье и переводе на постоянный эксплуатационный режим холодный воздух, подаваемый в поднасадочное устройство, проходя через насадку и камеру горения, нагревается до 1100–1200 °С. К концу периода дутья температура купола снижается на 100–150 °С, а поднасадочного устройства – на 200–300 °С.

Вследствие изменения температуры внутренних окатов футеровки (а, следовательно, и изменения величины термического расширения) происходят периодические взаимные смещения растянутых частей футеровки. При неудачном выборе материалов или неоптимальном конструировании пакета чередующихся слоев футеровки под влиянием циклических периодов нагрева и дутья происходит измельчение и деградация свойств деформативных материалов и, соответственно, раскрытие щелей. Через образовавшиеся в кладке и компенсационном слое пустоты горячие газы и воздух проникают к кожуху.

Это приводит к местному повышению температуры кожуха в период нагрева и его охлаждению во время дутья, что вызывает циклические изменения напряжений, приводящие к малоцикловой усталости и возможным последующим разрушениям.

Таким образом, прочность и долговечность конструкции воздухонагревателя определяются двумя факторами:

– напряженно-деформированным состоянием кожуха и футеровки как в первоначальный период разогрева, так и в процессе эксплуатации;

– надежностью защиты кожуха от проникновения горячих газов, предотвращающей циклические изменения температуры кожуха и его перегревы.

Экспериментальные исследования работы воздухонагревателей позволили выделить две стадии их напряженно-деформированного состояния – период разогрева при вводе в эксплуатацию и период нормальной эксплуатации.

На *первой стадии* при разогреве холодного аппарата до рабочей температуры происходит постепенный нагрев слоев футеровки стен, насадки и купола, сопровождающийся их термическим расширением и соответствующим ростом напряжений в кожухе. Силы взаимодействия, распределенные по поверхности контакта периферийной футеровки стен и кожуха, сжимают футеровку и растягивают кожух.

Величина сил взаимодействия и возникающих напряжений в кожухе и футеровке зависят от материалов, примененных для кладки стен, температуры нагрева, конструкции и размеров всех элементов, образующих кожух и футеровку.

Продолжительность этой стадии связана с временем стабилизации температуры по высоте и толщины футеровки периферийных стен.

Вторая стадия характеризуется снижением уровня напряжений по сравнению с уровнем, достигнутым к концу первой стадии, в результате их релаксации, вызванной пластическими деформациями и ползучестью материалов футеровки.

Анализ технических решений и имеющиеся результаты экспериментальных исследований действующих воздухонагревателей показали, что преобладающее влияние на уровень напряженно-деформированного состояния оказывает термическое

расширение футеровки. При недостаточной его компенсации возникают недопустимо высокие усилия, значительно снижающие долговечность кожуха и футеровки.

В футеровке высокотемпературных воздухонагревателей, где широко применяется высокоплотный малоразрыхляющийся динасовый кирпич, сжимающие напряжения при начальном разогреве достигают 7 МПа, что в ряде случаев приводит к его растрескиванию и повреждению.

С другой стороны, свободное деформирование нагретого кирпича приводит к тому, что отдельные слои футеровки оказываются не обжаты кожухом, что вызывает невоспринимаемые ею растягивающие усилия и, как следствие, появление трещин.

Это создает возможность проникновения горячего воздуха к кожуху, его локальным перегревам и возникновению на кожухе «горячего пятна». При таких воздействиях даже большая толщина кожуха не предохраняет кожух воздухонагревателя от разрушения. Механизм реагирования кожуха на его локальный перегрев аналогичен отмеченному в § 4.1.

В связи с этим, определяющая роль в обеспечении уравновешенной взаимосвязи между кожухом и футеровкой и исключении растянутых зон футеровки принадлежит компенсационным зазорам – их величине и физико-механическим свойствам материалов их заполнения.

В современных воздухонагревателях компенсация основной части термического расширения достигается устройством кольцевых зазоров, заполняемых деформативными материалами, выгорающими материалами – картоном, опилками, деревом и кольцевыми воздушными зазорами.

Назначение слишком больших или неправильно расположенных компенсационных зазоров приводит к недостаточному обжатию футеровки, образованию щелей и ее расстройству, являющемуся причиной циклических перегревов кожуха, а иногда и обрушения футеровки.

С целью снижения напряжений в период разогрева аппарата в радиальные вертикальные швы кладки огнеупорной стены целесообразно устанавливать деревянные прокладки, которые в процессе разогрева выгорают, освобождая место для деформации кирпичей, что позволяет снизить уровень напряжений в кладке.

Так, при расчетных напряжениях, достигающих без установки прокладок 7 МПа, их применение позволяет снизить напряжения до 5 МПа (рис. 4.7).

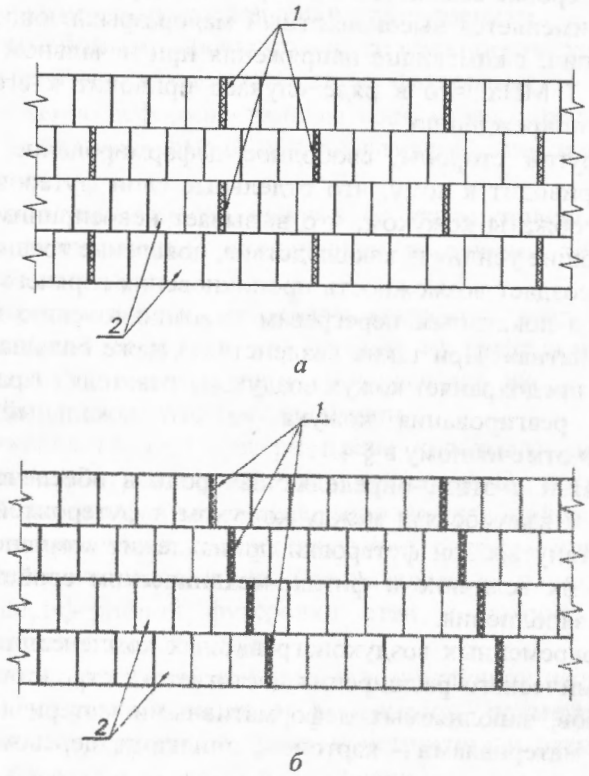


Рис. 4.7. Схема расположения выгорающих прокладок в зоне динаса:
а – вариант I; *б* – вариант II;
1 – прокладки; 2 – огнеупорный кирпич

Аналитические проработки вопросов прочности конструкций воздухонагревателей показывают, что могут быть осуществлены конструктивные решения кожуха и футеровки с обжатием всех ее слоев, обеспечивающие ее плотность как во время разогрева, так и во время дутья. При этом благодаря правильному подбору компенсационных слоев, на кожух и на кладку могут передаваться сравнительно небольшие нагрузки.

Необходимо иметь в виду, что даже большая толщина кожуха не предохраняет кожух воздухонагревателя от разрушения, если возможны циклические местные нагревы кожуха горячим воздухом, проникающим через кладку.

Большую роль в решении проблемы компенсации термического расширения футеровки и, тем самым, снижения нагрузки на кожух сыграло широкое применение для заполнения кольцевых зазоров матов на каолиновой основе для высокотемпературной зоны и на асбовермикулитовой – для низкотемпературной. По данным проведенных исследований максимальные значения сжимаемости и коэффициенты возвратимости матов на каолиновой основе в виде термообработанных плит МКРП-340 равны соответственно 58 % и 0,64. Это свидетельствует об удовлетворительных деформативных качествах плит, более эффективных по сравнению с материалами, ранее применявшимися для периферийной футеровки воздухонагревателей.

В работе воздухонагревателей, содержащих в компенсационных зазорах материалы низкой деформативности, была зафиксирована и третья стадия, когда в каждом последующем межремонтном периоде наблюдалось новое повышение уровня напряженного состояния кожуха.

Объяснением этому могут быть свойства волокнистых материалов, заполняющих компенсационные зазоры до применения минеральных матов – осыпаться и уплотняться, снижая при этом собственную деформативность, и, следовательно, способность компенсировать тепловое расширение огнеупорных окатов футеровки.

Кроме того, уровень напряжений в кожухе зависит от его температуры как функции температуры наружного воздуха, и от свойств компенсационного зазора. Так, известно, что в летнее время температурное давление кладки на кожух фактически отсутствует, и кожух работает только на давление дутья. С понижением температуры в зимнее время в кожухе возникали дополнительные напряжения, вызванные распором кладки, исчерпавшей, как и материал компенсационного зазора, свою деформативность.

В среднем, при понижении температуры кожуха на 15–20 °С кольцевые напряжения в нем увеличиваются на 25–35 МПа.

Глава 5 КРИТЕРИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КОЖУХОВ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

§ 5.1. Основные принципы обеспечения прочности и надежности кожухов

Одной из главных характеристик эксплуатационной надежности и промышленной безопасности сооружений доменного комплекса является прочность кожухов доменной печи и воздухонагревателей. Именно на них, в первую очередь, сказываются изменения рабочих параметров, нарушения технологических процессов, различного рода нештатные ситуации и пр.

Значительное количество простоев печей происходит по причинам, связанным с повреждением кожухов. Так, по данным [6] количество аварий, связанных с кожухами доменных печей, составляет 6 %, а количество простоев, связанных с кожухами – 8 % от общего числа простоев. Кроме того, согласно данным [32] увеличение частоты простоев на 5 % снижает удельную производительность печи на 25–30 %.

Поэтому проблема длительной прочности кожухов доменных печей и воздухонагревателей является приоритетной, и большое внимание должно быть обращено на критерии, обеспечивающие их надежную работу, главные из которых следующие:

– качество стали кожуха;

– температура кожуха в период эксплуатации;

– уровень напряженно-деформированного состояния кожуха в период эксплуатации.

Соответствие этих критериев требованиям прочности и надежности дает возможность кожухам нести силовую нагрузку во все периоды работы, включая пусковые периоды и пиковые ситуации при нарушении эксплуатационных режимов.

Большое влияние на надежность кожухов оказывают также параметры и характер ведения технологического процесса. Имея в виду отмеченную ранее недостаточную формализацию действующих нагрузок, их, в большинстве случаев, случайный по величине и другим параметрам характер, нарушение технологического процесса приводят к смене напряженного состояния конструкций.

Для кожуха доменной печи это, в первую очередь, относится к стабильности работы системы охлаждения, когда выход из строя холодильников приводит к «прогарам» футеровки, дополнительным напряжениям из-за местных перегревов или локального охлаждения кожуха наружным поливом, периферийному или канальному ходу печи, «обрывам» зависшей шихты и т. п.

В связи с этим очевидно, что кожухи сами не в состоянии обеспечить надежную работу агрегатов. Не менее важна при этом роль сопутствующих элементов – системы охлаждения печи, футеровки, компенсаторов и пр.

Все эти факторы не носят стабильного характера и весьма трудно поддаются теоретическому и расчетному анализу. Поэтому важнейшим направлением, обеспечивающим достаточную надежность конструкций, является их контролируемая правильная эксплуатация. В сочетании с упомянутыми выше критериями она позволяет вести нормальный технологический процесс и исключить нештатные ситуации.

Надежная эксплуатация и долговечность кожухов доменной печи и воздухонагревателей зависят не только от соответствия проекту технологических параметров и условий работы, но и от эксплуатационных мероприятий, проводимых по результатам систематического наблюдения за конструкциями и контроля их технического и напряженного состояния.

По выводам [3] обеспечение прочности кожуха доменной печи является задачей многофакторной, решение которой связано с правильным выбором материала кожуха, оптимальных технологических параметров дутья, уровнем обогащения его кислородом, свойствами загружаемых в печь материалов, физико-механическими характеристиками материалов футеровки, типами примененных холодильников, стабильностью технологического режима и т. п.

Проблема надежности кожухов обостряется тем, что, кроме прямых затрат на ремонты, предприятия несут убытки от простоев, а возможные аварии чреваты большими разрушениями с тяжелыми последствиями. Поэтому срок надежной эксплуатации связан с убытками предприятия вследствие аварийных ремонтов. Если учесть непрерывный характер доменного производства, то убытки в данном случае будут особенно велики.

Следует также отметить, что из-за отсутствия формализованных постоянных средств контроля температуры и уровня напряженного состояния кожухов результаты наблюдения за ними службы эксплуатации, проводящей периодические осмотры, недостаточно информативны.

В связи с прогрессирующим развитием технологических процессов доменного производства реконструкция предприятий сталкивается также с проблемой значительной разницы в сроках физической и моральной долговечности сооружений. И если срок физической долговечности металлических конструкций составляет в среднем 50–60 лет, то моральная долговечность, как правило, не превышает 10–20 лет.

Для кожухов доменных агрегатов характерны следующие основные причины, влияющие на снижение физической долговечности конструкций:

– старение металла из-за образования свободного цементита при рекристаллизации, возникающей при нагреве конструкций до температуры 100–200 °С и более, возникающем в процессе эксплуатации, при этом происходит сильный рост зерен, снижающий механические характеристики стали;

– перегревы металла кожухов и связанные с этим изменения свойств металла, в том числе, возникновение тепловой хрупкости;

– повреждения конструкций вследствие недостаточной изученности условий их работы или неквалифицированной эксплуатации.

Одной из основных особенностей кожухов доменных агрегатов является также зависимость надежности и долговечности от условий ввода агрегата в эксплуатацию. Эта взаимосвязь просматривается как при вводе в эксплуатацию новых агрегатов, так и при пуске их после капитальных ремонтов.

Основной критерий оптимального ввода агрегата в эксплуатацию состоит в рациональном регулировании технологических параметров на этом этапе с целью оптимизации нагрузок и воздействий на кожух от футеровки как главных составляющих в общем напряженном состоянии.

Поскольку снизить нагрузки на кожух от воздействия футеровки можно только путем обеспечения компенсации ее температурных деформаций, основная задача состоит в том, чтобы повы-

шение эксплуатационных параметров работы агрегата – температуры и внутреннего давления – происходило последовательно, после реализации этих температурных деформаций футеровкой и материалами заполнения кольцевых воздушных зазоров и зазоров с выгорающими материалами.

Несоблюдение этого положения может привести к появлению чрезмерных нагрузок на кожух агрегата, высокому уровню напряжения, трещинообразованию и ограничению в дальнейшем его технологических параметров.

Такой принцип оптимизации нагрузок на кожухи характерен и для кожуха доменной печи, и для кожуха воздухонагревателя.

В безопасности кожухов большую роль играет своевременность корректировки технологических параметров при задувке доменных печей, вводимых в эксплуатацию после капитального ремонта, особенно если он выполнен без предварительного слива чугуна из ямы разгара лещади. Характер динамики напряженно-деформированного состояния кожуха лещади в этом случае зависит от сроков проведенного ремонта и объема чугуна, оставшегося не слитым в яме разгара лещади печи.

В случае, если простой печи продолжался длительное время, достаточное для застывания оставшегося в яме разгара лещади чугуна (образования «козла»), и объем его велик, то при повторной задувке печи после ремонта на кожух лещади будут действовать дополнительные нагрузки значительной величины, связанные с расплавлением и температурным расширением этого чугуна. Эти нагрузки действуют на протяжении всего периода до полного расплавления «козла» и без соответствующей корректировки параметров технологического процесса задувки могут привести к превышению напряжениями в кожухе лещади предела текучести стали, что опасно возможным возникновением нештатных ситуаций, вплоть до разрушения кожуха и прорыва жидкого чугуна.

Соответствующее ведение технологического процесса, применение управляющих мер, направленных на снижение технологических параметров, и, тем самым, на исключение воздействий «пиковых» нагрузок на кожух, позволяет в такой ситуации обеспечить его надежность и долговечность, в том числе, и при будущей длительной эксплуатации. В частности, продолжитель-

ность второго этапа задувочного периода, которая определяется контролируемым уровнем напряженно-деформированного состояния кожуха и динамики его изменения, может оказать существенное влияние на скорость его стабилизации.

Что касается кожухов воздухонагревателей, то здесь условия разогрева и ввода в эксплуатацию агрегатов во многом определяют их общую надежность и долговечность эксплуатации.

В частности, способ разогрева воздухонагревателя, характеризуемый интенсивностью подъема температуры футеровки, составом носителей тепла, местом ввода их в воздухонагреватель и организацией отвода продуктов сушки, оказывает существенное влияние на длительную прочность огнеупоров и возникновение начальных повреждений футеровки. Эти повреждения при эксплуатации прогрессируют и приводят к сокращению сроков межремонтных периодов и снижению долговечности агрегата.

При термическом расширении футеровки в период разогрева, когда материалы, заполняющие кольцевые зазоры, еще не выгорели и препятствуют этому расширению, появляются чрезмерные нагрузки на кожух и высокая степень сжатия кладки, что может привести к ее растрескиванию, последующему разрушению и связанному с этим проникновению горячего воздуха к кожуху.

В связи с этим, в случае наблюдаемого нарастания напряжений в кожухе следует обеспечить возможность температурного расширения кладки путем создания условий для ускоренного выгорания прокладок [24].

Для этого целесообразно прекратить дальнейший подъем температуры и поставить аппарат на поддув. С этой целью при разогреве воздухонагревателя, футерованного в высокотемпературной зоне динасовыми огнеупорами, в графике разогрева, рассчитанном на 25 суток, после подъема температуры футеровки купола до 800 °С целесообразно предусмотреть выдержку при этой температуре не менее 48 часов с постановкой аппарата на поддув.

Эти операции приводят к быстрому выгоранию прокладок и изменяют уровень напряженного состояния кожуха, существенно отличающийся от расчетного в меньшую сторону.

Остальная часть теплового расширения футеровки компенсируется деформацией кожуха и обжатием огнеупорных слоев футеровки.

Корректировка хода разогрева воздухонагревателя с целью снижения уровня первоначальных напряжений в кожухе и футеровке и, тем самым, исключения начальных повреждений позволяет обеспечить более высокую стойкость конструкций в процессе эксплуатации.

Хорошо зарекомендовал себя известный способ разогрева воздухонагревателя с ускоренным графиком, рассчитанным на 16 суток (а. с. 834139, С21, В 9/00, 1981), увязанный с проблемой длительной прочности кожуха и увеличением эффективности нагрева дутья.

Способ состоит в том, что при достижении температуры купола 860–880 °С воздухонагреватель в три этапа наполняют дутьевым воздухом с давлением 0,04–0,4 МПа.

На первом этапе наполнения воздухонагревателя дутьевой воздух подают с давлением 0,04–0,06 МПа с регламентированной выдержкой 4–8 минут, на втором этапе, соответственно, с давлением 0,12–0,16 МПа с выдержкой 9–12 минут, а на третьем – заполняют до рабочего давления с регламентированной выдержкой 19–22 минут. Наполнение воздухонагревателя дутьевым воздухом осуществляют при росте температуры под куполом через каждые 40–60 °С.

Пределы давления дутья, подаваемого в три этапа, устанавливаются экспериментально по уровню напряжений в кожухе и по величине подъема днища при постоянном выполнении измерений. Эти же данные являются определяющими при установлении длительности каждого цикла наполнения, который в наибольшей мере способствует благоприятным условиям прилегания кладки к кожуху.

Наполнение воздухонагревателя дутьевым воздухом производится поэтапно, через каждые 40–60 °С, в связи с тем, что этот интервал может обеспечить необходимую скорость роста температуры в футеровке на границе «динас-каолин» и ее стабилизацию, которая контролируется с помощью термопар. Если верхний предел поднять выше 60 °С, то после окончания разогрева нижние

слои футеровки будут продолжать расширяться, и может произойти отрыв днища или разрушение кожуха.

Понижение нижнего предела нецелесообразно, так как возможен выход из зоны чувствительного регулирования и контроля всех основных опасных участков кожуха воздухонагревателя.

При температуре под куполом ниже 800 °С уровень напряженно-деформированного состояния кожуха не превышает, как правило, допустимых значений, а выше 880 °С растягивающие нагрузки в силу заклинивания кладки о кожух и относительно сдвига кирпичей могут превышать эти значения.

Реализация способа разогрева воздухонагревателя в три этапа объясняется тем, что, начиная с температуры под куполом 860–880 °С при поддуве через 40–60 °С опасный температурный участок практически заканчивается с точки зрения критических величин напряжений кожуха и состояния днища.

При температуре под куполом 1000–1100 °С после осуществления трех этапов поддува дутьевым воздухом дальнейший рост уровня напряжений в кожухе практически не наблюдается, а даже, наоборот, отмечается его снижение.

Аналогичная картина заметна и в поведении днища, уменьшение деформации которого позволяет повысить параметры дутьевого воздуха в процессе эксплуатации.

Приведенная взаимосвязь условий ввода воздухонагревателей в эксплуатацию с их общей надежностью свидетельствует о целесообразности и возможности управления взаимодействием кладки и кожуха, что позволяет предотвратить разрушения футеровки и кожуха, увеличить рабочие параметры дутья, сократить время пуска агрегата и обеспечить его дальнейшую надежную эксплуатацию.

§ 5.2. Взаимосвязь напряженно-деформированного состояния кожухов с параметрами влияния

Как уже отмечалось, надежность работы кожухов доменных печей и воздухонагревателей связана не только с нагрузками и воздействиями, но и, в значительной степени, с эксплуатационными параметрами технологического процесса, влияющими, как по

их совокупности, так и раздельно, на напряженно-деформированное состояние кожухов. К ним следует отнести:

- параметры влияния технологического процесса;
- параметры влияния конструктивной формы;
- параметры влияния технического состояния.

Прочность и долговечность кожухов в большой мере зависит также от физико-механических характеристик материалов системы «кожух-холодильники-футеровка» и температурного режима работы.

Все это определяет уровень напряженно-деформированного состояния кожухов, распределение напряжений в сечениях и во времени. В ряде случаев, при определенном сочетании различных параметров влияния, напряжения могут достигать запредельных значений, при которых возникают трещины и разрывы кожуха.

§ 5.2.1. Параметры влияния технологического процесса

Доменные печи

Технологические процессы, протекающие в доменной печи, происходят при высоких температурах, которые оказывают значительное влияние на прочность и долговечность системы «кожух-холодильники-компенсационный слой-футеровка». Они создают не только изменяемые во времени термические воздействия, но и приводят к связанным с ними 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 пр.

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

Изменение температуры как материалов, так и газов по высоте печи, вызываемое теплопередачей от двигающихся вверх газов к опускающимся вниз материалам, происходит неравномерно, что, соответственно, приводит к неравномерному полю нагрузок на футеровку и кожух. В нижней части печи при

температуре выше 1400–1500 °С теплообмен между газами и материалами происходит наиболее интенсивно. В этой зоне тепло расходуется не только на нагрев материалов, но и на процессы, идущие 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 до 500 °С, что, в свою очередь, вызывает изменение напряженного состояния.

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

Велико влияние технологических параметров в зоне лещади доменной печи. Здесь в начале кампании печи происходит вымывание футеровки лещади, образование полости, заполняющейся жидким чугуном, который вызывает дополнительное давление на кожух.

При разгаре кладки лещади и образовании ямы, заполненной жидким чугуном, потери тепла через холодильники возрастают, увеличивая тепловые воздействия на кладку и, тем самым, увеличивая ее износ.

Отсюда очевидно, что характерной особенностью кожуха доменной печи является его работа при специфических нагрузках и воздействиях, вызванных особенностями технологического процесса, значительно усложняющими и ухудшающими условия эксплуатации.

К основным, наиболее важным технологическим воздействиям и состояниям, отличающим работу кожуха от работы строительных конструкций и влияющим на его прочность и надежность, следует отнести термические воздействия, связанные с технологическим процессом, а также с возможным нарушением работы холодильников печи и других систем охлаждения, вызывающих перегрев кожуха и связанное с этим снижение прочностных характеристик стали, неравномерные деформации конструкций и изменение физико-механических характеристик материалов.

Температура по сечению печи и ее равномерность определяются качеством шихтовых материалов и их распределением на колошнике.

При нормальной работе печи максимальная температура возникает у оси печи, а у стен печи она несколько ниже и изменение температуры описывается плавной кривой. При нарушениях в распределении материалов и газов изменяется и характер распределения температур по сечению печи. При периферийном ходе газов температура кладки еще более увеличивается.

Такая взаимосвязь между параметрами технологического процесса и температурными полями внутри печи затрудняет формализацию их учета при оценке прочности и надежности конструкций, которая, в свою очередь, зависит от многих неформализованных воздействий, в том числе:

– давления газовой среды и возможности резкого его повышения при нарушениях режимов технологических процессов;

– механического воздействия футеровки при ее термическом расширении, с учетом постепенного разрушения и, тем самым, неформализованного изменения давления на кожух;

– активной коррозии кожуха под воздействием постоянно действующей агрессивной газовой среды, колошниковой пыли и воды;

– абразивного износа футеровки под воздействием сыпучих материалов и взвешенных в газовом потоке частиц колошниковой пыли;

– нестабильности технологических процессов, связанной с изменением состава шихты, состоянием конструкций, выплавкой чугуна разных марок и т. п., приводящих к резкому увеличению нагрузок, возможности возникновения аварийных ситуаций при перегревах кожуха доменной печи, прорывам чугуна через кожух доменной печи, выходу из строя приборов автоматического управления и контроля работы оборудования и пр.:

– динамических воздействий при осадке шихты в доменной печи, от грузоподъемных средств, вследствие динамических ударов оборудования и пр.;

– неформализованного поведения системы «кожух-холодильники-футеровка» в процессе эксплуатации (например, температурный рост чугунных холодильников доменной печи при их недостаточном охлаждении, разрушение кладки лещади доменной печи и скопление 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.);

– трудности в обеспечении непрерывности технологического процесса, необходимости бесперебойной эксплуатации всех технологических агрегатов и сведения к минимуму остановок, связанных с ремонтами и заменой оборудования.

Воздухонагреватели

Нагрузки и воздействия на кожух воздухонагревателя более стабильны и формализованы, однако, вызываемое ими напряженное состояние цилиндрической части кожуха также неоднородно по периметру кольцевого сечения и по высоте.

Кожух воздухонагревателя, как и кожух доменной печи, работает в условиях двухосного (и на отдельных участках в районах концентраторов напряжений трехосного) напряженного состояния под воздействием внутреннего давления газовой среды и термического расширения футеровки. Наиболее напряженная часть кожуха расположена в районе верхней, высокотемпературной зоны, где футеровка подвергается интенсивному термическому воздействию.

Внутреннее давление газовой среды действует циклически, что технологически связано с работой воздухонагревателя в режимах «нагрев», «дутье».

Кроме того, такая ситуация, с точки зрения воздействия на кожух, вызывает знакопеременные усилия в нем, которые могут привести к развитию малоцикловой усталости материала, снижающей длительную прочность кожуха.

При эксплуатации воздухонагревателя возможно также пульсирующее воздействие горения газа в горелках с критическим значением режима, после которого может произойти обрушение футеровки камеры горения. По этой или иной причине целостность футеровки может нарушаться, кожух в этих случаях 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.

В сложных условиях находится и днище воздухонагревателя. При неоптимальной компоновке футеровки и определенном соотношении жесткостей нижней части кожуха и днища узел их сопряжения во время эксплуатации испытывает дополнительные циклические воздействия, связанные со сменой режимов работы воздухонагревателя в циклах «нагрев», «дутье».

К технологическим параметрам, влияющим на напряженно-деформированное состояние кожухов воздухонагревателей, можно отнести также 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.

К другим, достаточно важным технологическим воздействиям и состояниям, влияющим на прочность и надежность кожуха воздухонагревателя, следует также отнести:

– давление газовой среды и возможность резкого его повышения при нарушениях технологических процессов;

– воздействие футеровки при ее термическом расширении, с учетом ее постепенного разрушения и, тем самым, неформализованного изменения давления на кожух и возможного его перегрева.

Распределение температуры внутри воздухонагревателя находится в зависимости от того, в каком режиме работает агрегат – на «дутье» или на «нагреве».

Так, при работе в дутьевом режиме температура купола достигает 1300–1450 °С, а отходящих газов в поднасадочном устройстве – 400 °С. В конце этого режима температура воздуха под куполом снижается на 200–300°С, а отходящих газов – на 100 °С.

§ 5.2.2. Параметры влияния конструктивной формы

Доменные печи

Конструктивные решения кожуха доменной печи существенно влияют на его стойкость и прочность, что определяет длительность кампании печи.

Одним из основных отличий в конструктивной форме кожуха печи, оказывающим влияние на его прочность и долговечность, является наличие или отсутствие опорной системы. В последнем случае кожух работает как самонесущая конструкция, самостоятельно воспринимающая весь комплекс внешних нагрузок. В таком кожухе напряженное состояние не искажается наличием мораторного кольца, но кожух перегружен сопутствующими конструкциями.

Мораторное кольцо является одним из критериев в обеспечении прочности кожуха доменной печи, и для кожухов печей с мораторным кольцом его прочность является определяющей в общей проблеме прочности кожуха.

Различные конструктивные формы футеровки, кожухов и систем охлаждения также отличаются между собой и создают различный уровень напряженно-деформированного состояния.

В зависимости от конструктивной формы известны четыре типа кладки горна и пять типов кладки шахты [35]. По прочности и срокам эксплуатации они не совпадают и создают различные условия для работы.

Конструктивная неоднородная форма кожуха доменной печи в виде сопряженных соосных цилиндрических и конических оболочек различной толщины, ослабленных большим числом отверстий различного размера и конфигурации, предназначенных для ведения процесса и крепления оборудования, приводит к появлению локальных возмущающих усилий краевого эффекта, повышающих общий уровень напряженно-деформированного состояния. При этом значительную роль в обеспечении прочности кожуха доменной печи играют характер проемов и отверстий в кожухе. Их форма и способ образования в ряде случаев могут существенно влиять на длительную прочность кожуха печи.

Значительное влияние на величину давления, передаваемого футеровкой на кожух, оказывают также способ компенсации вертикального роста кладки на колошнике, компенсация радиального роста кладки шахты и конструкция ее охлаждения, компенсация роста лещади и стенок горна, конструкция охлаждающих устройств. Все эти конструктивные решения и применяемые материалы во многом определяют напряженно-деформированное состояние кожуха.

Воздухонагреватели

Кожух воздухонагревателя состоит также из сопряженных между собой соосных цилиндрических и конических оболочек различной толщины, ослабленных несколькими отверстиями большого диаметра, предназначенных для присоединения газо- и воздухопроводов, что приводит к появлению локальных возмущающих усилий краевого эффекта, повышающих общий уровень напряженно-деформированного состояния.

На прочность кожуха воздухонагревателя существенно влияют конструктивные формы узлов сопряжения оболочек разных диаметров – высоко- и низкотемпературной зоны, а также узел опирания кожуха на фундамент. Эти узлы характерны появлением значительных усилий краевого эффекта и подверженностью влияния циклической составляющей при эксплуатации агрегата.

Особо следует отметить воздействие на кожух воздухонагревателей воздухопроводов горячего дутья. Высокая температура их металлоконструкций, доходящая до 100 °С и более, стесненность температурных деформаций вызывает в этом узле комплекс усилий разного характера, во многом влияющих на его прочность. Весьма жесткая компоновка системы, зачастую при отсутствии компенсаторов, приводит к значительным воздействиям в месте примыкания штуцеров к кожуху воздухонагревателя, где появляются перегревы, повреждения футеровки, трещины.

По этим же причинам также искажается картина напряженного состояния и в местах примыкания воздухопроводов холодного дутья, дымовых штуцеров, газопроводов и газовых горелок. Кроме того, концентрация напряжений, обусловленная наличием больших

вырезов и усилия, вызванные термическим расширением трубопроводов, в значительной степени повышают уровень местных напряжений.

§ 5.2.3. Параметры влияния технического состояния

История эксплуатации, в том числе, история нагружения и техническое состояние являются значимыми параметрами, влияющими на прочность и долговечность кожухов агрегатов.

За время работы кожухи испытывают большой комплекс сложных нагрузок и воздействий, которые могут привести к ряду необратимых изменений в конструкциях и физико-механических свойствах материалов футеровки. Они также могут быть причиной повреждений кожухов, последующий ремонт которых в определенной степени снижает их общую длительную прочность. Уже отмечалось, что около 70% трещин инициируются ремонтными сварными швами.

Одним из основных факторов, оказывающим существенное влияние на прочностные характеристики, является термическое воздействие, его продолжительность и цикличность.

Как уже отмечалось, появление тепловой ползучести возможно при достаточно длительном воздействии температуры. 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.

Ползучесть появляется при температуре, характерной для данной марки стали: для малоуглеродистой – при 250–300 °С, для стали повышенной прочности – при 350–400 °С, для нержавеющей стали типа Х18Н9Т – при 500–600 °С.

Воздействие высоких температур на сталь вызывает изменение ее структуры и приводит к повышению предела хладноломкости, вызывая так называемую тепловую хрупкость металла [3].

Нарастание деформаций может ограничить работу конструкций. Такие случаи встречаются при перегревах кожухов доменных печей, после чего часть кожуха, теряя устойчивость, превращается местами в гофрированную оболочку, что приводит к

его осадкам, наклону и, соответственно, сбоям в работе загрузочного оборудования.

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

При выходе из строя близлежащих холодильников доменной печи, вследствие перегрева, через 0,5–2,5 месяца на кожухе возникают дефекты – выпучины, а часто появляются и трещины.

Переменное или внезапное воздействие температуры на конструкцию, как отмечалось, приводит к возникновению напряжений тепловой усталости, а при внезапных однократных изменениях с высоким градиентом – к напряжениям 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 малоцикловой усталости.

Усталостные разрушения происходят по-разному в конструкциях, нагруженных только термическими напряжениями, и в конструкциях, подвергаемых, кроме термического, механическому нагружению. Следует отметить весьма важный вывод о том, что чем выше прочностные характеристики материала, тем меньшее влияние на число циклов изменения температур, приводящих к появлению трещин, оказывает механическая нагрузка.

Исследования [29] показали, что так же 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 постоянстве условий 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 резуль-

тат 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 35–56 МПа, поскольку при этих напряжениях величины высвобождающейся потенциальной энергии недостаточно для распространения трещины.

Известны случаи появления трещин в местах локальных перегревов кожухов доменных печей, особенно при циклическом их воздействии с последующим охлаждением наружным поливом водой. Отмечено также значительное влияние термических напряжений, вызванных перепадом температур по толщине металла [35].

Таким же образом с изменением свойств металла кожуха за время его эксплуатации могут существенно меняться и другие характеристики. Так, наличие ремонтных вставок в кожухе, трещин, заваренных с одной стороны, накладок на неиспользуемых отверстиях и проемах вносит значительную корректировку в напряженное состояние кожуха.

Отдельно следует отметить изменение за время эксплуатации состояния конструкций и физико-механических свойств огнеупорных материалов футеровки.

Как известно, существуют два состояния футеровки кожуха доменной печи: первое – вся футеровка цела, и второе – вся футеровка или какая-то ее часть выгорела, и кожух в этом районе защищается только холодильными плитами и образовавшимся гарнисажем. Второе состояние связано с технологическим процессом и появляется после некоторого времени эксплуатации, продолжительность которого весьма неопределенна и зависит от многих факторов. Тепловая защита кожуха футеровкой в двух ее состояниях, естественно, различна, как и ее механическое воздействие на кожух.

Для кожухов воздухонагревателей следует отметить зависимость физико-механических свойств огнеупоров от остановок

агрегатов с остыванием футеровки и последующими повторными разогревами, а также от режима разогрева. Эти процессы существенно изменяют свойства огнеупоров, особенно динасовых, снижая деформационные возможности компенсационных зазоров и, зачастую, практически полностью исключая повторную работу зазоров с выгорающими прокладками.

Приведенные параметры подтверждают зависимость длительной прочности кожухов от истории их нагружения и эксплуатации, а также ее существенное влияние на напряженно-деформированное состояние кожухов.

§ 5.3. Анализ материалов экспериментальных исследований кожухов доменных печей и воздухонагревателей

§ 5.3.1. Кожухи доменных печей

Материалы экспериментальных исследований, натурных обследований и изучения статистических данных по эксплуатации доменных печей показали, что во время работы в кожухе возникают трещины, которые определяются конструктивными решениями и технологическим процессом.

При эксплуатации доменных печей происходит разгар и пластические деформации кладки, которые изменяют условия работы кожуха печи, стягивающего кладку – давление на кожух становится неравномерным. На общем фоне снижения уровня давления кладки возникают локальные участки с повышенным давлением, перегревом кожуха и, соответственно, с повышенными напряжениями.

Наблюдениями и экспериментальными исследованиями установлено, что в кожухе лещади, заплечиков, распара и шахты возникают, в основном, растягивающие напряжения не только на высоте, но и по кольцу сечения кожуха. Эти напряжения возникают в результате воздействия на кожух как нормальных усилий, так и изгибающих моментов, что свидетельствует о неравномерном давлении кладки и холодильников на кожух, а также о наличии температурных воздействий. В некоторых местах напряжения,

возникающие от изгибающих моментов, превышают напряжения вследствие нормальных усилий. Краевые напряжения по величине достигали предела текучести стали и выше.

В верхней и центральной частях кожуха шахты трещины, как правило, имеют вертикальное направление, а в нижней части, примыкающей к мораторному кольцу, определяющими становятся изгибные составляющие напряжений (обусловленные краевым эффектом), и трещины имеют горизонтальное направление.

Кольцевые напряжения в кожухе лещади и стенок горна меняются до выпуска чугуна и после этого.

Кольцевые напряжения в кожухе шахты и горна, как правило, достигнув максимальной величины на 15–20-е сутки, к концу месячного периода после задувки значительно снижаются. Это свидетельствует о том, что кладка стенок горна перерождается и теряет свои упругие свойства.

В кожухе лещади, наоборот, напряжения имеют тенденцию к росту. Здесь после задувки печи, при нагревании кладки в результате радиального отпора кожуха возникают радиальные напряжения, достигающие 3–4 МПа.

При дальнейшем нагреве центральной части лещади до 1200–1400 °С и выше происходит резкое падение модуля упругой пластичности кладки и усадка отдельных кирпичей, а также значительное снижение напряжений в кладке, в некоторых случаях достигающих нуля. В результате исчезают силы трения между отдельными кирпичами. Под влиянием гидростатического давления чугун проникает в вертикальные зазоры между кирпичами, а затем и в зазоры между горизонтальными рядами. Под влиянием сил, равных разности удельных весов чугуна и кладки, с учетом сил трения происходит всплывание отдельных кирпичей, а затем и целых рядов.

При проведении контроля напряженного состояния кожухов доменных печей определение деформаций проводилось в местах, удаленных от зон их ослаблений и районов сопряжений оболочек, чтобы избежать влияния краевых эффектов. Как известно, эти эффекты приводят не только к серьезному увеличению действующих напряжений, но и являются конструктивными источниками появления трещин и других повреждений. К подобным факторам

относятся местные ослабления кожуха отверстиями для холодильников, фурменных приборов, леток, переломы, депланации листов в стыках кожуха, вогнутости, выпуклости, непровары в сварных швах и т. п.

§ 5.3.2. Кожухи воздухонагревателей

Экспериментальные исследования действительной работы воздухонагревателей показали, что их конструктивная форма, включающая футеровку с минераловатными и асбовермикулитовыми матами в компенсационных зазорах и динасовой кладкой высокотемпературной зоны кожуха, выполненного из стали повышенной прочности, обладает более надежными свойствами, чем конструктивная форма использовавшихся ранее воздухонагревателей с заполнением компенсационных зазоров смесью шлака с асбеститом.

Сопоставление экспериментальных данных, полученных на натуре, с данными расчета показывают во многих случаях завышенные значения расчетных напряжений в кожухе и футеровке. Есть основание полагать, что это является следствием неучета пластических деформаций футеровки, усадки материалов швов между кирпичами, влияния на поведение кожуха торкретслоя и других необратимых явлений в кладке и компенсационном зазоре. Это подтверждается ростом меридиональных напряжений в начальный период разогрева.

С применением минераловатных матов и использованием выгорающих прокладок в радиальных швах динасового слоя футеровки существенно изменился характер напряженно-деформированного состояния кожуха и футеровки, что подтверждается отсутствием высоких кольцевых напряжений в подкупольной зоне в период разогрева.

При разогреве воздухонагревателя, как правило, наблюдаются два характерных периода.

Первый период отличается ростом напряжений, создаваемых взаимодействием кожуха и футеровки в процессе ее термического роста. Этот период заканчивается при температуре купола 1000–1200 °С и постановке воздухонагревателя на поддув.

В этот же период практически по всей высоте воздухонагревателя наблюдается рост меридиональных напряжений.

Наибольший рост напряжений отмечается на поддуве в средней части аппарата в районе сопряжения кладки из динаса и муллитокорундовых зон футеровки, где преобладают кольцевые напряжения. Здесь перепад напряжений достигает 55 МПа за двое суток. В зонах шамотных огнеупоров напряжения имеют меньшую величину.

Второй период – период дальнейшего подъема температуры купола до 1300 °С и периодического наполнения воздухонагревателя воздухом отличается незначительным увеличением напряжений во всех наблюдаемых участках кожуха и последующей стабилизацией с некоторым снижением напряжений в процессе промышленной эксплуатации воздухонагревателя.

В дальнейшем, во время циклической работы воздухонагревателя на нагреве и на дутье, несмотря на подъем температуры купола, напряжения несколько снижаются. В последующем, при эксплуатации воздухонагревателя уровень напряжений, как правило, не повышается, что может говорить о стабилизации работы агрегата.

Распределение напряжений по высоте воздухонагревателя свидетельствует о том, что конструкция футеровки создает защемление, препятствующее свободному росту огнеупорной кладки, и создает значительную нагрузку в зоне конического перехода кожуха высокотемпературного воздухонагревателя.

По периметру кольцевого сечения воздухонагревателя напряжения распределены неравномерно. Замечено, что температура отдельных мест кольцевого сечения кожуха может в значительной степени меняться в зависимости от солнечной радиации и скорости ветрового потока при их прямом воздействии.

Есть основания предполагать, что на уровень напряжений оказывают существенное влияние силы трения, действующие между соседними рядами кирпичной динасовой кладки во время относительного сдвига при заполнении щелей.

Глава 6 ПОРОГОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОЖУХОВ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

§ 6.1. Основные положения по определению пороговых значений

Формализация столь большого количества отмеченных выше разнообразных критериев обеспечения промышленной безопасности кожухов доменных печей и воздухонагревателей весьма затруднена и, практически, не может быть в полной мере реализована при оценке их технического состояния.

Показателем этого могут служить обобщенные пороговые критерии, позволяющие в сравнении с их значениями оценить общий уровень промышленной безопасности кожуха.

В связи с этим, при проведении контроля напряженно-деформированного состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей для оценки их прочности и ее запасов необходимо установить критериальные значения его компонентов, обеспечивающих промышленную безопасность кожухов.

Прочность кожухов доменных печей и воздухонагревателей связана со всеми составляющими напряженно-деформированного состояния и определяется элементами безмоментной теории тонкостенных составных оболочек, с учетом кольцевых и меридиональных напряжений.

Для доменной печи эта связь характеризуется радиальными деформациями холодильников, обжатием швов между холодильниками, радиальными деформациями кожуха и футеровки, зависящими от физико-механических свойств ее материалов, а также от размеров и свойств материалов компенсирующих зазоров.

Для воздухонагревателей эта связь ограничивается радиальными деформациями кожуха и футеровки, зависящими от физико-механических свойств ее материалов, а также от размеров и свойств материалов компенсирующих зазоров.

Количественная оценка уровня напряженно-деформированного состояния кожухов вне зон концентрации напряжений производится по приведенным напряжениям $\sigma_{пр}$, определяемым в

соответствии с энергетической теорией прочности, как

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\sigma_к^2 - \sigma_к\sigma_м + \sigma_м^2},$$

где $\sigma_к$ и $\sigma_м$ – фактические кольцевые и меридиональные напряжения, вычисленные с учетом двухосного напряженного состояния по измеренным деформациям ε, соответственно, в кольцевом и меридиональном направлениях.

Принимая во внимание, что упругая работа материала кожуха описывается обобщенным законом Гука, эти напряжения при двухосном напряженном состоянии определятся, как

$$\sigma_к = \frac{E}{1-\mu}\left(\varepsilon_к^и + \mu\varepsilon_м^и\right);$$

$$\sigma_м = \frac{E}{1-\mu}\left(\varepsilon_м^и + \mu\varepsilon_к^и\right),$$

где $E = 2{,}1\cdot10^5$ МПа – модуль упругости стали;

$\mu = 0{,}3$ – коэффициент Пуассона;

$\varepsilon_к^и$ – текущие значения деформаций, измеренные в кольцевом направлении;

$\varepsilon_м^и$ – то же, измеренные в меридиональном направлении.

Если при определенных соотношениях напряжений $\sigma_к$ и $\sigma_м$ приведенные напряжения $\sigma_{пр}$ оказываются ниже кольцевых $\sigma_к$, то в определенный запас прочности, для оценки напряженного состояния в качестве критерия могут приниматься максимальные кольцевые напряжения.

Оценка уровня промышленной безопасности кожухов производится индивидуально для каждого периода их эксплуатации, сопоставлением полученных экспериментальным путем значений компонентов напряженно-деформированного состояния с их расчетными максимальными значениями, называемыми *пороговыми* и являющимися определяющими при оценке прочности кожуха на данном этапе его эксплуатации.

За основу определения этих компонентов принимаются обобщенные критерии безопасности для любого этапа эксплуатации кожухов, к которым, прежде всего, относятся:

– напряжения в кожухе;

– радиальные деформации контура поперечного сечения кожуха;

– температура поверхности кожуха.

Промышленную безопасность кожухов агрегатов, вводимых в эксплуатацию после строительства или после капитального ремонта I разряда, можно характеризовать тремя уровнями ее состояния, которые дают оценку прочности кожуха и косвенную характеристику параметров технологического процесса.

Первый уровень – ни один из обобщенных критериев не превышает пороговых значений, и они соответствуют их расчетным величинам при нормальной эксплуатации сооружения.

Второй уровень – превышение одним из обобщенных критериев порогового значения критерия первого уровня.

Третий уровень – достижение одним из обобщенных критериев максимального значения порогового критерия, соответствующего пределу упругой работы материала.

Для кожухов агрегатов, вводимых в эксплуатацию после капитального ремонта II разряда, учитывая неформализованность нагрузок и воздействий, их кратковременность, а также достаточно высокую вероятность возникновения нештатных ситуаций, весьма обоснованно на период задувки, до выхода на стабильный режим ограничить условия промышленной безопасности только первым уровнем.

Значения пороговых критериев безопасности кожухов агрегатов не являются унифицированными и могут различаться в зависимости от многих факторов, к которым относятся физико-механические характеристики материалов футеровки и кожуха, этап работы, состояние конструкций, история их нагружения и эксплуатации и т. п.

Кроме того, эти величины существенно отличаются для кожуха эксплуатируемого, стабильно работающего агрегата и агрегата, вводимого в эксплуатацию после капитального ремонта II разряда. При этом особое внимание следует уделить выбору значений пороговых критериев обеспечения безопасности кожуха доменной печи при вводе ее в эксплуатацию после капитального ремонта II разряда, выполненного без предварительного слива чугуна из ямы разгара лещади. Здесь выбор пороговых значений производится раздельно для каждого этапа задувочного периода.

При задувке такой доменной печи, в связи с прогревом

застывшего в яме разгара лещади чугуна и его термического расширения, как уже отмечалось, в кожухе лещади может наблюдаться активный рост деформаций с достижением их, в ряде случаев, величин, соответствующих, а иногда и превышающих значения напряжений предела упругой работы материала кожуха, что представляет определенную опасность.

Кроме того, весьма важно иметь в виду, что, учитывая активный рост величин обобщенных критериев во время задувочного периода, пороговые значения могут быть достигнуты в короткое время с сохранением тенденции их дальнейшего роста.

В связи с этим, для обеспечения безопасности на этапе активного роста величин обобщенных критериев до их снижения и стабилизации должны выполняться управляющие действия по корректировке параметров технологического процесса, направленные на снижение уровня напряжений.

При этом следует обязательно учитывать, что после принятия мер по управлению технологическим процессом, необходимо определенное время для достижения планируемого результата, так как система весьма инерционна, и эффект от снижения параметров процесса проявляется не сразу ввиду длительности стабилизационного периода. Вероятно, это является одной из причин того, что аварии наступают не внезапно, а после возникновения какой-либо нестандартной ситуации, развивающейся в процессе эксплуатации (см. рис. 4.1).

Учитывая, что вероятностный подход к методам обеспечения промышленной безопасности металлургических агрегатов предполагает превалирующей своевременность принятия управляющих решений, необходима согласованность темпов диагностирования и прогноза с темпами управления технологическим процессом в различных режимах работы агрегата.

Известно [32], что нештатная ситуация возникает как конечный результат последовательного перехода технологического режима работы системы сначала на уровень технологической неустойчивости, а затем в аварийную ситуацию. Процесс этот многостадийный и зависит от величины допустимого риска режима работы. Однако на каждой стадии развития такой ситуации существуют свой уровень допустимого риска и конкретные мероприятия,

позволяющие вернуть систему в предшествующее состояние, предотвратив тем самым дальнейшее развитие аварийной ситуации.

В связи с этим, на нестационарном режиме работы печи во время ее задувки для возможности своевременного принятия решений по снижению компонентов напряженно-деформированного состояния должны быть определены значения его пороговых величин, после достижения которых следует принимать неотложные меры по их снижению. Значения величин таких пороговых критериев условно назовем *управляющими*.

В пользу необходимости ограничения при задувке уровня напряженно-деформированного состояния управляющими значениями величин компонентов пороговых критериев говорит еще и невозможность учета ряда следующих неформализованных факторов этого состояния:

– большая анализируемая поверхность кожуха не позволяет оценить уровень напряжений в каждой ее точке; установка измерительных приборов здесь выполняется дискретно, с интервалами, связанными с габаритами приборов и общей компоновкой оборудования на кожухе;

– напряжения в точках кожуха, расположенных между местами установки приборов, могут отличаться и даже превышать измеренные напряжения, что связано с неравномерным распределением нагрузок и воздействий, а также с концентраторами напряжений;

– возможное наличие дефектов металла и металлоконструкций на участках между точками измерений.

При задувках печей после капитального ремонта II разряда, выполненного без предварительного слива чугуна из ямы разгара лещади, значение величин управляющих критериев $R_{упр}$ рекомендуется назначать путем применения коэффициента инерционности $K_{ин}$, величина которого может быть различна для каждого этапа задувки.

Таким образом, для критерия прочности материала кожуха $R_{упр} = K_{ин}R_{п}$, где $R_{п}$ – пороговое значение компонента напряженно-деформированного состояния по критерию прочности.

§ 6.2. Значение пороговых напряжений по критерию прочности материала кожуха при вводе в эксплуатацию после строительства или после капитального ремонта I разряда

На этом этапе эксплуатации кожуха доменной печи и воздухонагревателя в качестве порогового значения критериев промышленной безопасности принимаются их значения, соответствующие нормативным прочностным характеристикам материала кожуха.

Основой для определения пороговых значений компонентов напряженно-деформированного состояния служит величина предела текучести материала кожуха $R_{уп}$ и соответствующего ему расчетного сопротивления $R_у$.

Эта величина, с учетом коэффициента условий работы γ_c, коэффициента ослабления $K_{осл}$, коэффициента надежности по материалу γ_m и коэффициента, учитывающего двухосное напряженное состояние $K_м$, может быть принята в качестве значения пороговых напряжений $R_п$ – по критерию прочности.

Исходя из этого, общее условие прочности для двухосного напряженного состояния вне зон концентрации напряжений, в соответствии с энергетической теорией прочности, выглядит так:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\sigma_к^2 - \sigma_к\sigma_м + \sigma_м^2} \le R_п,$$

где $R_п = \dfrac{R_{ym}}{\gamma_m}\gamma_c K_м K_{осл}$.

Здесь $R_п$ – значение пороговых напряжений по критерию прочности;

$\sigma_к$ и $\sigma_м$ – соответственно, фактические кольцевые и меридиональные напряжения;

R_{ym} – предел текучести материала кожуха;

γ_m – коэффициент надежности по материалу;

γ_c – коэффициент условий работы конструкции;

$K_{осл}$ – коэффициент ослабления кожуха отверстиями;

$K_м$ – коэффициент повышения расчетного сопротивления при двухосном напряженном состоянии, определяемый как

$$K_м = \frac{1}{\sqrt{1-\eta-\eta^2}}, \text{ где } \eta = \sigma_к/\sigma_м.$$

На рис.6.1 показан график для определения $K_м$.

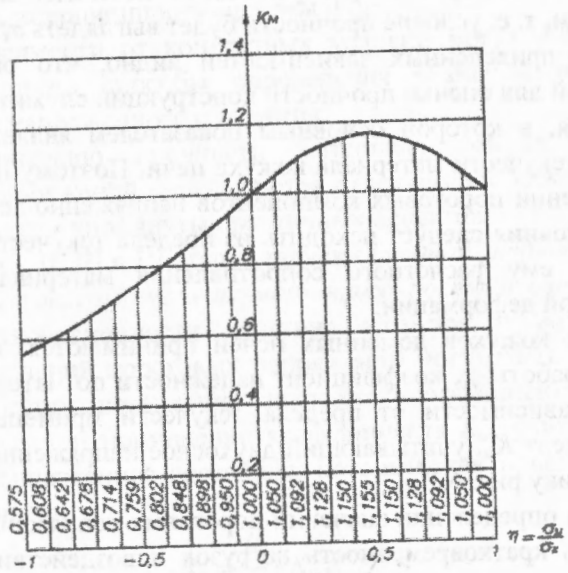


Рис. 6.1. График для определения $K_м$:
$\sigma_к$ и $\sigma_м$ – соответственно, меньшие и большие (по абсолютному значению) кольцевые и меридиональные напряжения

Здесь следует заметить, что, условно принимая равномерное внутреннее давление от всех действующих факторов, и $\sigma_м = 0{,}5\sigma_к$, приведенные напряжения $\sigma_{пр}$ по величине оказываются ниже, чем кольцевые напряжения $\sigma_к$ и в этом случае $\sigma_{пр} = 0{,}86\ \sigma_к$.

С определенными допущениями и, принимая во внимание сложное напряженное состояние кожуха печи, неравномерность по его поверхности, нестационарность технологических процессов и трудности формализации нагрузок, а также преобладающее значение кольцевых напряжений в величине приведенных напряжений, для экспертной оценки уровня напряжений, в некоторый запас прочности, критерием, характеризующим достигнутое напряженное состояние, может быть принята максимальная величина кольцевых напряжений $\sigma_к$, определенная с учетом двухосного напряженного состояния. Эта величина напряжений в таких

случаях может служить критерием для сопоставления с пороговым значением, т. е. условие прочности будет выглядеть $\sigma_к \le R_п$.

Из приведенных зависимостей видно, что определяющей величиной для оценки прочности конструкции служит правая часть уравнения, в которой основным показателем является величина предела текучести материала кожуха печи. Поэтому при определении значений пороговых компонентов напряженно-деформированного состояния следует исходить из предела текучести, соответствующего ему расчетного сопротивления материала кожуха и предельной деформации.

Для кожухов доменных печей принимаются: коэффициент условий работы γ_c, коэффициент надежности по материалу γ_m – по [36], в зависимости от предела текучести примененной стали, коэффициент $K_м$, учитывающий двухосное напряженное состояние – по графику рис. 6.1.

При определении значений пороговых напряжений $R_п$ можно учитывать кратковременность нагрузок и воздействий на этапах задувки, в связи с чем величины этих значений могут быть несколько увеличены.

Коэффициент ослабления $K_{осл}$ может быть определен как

$$K_{осл} = \frac{1}{1-(d/f)^2},$$

где d – диаметр отверстий; f – минимальное расстояние между центрами соседних отверстий.

§ 6.3. Значение пороговых напряжений по критерию прочности материала кожуха в период задувки печи после ее капитального ремонта без выпуска чугуна из ямы разгара лещади

Для определения значений пороговых компонентов напряженно-деформированного состояния при задувке доменной печи после ее капитального ремонта без выпуска чугуна из ямы разгара лещади может быть рекомендован один из возможных подходов, учитывающий различные аспекты – историю нагружения сооружения, его состояние, длительность воздействия неформализованной нагрузки, инерционность системы и пр.

В зависимости от конкретных условий могут быть разработаны и другие способы определения значений пороговых компонентов напряженного состояния.

По критерию прочности материала кожуха значения пороговых напряжений определяются отдельно для каждого этапа задувки, с учетом упомянутых различных аспектов.

Так, на I, II, III и IV этапах задувки (*этапах активного роста напряжений, последующего их медленного роста и снижения*), с учетом кратковременности действия нагрузок и воздействий, величины значений пороговых напряжений могут быть несколько увеличены путем повышения значения коэффициента условий работы до $\gamma_c = 1$ и применения коэффициента $K_м$, учитывающего двухосное напряженное состояние, который, как правило, всегда больше единицы:

$$R_п = \frac{R_{ут}}{\gamma_m} K_м K_{осл}.$$

Для дальнейшего, V этапа задувки (*этап стабилизации напряжений и нормальной работы*) можно рекомендовать при определении значений пороговых напряжений принимать значение коэффициента условий работы по действующим нормативным документам ($\gamma_c = 0{,}85$) и в запас прочности $K_м = 1$, т. е.:

$$R_п = \frac{R_{ут}}{\gamma_m} \gamma_c K_{осл}.$$

С учетом рекомендаций в § 6.1, в случаях задувки печей при наличии неслитого чугуна следует определять также значения управляющих пороговых напряжений $R_{упр}$, при наступлении которых необходимо незамедлительно принимать управляющие меры по корректировке параметров технологического процесса понижением значений пороговых напряжений $R_п$ путем применения коэффициента инерционности $K_{ин}$, величина которого различна для каждого этапа задувки.

По опыту проведения работ по контролю напряженного со-

стояния при задувках таких печей можно рекомендовать следующие значения коэффициента инерционности системы $K_{ин}$:

– период активного роста напряжений (первый и второй этапы задувки) – $K_{ин} = 0,65$;

– период замедленного роста напряжений и последующего их снижения (третий и четвертый этапы задувки) – $K_{ин} = 0,8$;

– период стабилизации напряжений нормальной эксплуатации (пятый этап задувки) – $K_{ин} = 0,9$.

Таким образом, значения управляющих пороговых напряжений $R_{упр}$ для различных этапов задувки печи составят:

– для первого и второго этапов:

$$R_{упр} = 0,65\frac{R_{ут}}{\gamma_m}K_м K_{осл};$$

– для третьего и четвертого этапов:

$$R_{упр} = 0,8\frac{R_{ут}}{\gamma_m}K_м K_{осл};$$

– для пятого этапа :

$$R_{упр} = 0,9\frac{R_{ут}}{\gamma_m}\gamma_c K_{осл}.$$

В зависимости от длительности эксплуатации кожуха печи, длительности остановки печи, технического состояния кожуха и других факторов для коэффициентов $K_{ин}$ при достаточном обосновании могут быть приняты иные значения.

Значения пороговых напряжений для кожухов существующих эксплуатируемых воздухонагревателей при их разогреве после капитального ремонта без замены кожуха рекомендуется назначать:

$$R_п = \frac{R_{ут}}{\gamma_m}\gamma_c K_м,$$

где γ_c принимается по таблице 6.1 в зависимости от технического состояния кожухов [19].

Таблица 6.1

Коэффициенты условий работы γ_c для кожухов существующих эксплуатируемых воздухонагревателей

№ п/п	Описание обнаруженных дефектов	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, достигают высоты 1 м, а также в сварных швах местных вставок и на остальной поверхности кожуха – не более 5 трещин длиной до 500 мм	0,80
3	Количество и протяженность трещин больше, чем в п. 2	0,7
4	При устранении трещин (пп. 2, 3) путем вырезания участков кожуха и вваривания вставок, а также при реконструкции и ремонте футеровки в указанных местах	0,85

§ 6.4. Значения пороговых величин радиальных деформаций

Обобщенной оценкой уровня напряженно-деформированного состояния по этому критерию может служить изменение (увеличение) радиуса поперечного сечения кожуха, связанное с его деформацией и изменением формы. Пороговое значение максимальных радиальных деформаций определяется, исходя из значений пороговых напряжений $R_п$, диаметра кожуха печи D и толщины стенки кожуха t.

При наличии вокруг печи или воздухонагревателя конструкций, на которых можно разместить точки, принятые в качестве неподвижных (для печи, например, колонны опорной системы), возможен контроль геометрических параметров формы контура поперечного сечения кожуха. Эти измерения выполняются с помощью механических компараторов.

В качестве значений пороговых радиальных деформаций $R_{рд}$ в этом случае принимаются величины деформаций, соответствующие напряжениям выбранного уровня порогового значения по критерию прочности кожуха.

Учитывая вышеизложенное, значения пороговых радиальных деформаций $R_{рд}$ определяются расчетом, исходя из этих значений пороговых напряжений, как соответствующие им деформации.

Принимая условно равномерным внутреннее давление от всех действующих факторов, и $\sigma_м = 0{,}5\sigma_к$, получим выражение для определения максимально допустимого значения приращения диаметра кожуха, соответствующего предельным значениям пороговым напряжений $R_п$.

$$\Delta D = 0{,}75 R_п D/E,$$

где $R_п$ – значение пороговых напряжений по критерию прочности; D – диаметр оболочки кожуха; E – модуль упругости материала кожуха.

Исходя из этих значений пороговых напряжений, можно установить величину пороговых радиальных деформаций $R_{рд}$ для каждого уровня безопасности кожуха и для любого этапа работы.

§ 6.5. Значения пороговых величин температуры поверхности кожухов

Основываясь на расчетных предположениях и нормативных требованиях, а также учитывая опыт эксплуатации, в качестве значений пороговой температуры поверхности кожуха доменной печи и воздухонагревателя R_t рекомендуется принимать следующие величины:

- для первого уровня – $R_t \le 80$°С;
- для второго уровня – 120 °С $\le R_t \le 80$ °С;
- для третьего уровня – 150 °С $\le R_t \le 120$ °С.

Глава 7 ОСОБЕННОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОЖУХОВ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

§ 7.1. Основные положения контроля

Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния эксплуатируемых кожухов доменных агрегатов представляет собой сложную задачу, решение которой требует поиска методов измерений деформаций, разработку специальных приборов и аппаратуры для их проведения.

Одной из особенностей контроля состояния таких кожухов является большая площадь контролируемой поверхности каждого агрегата, исчисляемая сотнями квадратных метров, а также невозможность доступа к ее внутренней поверхности.

Необходимость тщательного выбора метода измерений продиктована, кроме того, отсутствием надежной стандартной аппаратуры, что обусловлено рядом специфических требований, предъявляемых к используемым средствам измерительной техники, а именно:

– стабильность показаний приборов в течение длительного времени;

– независимость результатов измерений от изменения температуры окружающей среды и кожуха в интервале от –20 до + 200 °С;

– независимость результатов измерений от вредных воздействий окружающей среды (влажности, загазованности и др.).

Но при этом очевидно, что даже в случае выбора надежных средств измерений контроль динамики деформаций эксплуатируемой конструкции не позволяет установить уровень действующих в ней напряжений. Это связано с тем, что для оценки истинного напряженного состояния эксплуатируемых под нагрузкой конструкций необходимо знание величин начальных («нулевых») напряжений, т. е. напряжений, существующих в конструкции до ее нагружения и момента снятия отсчета.

Измерения, проводимые на эксплуатируемой конструкции

при помощи различного рода приборов, дают лишь информацию о приращении напряжений и деформаций по отношению к некоторому исходному, нулевому ненагруженному состоянию.

В настоящее время отсутствуют эффективные методы неразрушающего контроля, которые позволили бы выявить начальные напряжения в конструкции и получить достоверную оценку существующего напряженно-деформированного состояния кожуха, и потому эта проблема является одной из главных в оценке фактического состояния эксплуатируемых конструкций.

Известен ряд методов, которые предполагают возможность получения оценки действующих напряжений в конструкциях, находящихся под нагрузкой. Все они обладают определенными недостатками и не нашли широкого применения на практике. Большинство из них ограничивается анализом физико-механических свойств и химического состава металла или требует тарирования с применением материала, полностью идентичного по свойствам.

Наиболее достоверные результаты, естественно, дает проведение контроля с момента начала эксплуатации кожуха перед задувкой печи или разогревом воздухонагревателя, когда при отсутствии нагрузки можно зафиксировать «нулевые» показания приборов, соответствующие этому состоянию. Однако чаще всего необходимость оценки напряженно-деформированного состояния кожухов возникает именно во время их эксплуатации.

В связи с актуальностью проблемы по определению значений «нулевых» напряжений в эксплуатируемых конструкциях в институте «Днепрпроектстальконструкция» (г. Днепропетровск, Украина) под руководством инж. С. М. Родова разработан так называемый метод «обезгруживания», позволяющий с достаточной точностью установить параметры «нулевого» состояния конструкции, т. е. зафиксировать показания приборов при отсутствии нагрузки [23].

В основе этого метода лежит представление о том, что напряженно-деформированное состояние конструкции включает в себя напряжения, полученные при изготовлении, в том числе, монтажные и сварочные напряжения, а также напряжения от эксплуатационных нагрузок.

Метод «обезгруживания» состоит в том, что после серии измерений в различных режимах работы аппарата участок кожуха, содержащий точку измерений, вырезается механическим инструментом (например высверловкой), создающим минимальное воздействие на место реза. При этом происходит естественная разгрузка вырезанного участка, в частности, снимаются напряжения, возникающие от действующих эксплуатационных нагрузок. Оставшиеся в образце напряжения имеют самоуравновешенную эпюру и в расчет не принимаются.

Таким образом, показания тензоприборов, получаемые на «обезгруженном» участке, считаются соответствующими отсутствию напряженного состояния и принимаются за начальные («нулевые») значения. Полученные при измерениях на эксплуатируемой конструкции отсчеты являются добавками к этим «нулевым» отсчетам, и их сумма определяет действительное напряженное состояние в контролируемой точке.

При создании обезгруженного участка и измерения деформаций был принят следующий порядок работ:

1. Подготовительные мероприятия, включающие организацию точек измерения.

2. Выполнение измерений при работе агрегата в нормальном режиме.

3. Вырезка участков кожуха и восстановление целостности кожуха.

4. Выполнение измерений на вырезанных участках

Разметка точек измерений и вырезка участков кожуха в выбранном месте производится при помощи кондуктора (рис. 7.1), прикрепляемого к кожуху двумя винтами.

Для организации каждой точки на поверхности кожуха через кондуктор просверливаются восемь отверстий диаметром 2,5 мм, из которых четыре отверстия – на глубину 8–12 мм (в зависимости от толщины кожуха) и остальные, в виде лунок, на глубину – 2–3 мм. Более глубокие отверстия рассверливаются вторично по тем же центрам, до середины толщины кожуха, сверлом диаметром 7 мм.

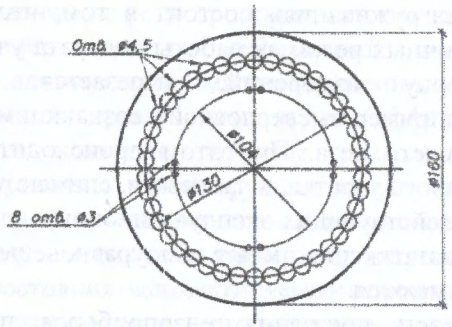


Рис. 7.1. Кондуктор для разметки вырезаемого участка

Вырезанный участок кожуха показан на рис. 7.2.

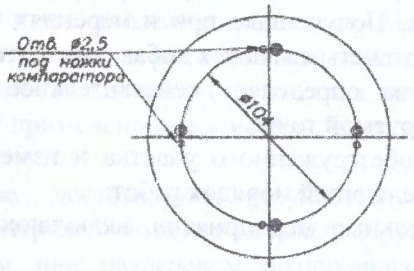


Рис. 7.2. Вырезанный участок кожуха

Измерение осевых деформаций производится на срединной поверхности кожуха при установке ножек компаратора в отверстия, а изгибных – в лунки на наружной поверхности.

На рис. 7.3–7.7 показаны основные этапы выполнения работ.

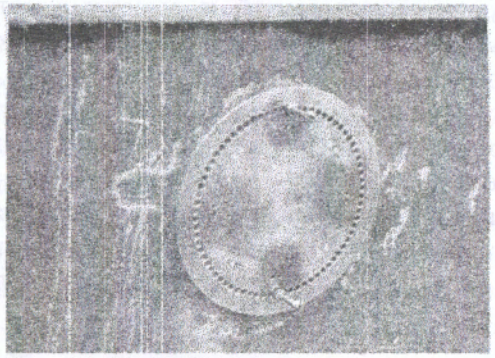


Рис. 7.3. Установка кондуктора на кожухе

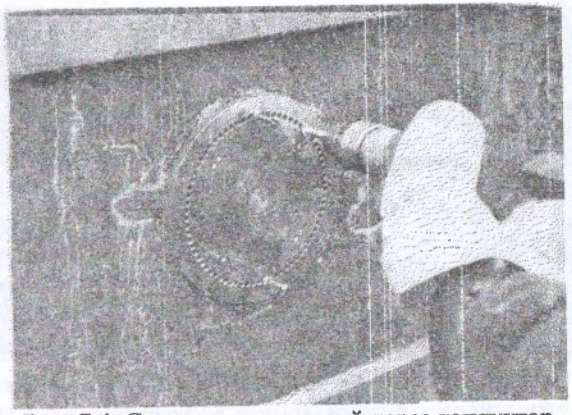


Рис. 7.4. Сверловка отверстий через кондуктор

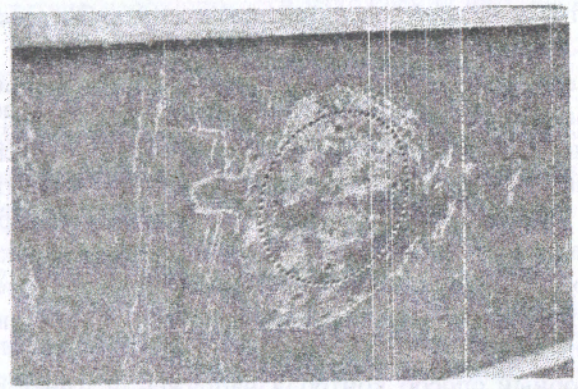


Рис. 7.5. Место вырезки кожуха после снятия кондуктора



Рис. 7.6. Рассверловка отверстий диаметром 8 мм



Рис. 7.7. Измерение деформаций компаратором

Проведение контроля напряженного состояния эксплуатируемых конструкций кожухов на практике может быть осуществлено двумя способами.

Первый состоит в эпизодическом контроле напряжений с использованием различной методики фиксирования деформаций по специально разработанной программе, которой предусматривается систематика проведения измерений и методика снятия отсчетов приборов. Такой способ требует участия операторов, ручное фиксирование результатов измерений и применяется как эпизодический контроль напряжений, в основном, в течение короткого времени при пусковой задувке печи или разогреве воздухонагревателя.

Подобный способ контроля напряжений имеет ряд существенных недостатков, которые во многом ограничивают возможность его использования при эксплуатации. К их числу, в первую очередь, следует отнести необходимость непосредственного визуального снятия отсчетов показаний приборов, расположенных по поверхности кожуха на разной высоте. Это приводит к необходимости верхолазных работ в небезопасных зонах с повышенной загазованностью, постоянному, в течение всего периода выполнения контроля, присутствию операторов и т. п. Эти особенности, в большинстве случаев, делают затруднительным, а зачастую, практически, неосуществимым ведение систематического, регулярного контроля, в том числе, и в нестандартных ситуациях для своевременного и быстрого принятия мер.

Такой способ также неприменим при организации систематического длительного контроля напряженно-деформированного состояния конструкций.

Второй способ предполагает систематический (регулярный) автоматизированный контроль деформаций с фиксированием их в заданном режиме, исключает любое участие операторов и исходит из полной автоматизации процесса.

Прежде всего, к преимуществам такого способа следует отнести возможность постоянного получения информации о напряженно-деформированном состоянии кожуха, обоснованного своевременного принятия соответствующих управляющих решений и независимость результатов отсчетов от «человеческого» фактора. Немаловажным, с точки зрения охраны труда, является также отсутствие необходимости нахождения персонала, осуществляющего контроль, на работающей печи. Имеются и другие предпосылки, например, возможность включения такой системы в качестве подсистемы в АСУТП, которой оснащаются все доменные печи. Реализация такого способа приводит к необходимости создания непрерывно действующей автоматизированной системы, значительно расширяющей организацию контроля.

§ 7.2. Методы и средства контроля

Первая попытка создания автоматизированной системы дистанционного контроля напряженного состояния конструкции, в частности, кожуха печи, была предпринята в 1974 году при строительстве доменной печи № 9 объемом 5000 м^3 металлургического комбината «Криворожсталь» (г. Кривой Рог, Украина). Система была разработана в институте «ЦНИИпроектстальконструкция» (г. Москва, Россия), смонтирована на кожухе до ввода печи в эксплуатацию и функционировала во время ее задувки. Однако уже в первый период эксплуатации печи система вышла из строя. Причиной этого явилось применение при ее проектировании в качестве элементной базы нестабильных во времени тензорезисторных датчиков деформаций, а также способов их защиты, не соответствующих условиям эксплуатации доменной печи [27]. Еще одним недостатком данной системы явилось то, что

напряжения в кожухе измерялись тензорезисторами с базой 20 мм, «собирающих» деформацию кожуха на относительно малой длине периметра кольцевого поперечного сечения кожуха достаточно большого диаметра.

В условиях необходимости контроля напряженного состояния на столь значительной поверхности кожуха, для обеспечения надежных результатов применение малобазных тензометрических устройств неэффективно и трудноосуществимо, так как требует большого количества точек измерений.

В то же время, известные результаты ранее выполненных исследований показали, что наиболее существенной характеристикой напряженного состояния кожуха являются мембранные напряжения в контролируемом сечении, которые можно определять путем измерения их на большой базе длиной 1–2 м.

С использованием этого принципа в институте «Днепрпроектстальконструкция» (г. Днепропетровск, Украина) была разработана аппаратура и приборы, в большей степени соответствующие габаритам конструкций, условиям работы в действующем доменном цехе, и позволяющие в течение длительного периода времени с помощью визуального снятия отсчетов или дистанционно получать необходимую информацию по напряженному состоянию кожуха доменной печи или воздухонагревателя.

Здесь, прежде всего, следует отметить разработанные длиннобазные тензометрические устройства – ДТУ [23]. Они отвечают требованиям эксплуатации в условиях работы доменной печи, позволяют производить измерения на большой базе (порядка 2 м) и за счет своей длины практически исключают составляющую местных изгибных деформаций от геометрических несовершенств кожуха.

Таким образом, установка ДТУ только на наружной поверхности кожуха позволяет с достаточной точностью оценить осевые составляющие напряжений. Эти приборы обладают стабильными показаниями при длительных измерениях и имеют преимущества по сравнению со стандартными механическими компараторами и тензорезисторами.

Комплект ДТУ состоит из двух датчиков: горизонтального – Т1 и вертикального – Т2, устанавливаемых в каждой точке измерения деформаций по направлениям главных напряжений. С помощью датчика Т1 (рис. 7.8), имеющего базу 2 м, производят измерение линейных деформаций в кольцевом направлении. Датчик Т2 (рис. 7.9), с базой измерений 1 м, устанавливают вертикально и измеряют линейные деформации в меридиональном направлении – вдоль образующей поверхности кожуха.

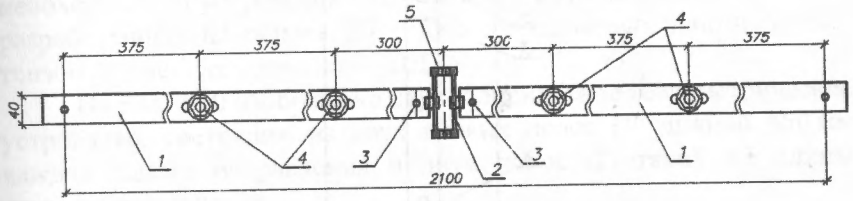


Рис. 7.8. Горизонтальный полосовой датчик ДТУ и вертикальный датчик соответственно:
1 – гибкие стальные полосы; 2 – пружинный хомут; 3 – отверстия для измерений; 4 – прижимное устройство; 5 – рамка хомута

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 обеспечивает компенсацию деформаций кожуха, вызываемых 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 (1), имеющих общую ось. Полосы (1) своими дальними концами прикреплены к кожуху. Места крепления определяют базу измерений, которая равна 2100 мм. Ближние концы полос (1), расположенные около середины базы, стянуты пружинным хомутом (2), состоящим из двух стержней ∅ 4 мм, соединенных по оси датчика болтовым шарниром. Введение шарнира на траверсе повышает деформатив-

ность хомута, обеспечивая этим практическое постоянство натяжения полос в пределах ожидаемых деформаций кожуха агрегата.

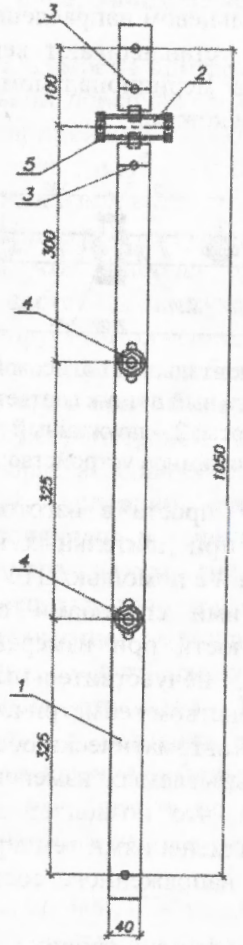


Рис. 7.9. Вертикальный полосовой датчик ДТУ:
1 – гибкие стальные полосы; 2 – пружинный хомут; 3 – отверстия для измерений; 4 – прижимное устройство; 5 – рамка хомута

Прижимные устройства (4) фиксируют положение полосы (1) и обеспечивают ее прижатие к кожуху.

Датчик Т2 имеет такую же конструкцию.

Автоматическая компенсация части деформаций от теплового расширения кожуха достигается изоляцией датчиков от внешних воздействий, например, наклейкой асбестового картона.

Следует заметить, что конструкция приборов из двух раздельных ДТУ не позволяет измерять и кольцевые, и меридиональные деформации в одной точке, а лишь с некоторым смещением. При необходимости устранения этого недостатка возможно применение разработанных на основе ДТУ двухкоординатных длиннобазных тензометрических устройств – ДДТУ.

На рис. 7.10 изображено двухкоординатное тензометрическое устройство, состоящее из двух гибких полос (1) длиной 450 мм каждая одного направления и двух полос (2) такой же длины другого направления.

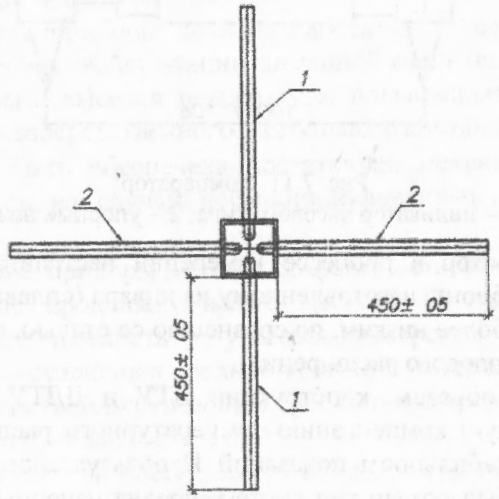


Рис. 7.10. Двухкоординатное длиннобазное устройство:
1, 2 – гибкие стальные полосы вертикального и горизонтального направления соответственно

Полосы (1) и (2) взаимно перпендикулярны и располагаются на объекте таким образом, чтобы их направления совпадали с направлениями главных напряжений (в кожухах агрегатов доменного комплекса – это кольцевые и меридиональные напряжения).

Измерение деформаций может производиться компаратором, оснащенным измерительным устройством, например, индикатором

часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм (рис 7.11). Деформация определяется компаратором аналогично измерениям на ДТУ. Величина деформации отсчитывается по шкале индикатора.

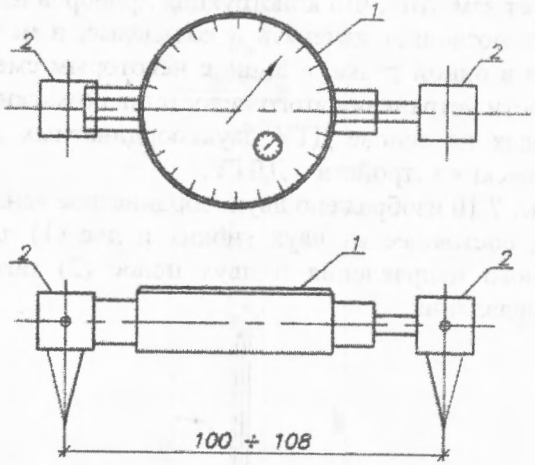


Рис. 7.11. Компаратор:
1 – индикатор часового типа; 2 – упорные ножки

Компаратор в процессе измерений настраивается и проверяется по шаблону, изготовленному из инвара (сплава, обладающего значительно более низким, по сравнению со сталью, коэффициентом линейного теплового расширения).

Таким образом, конструкции ДТУ и ДДТУ обеспечивают автоматическую компенсацию температурного расширения кожуха, а также стабильность показаний. Используя такие длиннобазные устройства, был создан ряд систем, предназначенных для систематического контроля деформаций кожуха доменной печи и воздухонагревателя в автоматическом режиме.

Первая система длительного дистанционного контроля напряженно-деформированного состояния кожухов доменных агрегатов с применением в качестве элементной базы длиннобазных тензометрических устройств была разработана в институте «Днепрпроектстальконструкция» (г. Днепропетровск, Украина) и установлена на кожухе доменной печи № 6 металлургического комбината «Азовсталь» (г. Мариуполь, Украина). Система достаточно успешно работала в течение 100 суток. Однако она не полностью исключала влияние на точность измерений переходных сопротивлений переключающих контактов, обладала недостаточной термостабилизацией измерительной схемы, требовала совершенствования и не нашла дальнейшего применения

В связи с необходимостью и целесообразностью создания надежной автоматизированной системы контроля напряженно-деформированного состояния кожухов доменных агрегатов работы были продолжены и, с учетом имеющегося опыта, были сформулированы основные требования к системе, главные из которых следующие:

– первичные приборы, устанавливаемые на наружной поверхности кожуха, должны позволять фиксирование их «нулевых» показателей при отсутствии нагрузки;

– первичные приборы должны работать длительное время в сложных условиях эксплуатации доменной печи (высокая загазованность среды и высокая температура, повышенная влажность и возможность непосредственного длительного контакта с водой);

– должна быть обеспечена достаточная механическая прочность приборов на случай несанкционированных механических воздействий;

– первичные приборы должны сохранять стабильность показаний в течение продолжительного времени (1 год и более) и обеспечить независимость результатов измерений от изменения температуры окружающей среды и кожуха в интервале 20–150 °С, вредных воздействий окружающей среды (повышенной влажности, температуры, загазованности и др.);

– система должна обеспечивать возможность включения ее в качестве подсистемы в АСУТП, которой оснащаются все доменные печи.

С учетом этих требований и в развитие этого направления Корпорацией «Промстальконструкция» (г. Днепропетровск, Украина) в 2003 году была разработана автоматизированная система контроля напряженно-деформированного состояния кожуха доменной печи, основанная на принципиально иной элементной базе – датчиках-преобразователях деформаций струнного типа, обладающих высокой стабильностью, надежностью в работе и

обеспечивающих дистанционную передачу сигнала с информацией об измеряемых параметрах (автор системы и руководитель работ по ее разработке и установке канд. техн. наук. З. А. Шульман) [27, 41]. Она обеспечила контроль напряженного состояния кожуха во всех режимах и периодах работы – от пусковой задувки 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 пр.

5. Программное обеспечение для управления терминалом, считывания информации, первичной обработки результатов измерения и формирования базы данных.

Датчики устанавливались до начала задувки печи на холодном кожухе с фиксированием начальных («нулевых») отсчетов. Размещались датчики на представительских участках, позволяющих судить об общем уровне напряженно-деформированного состояния кожуха.

Программное обеспечение позволяло 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 осуществлялась на машинном носителе с построением необходимых таблиц, графиков и отображением сигнальных предупреждений о критической ситуации.

На участках, где располагались струнные датчики, были

смонтированы поверхностные термопары для контроля температуры кожуха, а также датчики горизонтальных деформаций кожуха печи, контролирующие изменение величины радиуса кожуха печи.

Технические характеристики измерительных преобразователей обеспечивали измерение и долговременный контроль напряжений в диапазоне –50…+500 МПа при температуре кожуха до 150 °С и перемещений 0…20 мм при температуре окружающей среды до 70 °С.

Сбор и первичная обработка информации, поступающей от датчиков деформаций и перемещений, осуществлялась 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, состояния линий подключений и исправности 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 – 4 сек., режим работы – круглосуточный, непрерывный.

Контроль температуры кожуха печи, температуры отходящей от холодильника воды, внутреннего давления, других технологических параметров работы, влияющих на напряженно-деформированное состояние кожуха, включены в состав АСУТП доменной печи.

Предусмотрена двухуровневая система сбора, обработки, анализа, представления и архивирования информации, поступающей от датчиков, регистрирующих параметры работы кожуха печи.

На первом уровне осуществляется опрос датчиков, преобразование выходных сигналов в измеряемые величины, формирование и отображение в табличной форме базы данных. Операции первого уровня выполняются многоканальным программируемым терминалом.

На втором уровне осуществляются:

– представление данных измерений напряжений и перемещений кожуха, температуры его поверхности и отходящей от холодильников воды, других заданных параметров, характеризующих состояние кожуха печи;

– анализ полученных данных путем сравнения результатов измерений с предельными расчетными или опытными величинами, превышение которых может привести к нештатным ситуациям в работе печи.

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.

Здесь, однако, следует отметить, что приведенные способы контроля напряженно-деформированного состояния кожухов агрегатов доменного комплекса отличаются лишь организацией работ и обладают одним, отмеченным выше, общим недостатком: они фиксируют лишь прибавки к неизвестным напряжениям «нулевого» состояния и потому не позволяют получить оценку реально действующих напряжений в эксплуатируемых кожухах, находящихся под нагрузкой.

В связи с этим, при исследовании кожухов, находящихся в эксплуатации, необходимо одним из известных способов определить напряжения в кожухе при ненагруженном («нулевом») состоянии.

Аналогичные методы и средства контроля применяются и для диагностики напряженно-деформированного состояния кожухов воздухонагревателей.

Глава 8 ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОЖУХА ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ

§ 8.1. Основные принципы дислокации средств измерений

Ранее выполненными исследованиями установлено, что напряженно-деформированное состояние кожухов воздухонагревателей с определенной степенью приближения равномерно в каждом кольцевом сечении и не стабильно по высоте.

Наибольшие напряжения в кожухе воздухонагревателя, как правило, возникают в его следующих районах:

– верх высокотемпературной зоны;

– граница разных огнеупоров в футеровке стен;

– граница изменения толщины футеровки стен.

Именно эти зоны по высоте воздухонагревателя представляют интерес при определении максимальных напряжений в кожухе во время эксплуатации и в них целесообразно устанавливать измерительные приборы. Определенное значение при этом имеет компоновка кольцевых площадок на кожухе, с которых можно проводить работы по монтажу приборов и контролю их показаний.

Что касается кольцевого направления, то, с учетом относительной стабильности в этой зоне напряжений и предположения о такой же стабильности температуры кожуха, вполне обоснованную картину напряженного состояния можно получить при установке в каждом сечении трех-четырех измерительных комплектов.

В каждой точке измерение деформаций кожуха производится в двух направлениях – кольцевом и меридиональном, поскольку при осесимметричном деформировании эти направления являются главными.

При экспериментальном исследовании напряженно-деформированного состояния кожуха воздухонагревателя приборы устанавливаются в наиболее характерных точках на следующих уровнях:

– сопряжение купола с высокотемпературной частью цилиндра из динасовых огнеупоров;

– сопряжение низа динасовой футеровки с верхом каолиновых огнеупоров;
– сопряжение каолиновых и шамотных огнеупоров;
– ось штуцера клапана холодного дутья.

§ 8.2. Анализ напряженно-деформированного состояния кожуха

Напряженное состояние каждой точки кожуха воздухонагревателя можно представить в виде суммы напряжений от осевых сил и местного изгиба. Изгибные напряжения в кожухе, рассматриваемом как тонкая оболочка, являются результатом местных случайных несовершенств цилиндрической формы кожуха или местного нагрева воздухом, прошедшего через повреждения футеровки.

Изгибные напряжения из-за несовершенства формы сравнительно невелики и находятся, как правило, в пределах ± 20 МПа.

Как отмечалось, напряженно-деформированное состояние кожуха воздухонагревателя прежде всего определяется его взаимодействием с термически расширяющейся футеровкой и давлением дутьевого воздуха.

Некоторая наблюдаемая неравномерность распределения напряжений по периметру поперечного сечения воздухонагревателя, по-видимому, связана с рядом причин, к которым относятся: наличие несимметрично расположенной камеры горения, геометрические несовершенства формы кожуха, неоднородность свойств материалов футеровки, изменчивость ветрового потока, различие во внешних тепловых воздействиях, влияющих на температуру кожуха и др.

Есть основания предположить, что на уровень кольцевых и меридиональных напряжений оказывают существенное влияние силы трения, действующие между соседними рядами кирпичей динасовой кладки во время их относительного сдвига при заполнении щелей.

Анализ результатов контрольных измерений показал, что экспериментальные величины напряжений в кожухе и футеровке, предполагаемых в сравнении с данными расчета, во многих случаях оказываются ниже их расчетных значений, что говорит о

существовании факторов, влияющих на достоверность результатов расчетов. Учитывая это, очевидно, что представление о действительном напряженном состоянии кожуха воздухонагревателя, позволяющее принимать необходимые обоснованные решения, можно получить только по результатам его экспериментального контроля.

Интенсификация технологических процессов в 60–70-х годах прошлого века и связанная с ней необходимость полной замены футеровки для соответствующего подъема параметров дутья, поставили под сомнение возможность сохранения и эксплуатации существующих воздухонагревателей, которые имели кожухи с толщиной стенки 14 мм. Проведенный теоретический анализ и необходимые расчеты не давали достаточных оснований для возможности их дальнейшей эксплуатации не только на более высоких параметрах, но и на достигнутых, что в значительной степени сдерживало развитие отрасли. Кроме того, для одновременной замены кожухов и футеровки требовались значительные затраты средств и времени на проведение ремонтных работ.

В связи с этим, для определения истинной картины напряженно-деформированного состояния и выявления возможных резервов несущей способности таких кожухов институтом «Днепрпроектстальконструкция» (г. Днепропетровск, Украина) в течение ряда лет проводились экспериментальные исследования многих воздухонагревателей существующего парка подобных агрегатов на предприятиях СССР.

Результаты контрольных измерений позволили установить фактический уровень напряжений в существующем кожухе при замене футеровки, и на большом количестве воздухонагревателей удалось не только сохранить в эксплуатации тонкостенные кожухи, находящиеся в удовлетворительном техническом состоянии, но и поднять температуру куполов до 1400 °С и давление воздуха до 0,3 МПа.

В качестве примеров, иллюстрирующих эффективность такого подхода, могут служить результаты экспериментального исследования воздухонагревателя № 2 доменной печи № 5 и воздухонагревателя № 2 доменной печи №3 Днепропетровского металлургического завода им. Г.И. Петровского (г. Днепропетровск,

Украина), вводимых в эксплуатацию после капитальных ремонтов, во время которых была полностью заменена футеровка и сохранены существующие кожухи толщиной 14 мм из стали марки ВСт3сп.

Воздухонагреватель № 2 доменной печи № 5.

Достигнутые ранее параметры воздухонагревателя предстояло не только сохранить, но и повысить с целью эксплуатации при температуре купола 1300 °С и давлении дутья 0,23 МПа. Для обеспечения этого условия при проведении ремонта была выбрана оптимальная конструкция футеровки, состоящая из 6 зон (рис. 8.1).

I зона – купол, заторкретированный огнеупорным бетоном толщиной 60 мм, армированным элементами из проволоки ∅ 7 мм и сеткой с ячейкой 40×40 мм.

Кладка купола выполнена из малоразрыхляющегося динаса толщиной 450 мм. Через 9 кирпичей, в нижних 10 рядах предусмотрены выгорающие деревянные прокладки 450×132×4 мм. Вплотную к кожуху уложена теплоизоляция из динаса легковеса ДЛ-1,2 толщиной 114 мм, за ним – слой ШЛБ-1,0 толщиной 114 мм.

II зона – высокотемпературная с применением динаса ДВ толщиной 345 мм как основной стены.

Здесь, как и в куполе, через каждые 4 кирпича из динаса предусмотрены деревянные радиальные выгорающие прокладки толщиной 4 мм. Вплотную к динасу уложен динасовый легковес ДЛ-1,2 толщиной 65 мм. На кожух нанесен слой торкретмассы толщиной 65 мм. Между торкретом и легковесным окатом уложены маты МКРВ-350 № 1 в три слоя.

III зона – муллитокоррундовая из кирпичей МКВ-72 толщиной 345 мм. Теплоизоляция выполнена из кирпичей ШЛБ-1,0 толщиной 114 мм в два оката. Зазор между двумя окатами ШЛБ-1,0 заполнен матами МКРВ-350 № 2 в 2 слоя.

Последующие три слоя отличаются друг от друга только внутренним окатом огнеупора:

IV зона – из каолина ШБ-42;

V зона – из шамота класса А ШВ-37;

VI зона – из шамота класса Б ШВ-26.

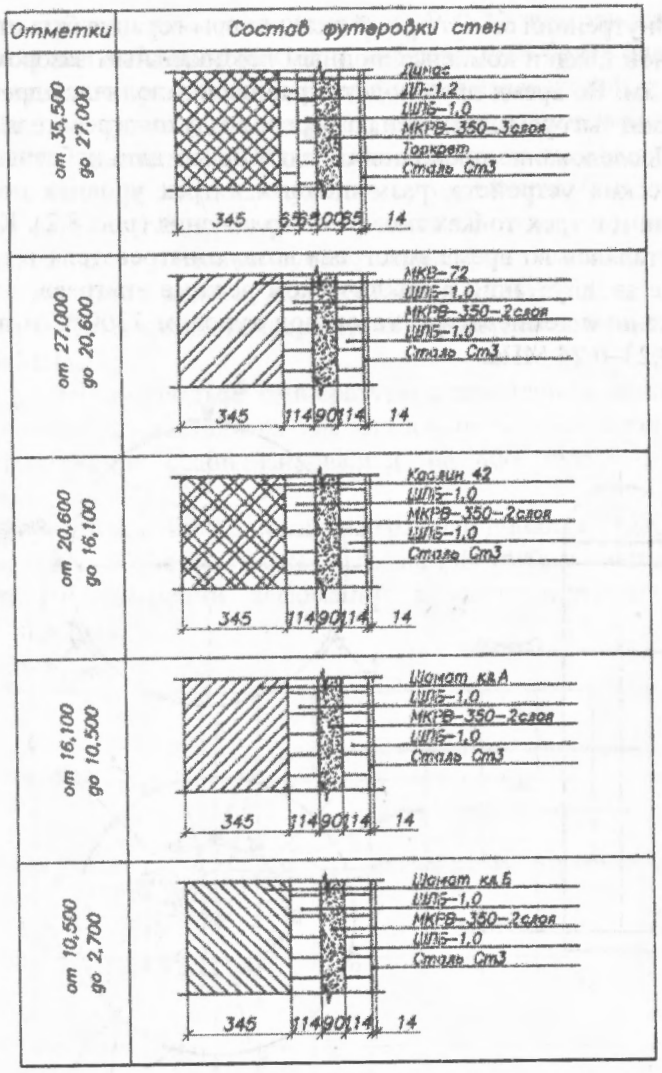


Рис. 8.1. Примененная конструкция футеровки

По всей высоте воздухонагревателя для удержания матов через каждые 2 м предусматривались кольца из ШЛБ-1,0. В местах примыкания штуцеров газовой горелки и горячего дутья были предусмотрены отрезные цвы.

Внутренний огнеупорный окат камеры горения был отделен от остальной кладки компенсационным вертикальным зазором толщиной 20 мм. Во время производства работ он заполнялся древесными опилками, выгорающими при разогреве воздухонагревателя.

Исследование проводилось с помощью длиннобазных тензометрических устройств, размещенных в трех уровнях по высоте аппарата и в трех точках поперечного сечения (рис. 8.2). Контроль осуществлялся во время разогрева воздухонагревателя и в первом периоде эксплуатации в циклическом режиме «нагрев», «дутье» с достижением температуры газов под куполом 1300 °С и давления дутья 0,23–0,24 МПа.

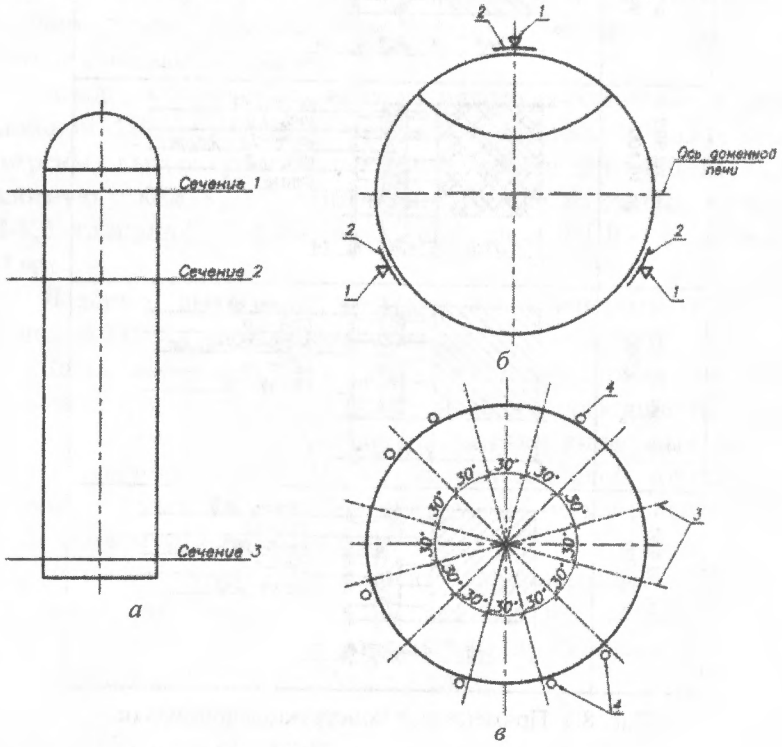


Рис. 8.2. Дислокация приборов:
а – по высоте; *б* – в кольцевом сечении; *в* – для измерения подъема днища; 1, 2 – точки измерения кольцевых и меридиональных деформаций соответственно; 3 – оси анкеров; 4 – точки измерений подъема днища

Разогрев до температуры купола 900 °С проводился доменным газом под рабочим давлением, что создавало более благоприятные условия для футеровки периферийных и перевальной стен.

На 11-е сутки с начала разогрева, когда температура газов под куполом достигла 900 °С, подача доменного газа была прекращена, и в течение 3-х последующих суток аппарат был выдержан при постоянном температурном режиме. За этот период, как и предполагалось, произошел существенный рост кладки с увеличением напряжений в кожухе: под куполом $\sigma_к$ = 110 МПа, $\sigma_м$ = 90 МПа, а в нижней части высокотемпературной динасовой зоны $\sigma_к$ = 70 МПа, $\sigma_м$ = 100 МПа.

Дальнейший подъем температуры с доведением ее до проектной величины осуществлялся с использованием газовой горелки.

Напряжения стабилизировались на 40-е сутки от начала разогрева.

На рис. 8.3, 8.4 и 8.5 показаны графики динамики напряжений, вычисленных с учетом двухосного напряженного состояния по результатам измерений дефомаций в контролируемых точках кожуха агрегата.

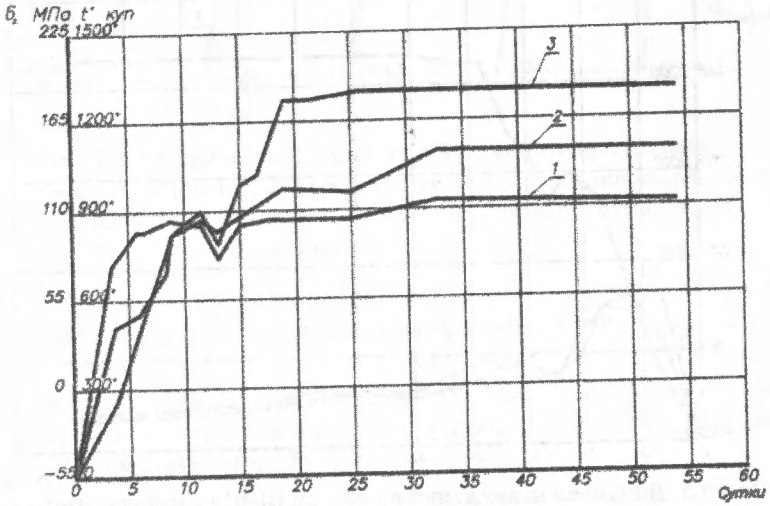


Рис. 8.3. Динамика напряжений в сечении I-I от начала разогрева:
1, 2 – кольцевые и меридиональные напряжения соответственно;
3 – температура под куполом

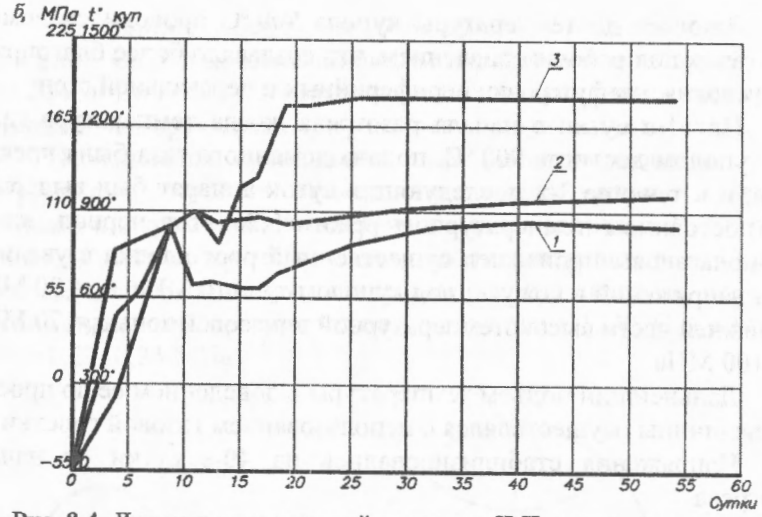


Рис. 8.4. Динамика напряжений в сечении II-II от начала разогрева:
1, 2 – кольцевые и меридиональные напряжения соответственно;
3 – температура под куполом

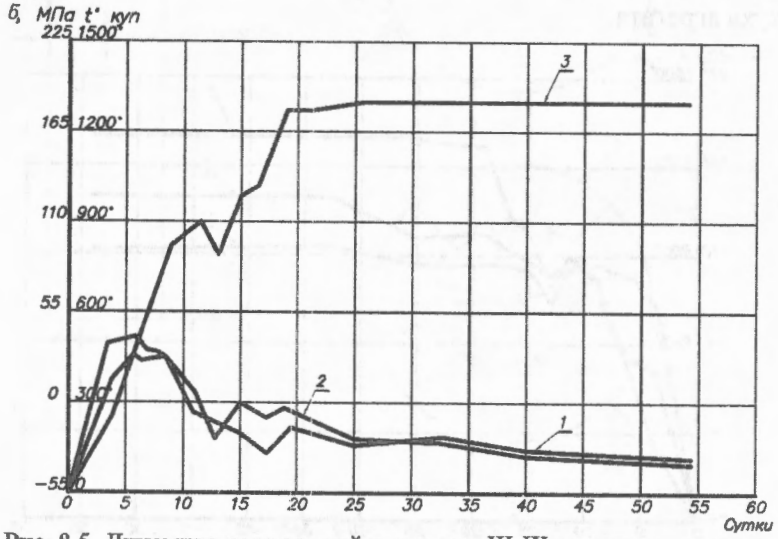


Рис. 8.5. Динамика напряжений в сечении III-III от начала разогрева:
1, 2 – кольцевые и меридиональные напряжения соответственно;
3 – температура под куполом

Из графиков видно, что максимальные напряжения в точках верхнего уровня не превышали значения предела текучести для стали ВСт3 и составляли $\sigma_к = 170$ МПа, $\sigma_м = 200$ МПа.

Экспериментальные исследования наглядно подтвердили, что с применением минераловатных матов в компенсационных зазорах футеровки существенно изменился характер напряженно-деформированного состояния кладки и кожуха. Наряду с уменьшением напряжений, в преобладающей части конструкции наблюдалось повышение меридиональных напряжений в футеровке и кожухе в районе сопряжения цилиндрической части кожуха с куполом, что иллюстрируют графики на рис. 8.6 и 8.7.

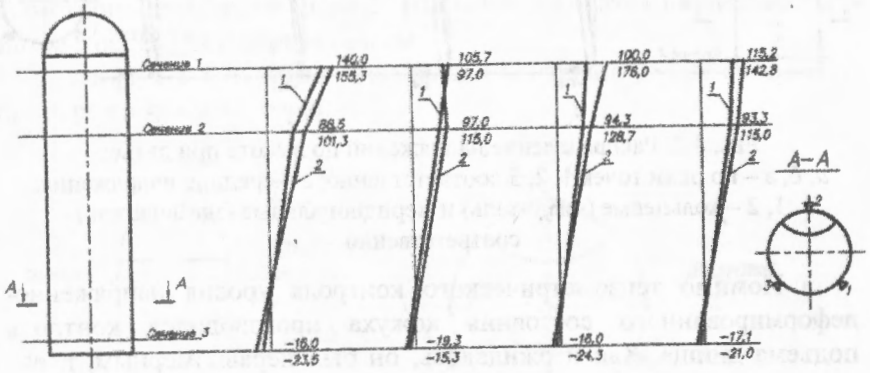


Рис. 8.6. Распределение напряжений по высоте при нагреве:
а, б, в – по осям точек 1, 2, 3 соответственно; *г* – средние напряжения;
1, 2 – кольцевые (числитель) и меридиональные (знаменатель) соответственно

По данным предыдущих исследований воздухонагревателей, в которых в качестве заполнителей компенсационных зазоров использовались засыпки из смеси граншлака с асбестом, меридиональные напряжения возрастали от купола к днищу. Объяснялось это тем, что накопление сил трения происходило от свободного верхнего сечения футеровки.

Результаты данных исследований указывают на обратный характер динамики меридиональных напряжений. Здесь происходило уменьшение их к днищу с максимальным значением в месте

сопряжения цилиндрической части кожуха с куполом. Это свидетельствует о том, что в верхней части футеровки имеется связь, препятствующая термическому росту этой зоны.

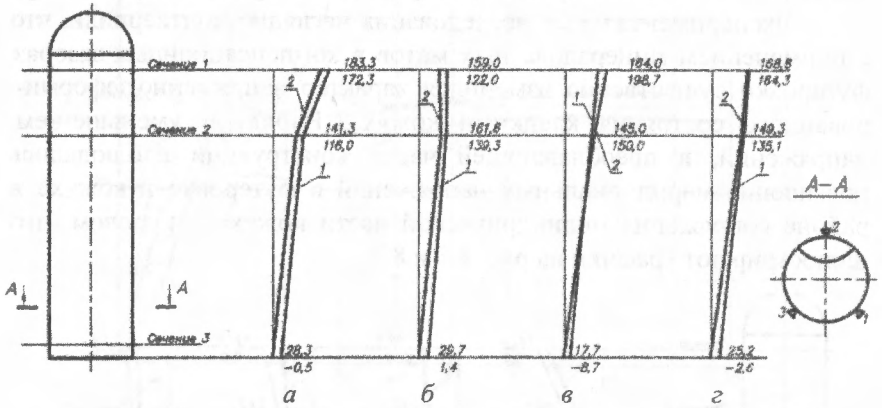


Рис. 8.7. Распределение напряжений по высоте при дутье:
а, б, в – по осям точек 1, 2, 3 соответственно; *г* – средние напряжения;
1, 2 – кольцевые (числитель) и меридиональные (знаменатель) соответственно

Помимо тензометрического контроля уровня напряженно-деформированного состояния кожуха производился контроль подъема днища. Как и ожидалось, он был неравномерным, и его максимальные значения достигли 16 мм при температуре под куполом 900 °С на оси воздухонагревателя со стороны, противоположной камере горения. Затем днище начало «садиться», максимальные значения его подъема снизились до 10–11мм и стабилизировались на этом уровне.

Таким образом, проведенный контроль, несмотря на отсутствие теоретических обоснований, позволил рекомендовать этот воздухонагреватель с тонкостенным кожухом и новой футеровкой для дальнейшей работы на необходимых технологических параметрах. Удовлетворительных результатов удалось достичь, в основном, благодаря оптимальной компоновке футеровки и примененным материалам, а также корректировке режима разогрева и первого этапа эксплуатации в зависимости от уровня напряженного состояния кожуха.

Воздухонагреватель № 2 доменной печи № 3.

До проведения капитального ремонта воздухонагреватель эксплуатировался с температурой газов под куполом 1250 °С и давлением дутья 0,25 МПа. В дальнейшем, после ремонта ставилась задача подъема температуры газов под куполом до 1350 °С и давления дутья до 0,3 МПа.

При проведении ремонта были применены эффективные материалы для футеровки. Огнеупорные слои футеровки в высокотемпературной зоне были выполнены из динасового кирпича, ниже этой зоны применены огнеупоры МКВ-72, ШВ-42, ШВ-37 и ШВ-28. Теплоизоляция была выполнена с применением динасового и шамотного легковесов ДЛ-1,2, ШЛБ-1,0, муллитокремнеземистых матов МКРВ-350 и торкретмассы.

На рис. 8.8 показана дислокация контролируемых сечений и приборов в каждом сечении.

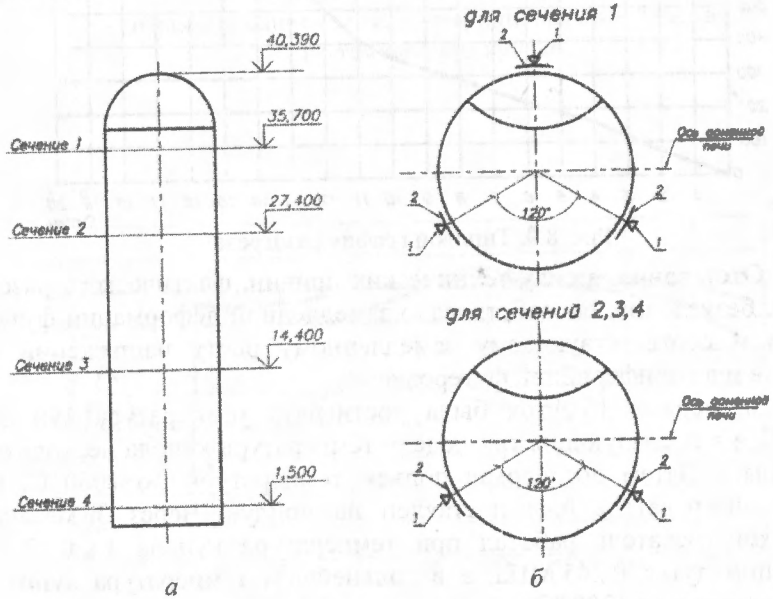


Рис. 8.8. Дислокация приборов:
а – по высоте; *б* – в кольцевом сечении;
1, 2 – точки измерения кольцевых и меридиональных деформаций соответственно

К особенности ввода в эксплуатацию такого агрегата следует отнести сравнительно медленный реальный график его разогрева, при котором скорость подъема температуры существенно отставала от графика, предусмотренного типовой инструкцией [19], по которой длительность разогрева была определена в 20 суток (рис. 8.9).

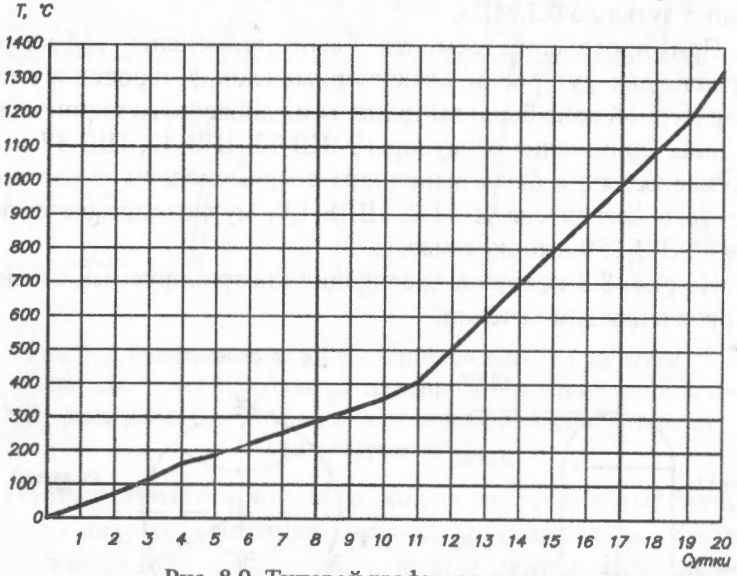


Рис. 8.9. Типовой график разогрева

Отставание, в силу технических причин, фактического разогрева, безусловно, способствовало замедленной деформации футеровки и соответствующему замедленному росту напряжений в кожухе и в периферийной футеровке.

За первые 16 суток была достигнута температура купола 780 °С, а в последующие три недели температура купола несколько снизилась. Затем последовал подъем температуры до 1060 °С, и воздухонагреватель был поставлен на поддув. Через 3 месяца воздухонагреватель работал при температуре купола 1250 °С и давлении дутья 0,245 МПа, а в дальнейшем температура купола была поднята до 1300 °С.

На рис. 8.10–8.13 показана динамика напряжений, вычисленных с учетом двухосного напряженного состояния по результатам измерений деформаций в кожухе воздухонагревателя в увязке с текущей температурой купола.

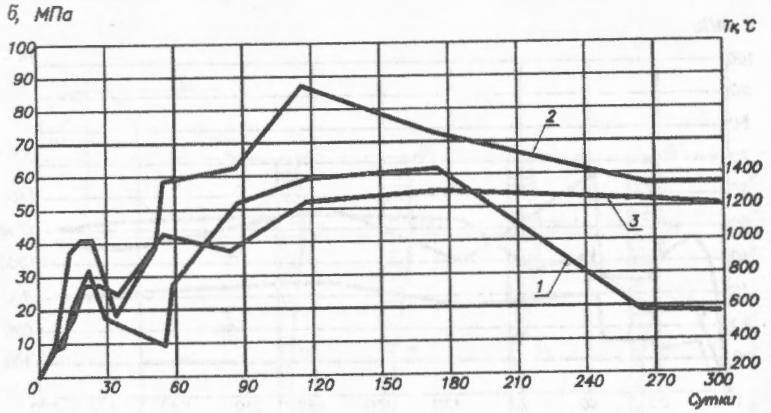


Рис. 8.10. Динамика напряжений в сечении I-I:
1 – кольцевые напряжения; 2 – меридиональные напряжения;
3 – температура купола

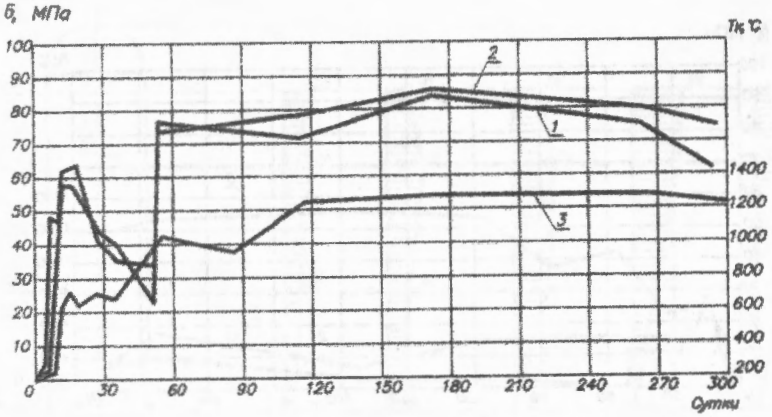


Рис. 8.11. Динамика напряжений в сечении II-II:
1 – кольцевые напряжения; 2 – меридиональные напряжения;
3 – температура купола

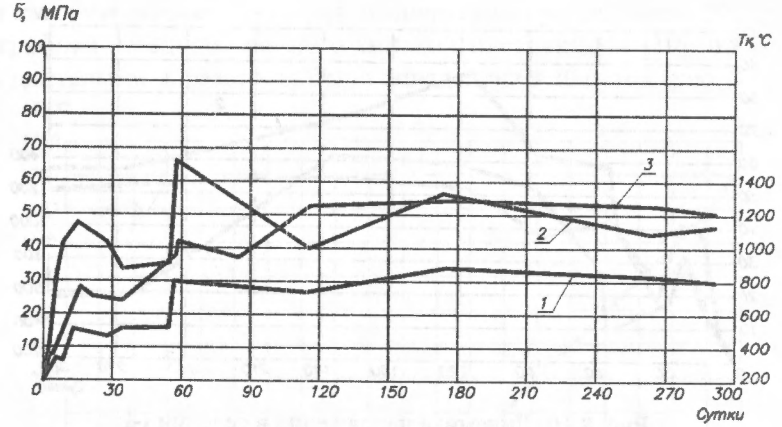


Рис. 8.12. Динамика напряжений в сечении III-III:
1 – кольцевые напряжения; 2 – меридиональные напряжения;
3 – температура купола

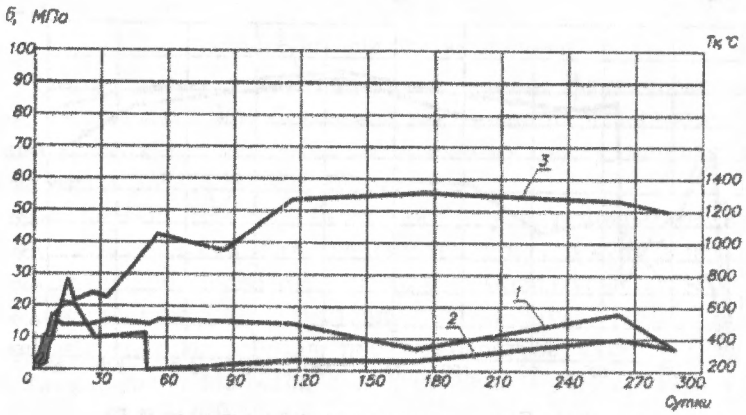


Рис. 8.13. Динамика напряжений в сечении IV-IV:
1 – кольцевые напряжения; 2 – меридиональные напряжения;
3 – температура купола

На рис. 8.14–8.15 приведено распределение кольцевых и меридиональных напряжений по высоте воздухонагревателя.

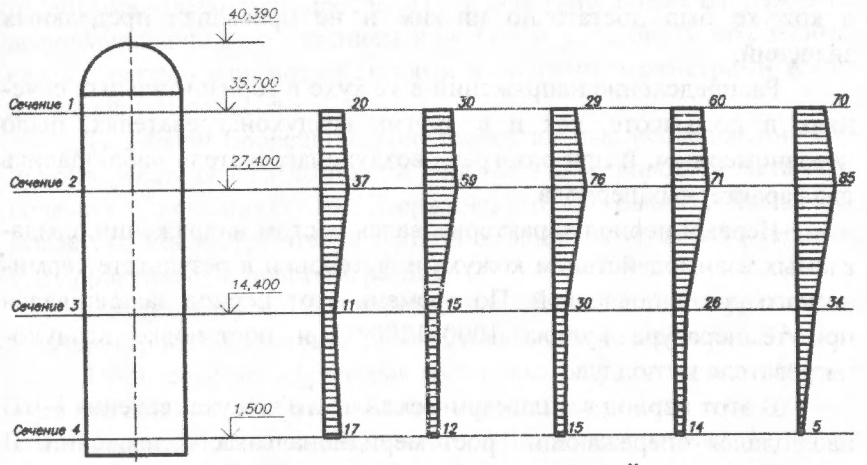


Рис. 8.14. Распределение кольцевых напряжений при нагреве по высоте кожуха воздухонагревателя по оси, проходящей через точки «в» расположения контролируемых сечений

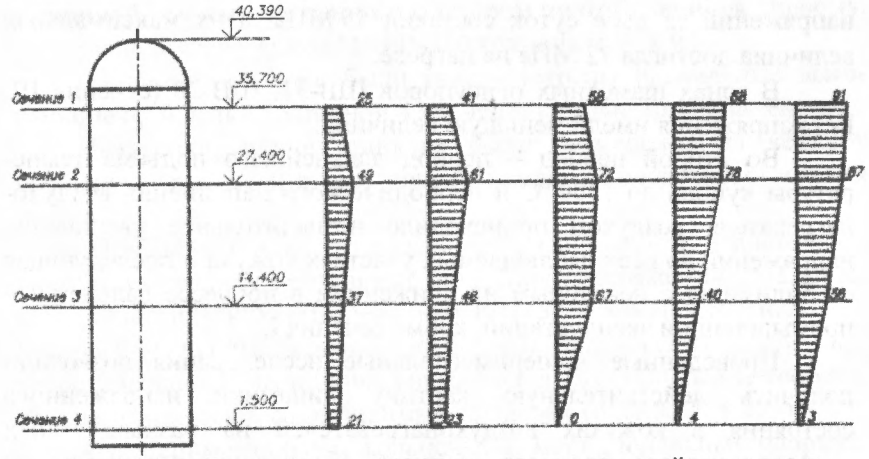


Рис. 8.15. Распределение меридиональных напряжений при нагреве по высоте кожуха воздухонагревателя по оси, проходящей через точки «в» расположения контролируемых сечений

Длительный (в течение трех месяцев) разогрев и постепенный прогрев периферийной кладки привел к оптимальному взаимодействию кожуха и кладки, в результате чего уровень напряжений в кожухе был достаточно низким и не превышал предельных значений.

Распределение напряжений в кожухе в горизонтальных сечениях и по высоте, как и в других воздухонагревателях, было неравномерным, и при разогреве воздухонагревателя наблюдались два характерных периода.

Первый период характеризовался ростом напряжений, создаваемых взаимодействием кожуха и футеровки в результате термического роста последней. По времени этот период заканчивался при температуре купола 1000–1200 °С и постановке воздухонагревателя на поддув.

В этот период в цилиндрической части кожуха (сечения I–III) наблюдался опережающий рост меридиональных напряжений. В районе сопряжения кладки из динаса и МКВ-72 (сечение II) зарегистрирован наиболее резкий рост напряжений при постановке воздухонагревателя на поддув. Перепад меридиональных напряжений за двое суток составил 55 МПа, а их максимальная величина достигла 72 МПа на нагреве.

В зонах шамотных огнеупоров ШВ-37, ШВ-28 (сечения III, IV) напряжения имели меньшую величину.

Во второй период – период дальнейшего подъема температуры купола до 1300 °С и периодического наполнения воздухонагревателя воздухом происходило незначительное увеличение напряжений во всех наблюдаемых участках кожуха и последующая стабилизация с некоторым их снижением в процессе дальнейшей промышленной эксплуатации, кроме сечения I.

Проведенные экспериментальные исследования позволили получить действительную картину динамики напряженного состояния в кожухах воздухонагревателей на разных этапах технологического процесса, принять обоснованные решения по сохранению и дальнейшей эксплуатации тонкостенных кожухов многих воздухонагревателей при полной замене футеровки и вывести их на работу с достаточно высокими рабочими

параметрами, что не могло быть достигнуто только с помощью теоретического анализа.

Экспериментальные исследования других воздухонагревателей также позволили проследить за действительным напряженно-деформированным состоянием кожухов и установить его взаимосвязь с нагрузками, воздействиями и другими параметрами технологического процесса.

Так, были проведены экспериментальные исследования воздухонагревателя № 3 доменной печи № 9 Днепровского металлургического комбината им. Дзержинского (Украина), вводимого после его реконструкции с полной заменой кожуха и футеровки, т. е., практически, нового агрегата.

Воздухонагреватель предназначался для эксплуатации с температурой под куполом 1400 °С и рабочим давлением 0,3 МПа.

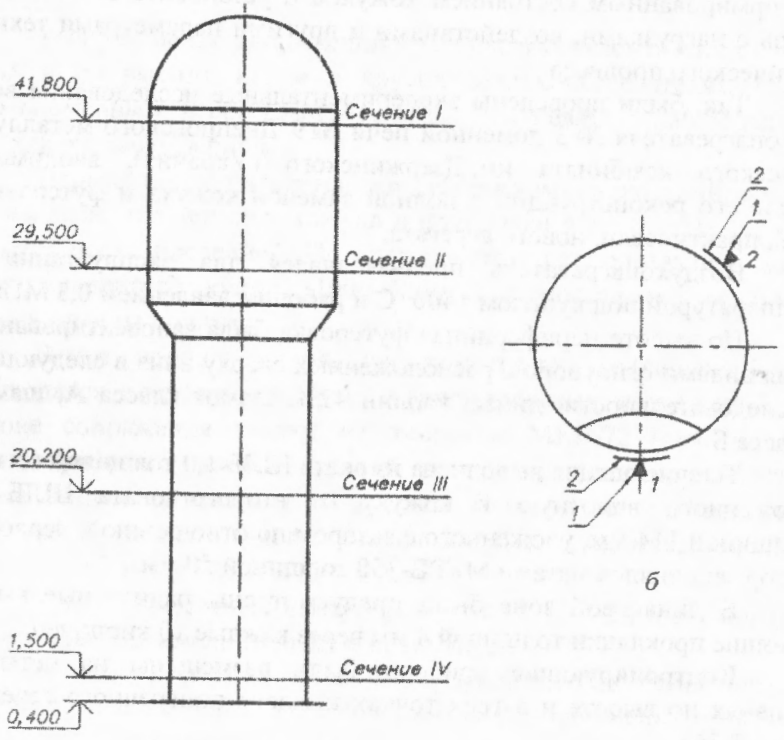
По высоте периферийная футеровка была запроектирована с 4-мя видами огнеупоров, расположенных сверху вниз в следующей последовательности: динас, каолин 42%, шамот класса А, шамот класса Б.

Теплоизоляция выполнена из оката ШЛБ-1,0 толщиной 65 мм, уложенного вплотную к кожуху, и второго оката ШЛБ-1,0 толщиной 114 мм, уложенного с зазором по отношению к первому. Зазор заполнялся матами МКРВ-350 толщиной 50 мм.

В динасовой зоне были предусмотрены радиальные выгорающие прокладки толщиной 4 мм через каждые 10 кирпичей.

Контролирующие приборы были размещены на четырех уровнях по высоте и в трех точках каждого поперечного сечения (рис. 8.16).

При испытании этого кожуха на прочность избыточным давлением экспериментальные значения напряжений оказались ниже теоретических, определенных по [35], исключая сечение IV, в котором экспериментальные кольцевые напряжения опережают теоретические, а меридиональные, экспериментальные и теоретические находятся в сопоставимых пределах (рис. 8.17–8.20, на них 1, 2 – экспериментальные кольцевые и меридиональные напряжения соответственно; 3, 4 – теоретические кольцевые и меридиональные напряжения соответственно).



а *б*

Рис. 8.16. Дислокация мест измерений:
а – по высоте; *б* – в кольцевом сечении;
1, 2 – точки измерения кольцевых и меридиональных деформаций соответственно

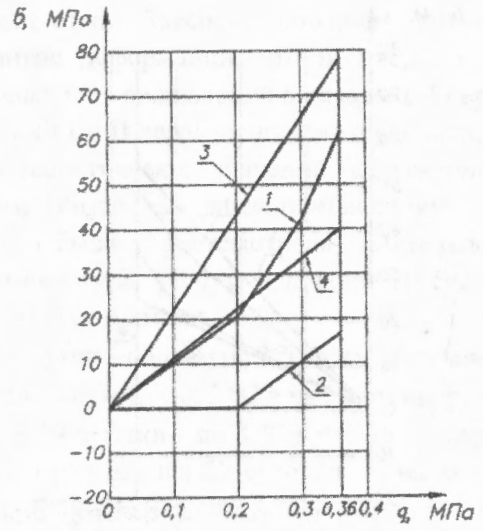


Рис. 8.17. Динамика напряжений в сечении I-I при испытании на прочность

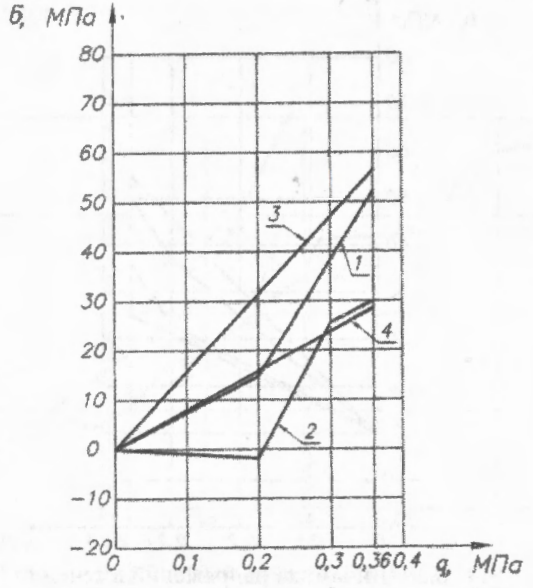


Рис. 8.18. Динамика напряжений в сечении II-II при испытании на прочность

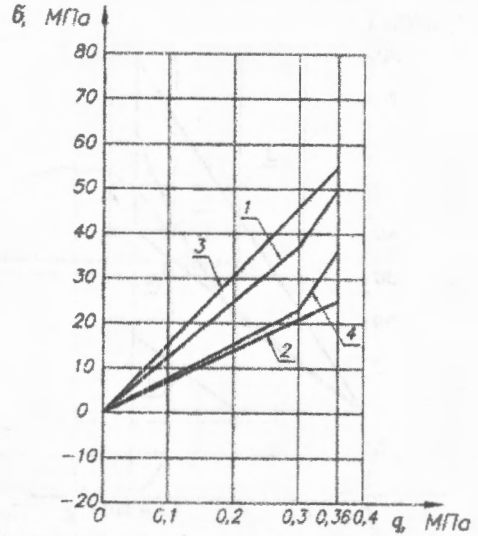


Рис. 8.19. Динамика напряжений в сечении III- III при испытании на прочность

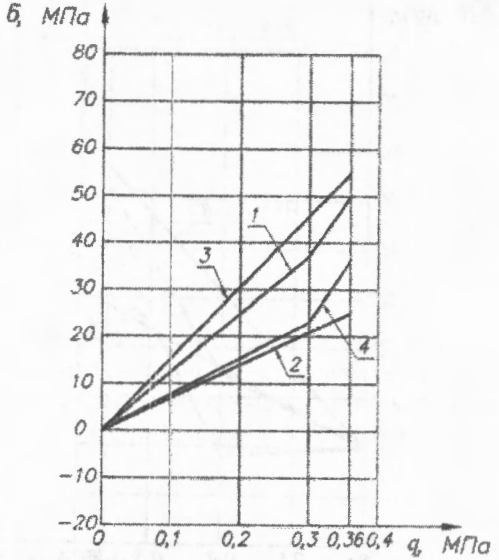


Рис. 8.20. Динамика напряжений в сечении IV-IV при испытании на прочность

Это может быть объяснено влиянием торкретслоя, сдерживающего развитие деформаций, что подтверждается характером роста меридиональных напряжений в начальный период разогрева.

Для сечений I и II характерно некоторое сближение экспериментальных и теоретических значений напряжений при достижении внутренним избыточным давлением величины выше 0,2 МПа.

Графиком была предусмотрена длительность разогрева агрегата до температуры 1400 °С в течение 20 суток (рис. 8.21) со следующей схемой ее подъема:

– первые 14 суток – подъем на 2 °С в час до температуры 700 °С,
– следующие 4 суток – на 5 °С в час до температуры 1200 °С,
– последние 19-е сутки – по 8 °С в час до температуры 1400 °С.

Фактически разогрев длился 29 суток, т. к. на две пятидневки по техническим причинам был приостановлен подъем температуры. На 29-е сутки температура была поднята до 1260 °С, и по окончании разогрева воздухонагреватель эксплуатировался с температурой купола 1300 °С.

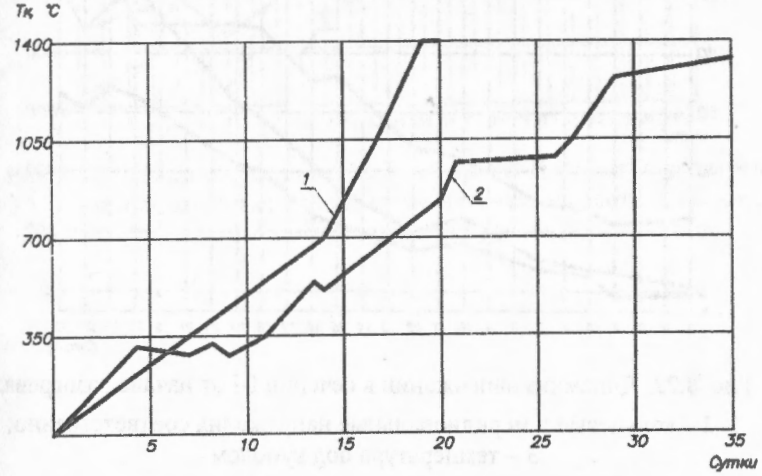


Рис. 8.21. Графики разогрева воздухонагревателя:
1, 2 – теоретический и фактический соответственно

На рис 8.22–8.25 показаны вычисленные по результатам измерений, с учетом двухосного напряженного состояния, кольцевые и меридиональные напряжения в кожухе. По ним видно, что интенсивный рост напряжений в кожухе начался при температуре 200 °С и продолжался до температуры 900 °С. В этот промежуток времени произошел существенный термический рост кладки с соответственным увеличением напряжений в кожухе.

В этот период кольцевые напряжения в сечении I значительно опережают меридиональные, а в сечениях II и IV – незначительно отстают от них. В сечении III уровень напряжений двух направлений находится в сопоставимых пределах.

Максимальные значения напряжений зафиксированы в сечении I на 25-е сутки от начала разогрева.

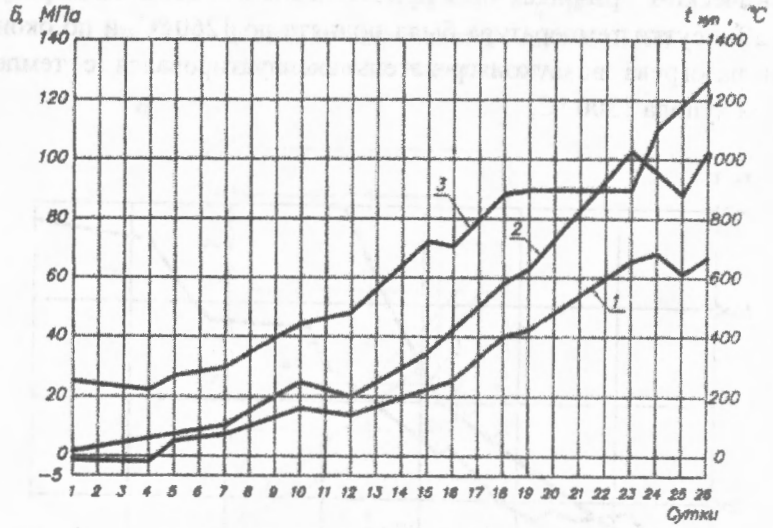


Рис. 8.22. Динамика напряжений в сечении I-I от начала разогрева:
1, 2 – кольцевые и меридиональные напряжения соответственно;
3 – температура под куполом

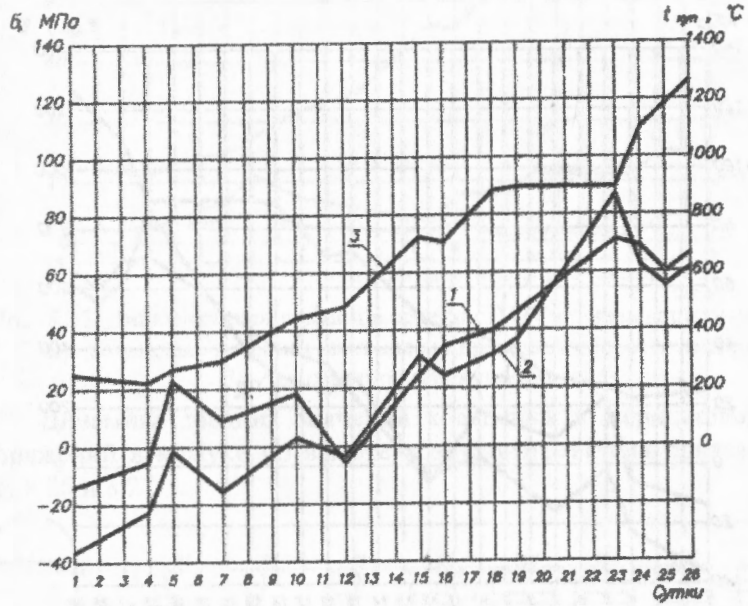


Рис. 8.23. Динамика напряжений в сечении II-II от начала разогрева:
1, 2 – кольцевые и меридиональные напряжения соответственно;
3 – температура под куполом

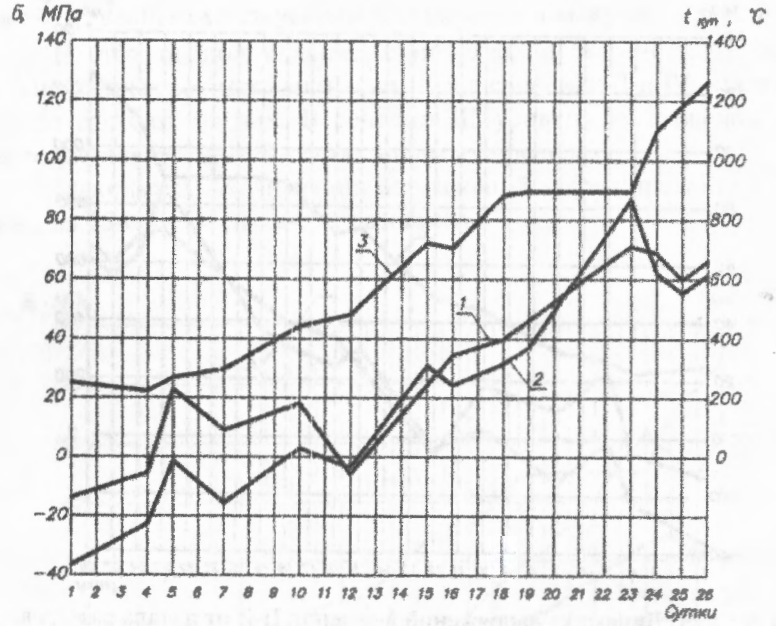


Рис. 8.24. Динамика напряжений в сечении III-III от начала разогрева:
1, 2 – кольцевые и меридиональные напряжения соответственно;
3 – температура под куполом

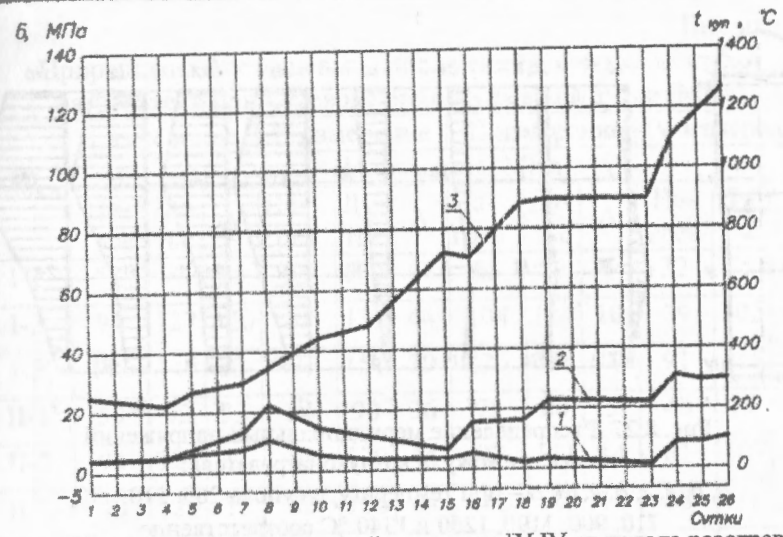


Рис. 8.25. Динамика напряжений в сечении IV-IV от начала разогрева:
1, 2 – кольцевые и меридиональные напряжения соответственно;
3 – температура под куполом

Динамика средних значений кольцевых и меридиональных напряжений в кожухе по высоте воздухонагревателя показана на рис. 8.26 и 8.27.

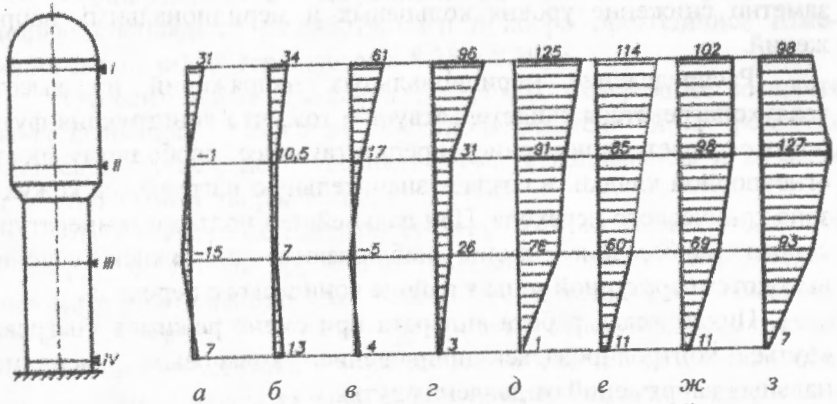


Рис. 8.26. Распределение кольцевых напряжений
по высоте кожуха воздухонагревателя:
а, б, в, г, д, е, ж, з – при температуре купола 265, 310, 490,
710, 900, 1190, 1260 и 1340 °С соответственно

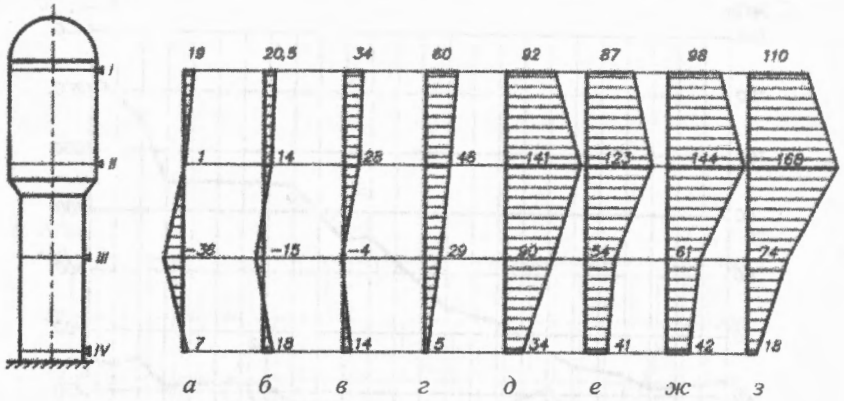


Рис. 8.27. Распределение меридиональных напряжений по высоте кожуха воздухонагревателя:
а, б, в, г, д, е, ж, з – при температуре купола 265, 310, 490, 710, 900, 1190, 1260 и 1340 °С соответственно

Графики отражают интенсивность изменения усилий в кольцевом и меридиональном направлениях, действующих на кожух по высоте воздухонагревателя. Из графиков следует, что наибольшая величина напряжений имеет место в подкупольной зоне при разогреве купола до 900 °С. Через три месяца эксплуатации было заметно снижение уровня кольцевых и меридиональных напряжений.

Распределение меридиональных напряжений по высоте воздухонагревателя свидетельствует о том, что конструкция футеровки создает защемление, препятствующее свободному росту огнеупорной кладки, и создает значительную нагрузку на кожух в зоне конического перехода. При дальнейшем подъеме температуры купола наибольшие усилия наблюдаются в нижнем сечении высокотемпературной зоны в районе конического перехода.

Циклическая работа аппарата при смене режимов «нагрев», «дутье» контролировалась приращением кольцевых и меридиональных напряжений от давления дутья.

Приращения кольцевых напряжений от давления дутья 0,21 МПа–0,23 МПа показаны в таблицах 8.1 и 8.2 и находятся в пределах 38–48 МПа, а меридиональных – до 40 МПа.

Таблица 8.1

Приращения Δ кольцевых напряжений в кожухе воздухонагревателя при переводе его с нагрева на дутье (МПа)

Точка	I измерение			II измерение			III измерение			IV измерение		
	Напряжения, МПа											
	Нагрев	Дутье	Δ	Нагрев	Дутье	Δ	Нагрев	Дутье	Δ	Нагрев	Дутье	Δ
I-1	58	93	35	56	100	44	65	72	7	32	75	43
I-2	91	127	326	87	131	44	104	114	10	59	102	43
I-3	113	146	33	112	151	39	126	136	10	91	125	34
II-1	59	92	33	54	90	36	75	80	5	48	77	20
II-2	94	127	33	85	129	44	97	111	14	81	107	26
II-3	98	125	27	82	126	44	102	118	16	78	93	15
III-3	93	133	40	77	115	38	93	101	8	64	87	23
IV-1	9	55	46	9,5	57	47,5	12	27	15	–6	32	38
IV-2	10	40	30	6,5	38	31,5	2	25	23	–23	6	29
IV-3	6	41	35	4	40	36	2	21	19	25	15	40

Одновременно с измерениями деформаций кожуха, с помощью специально разработанного прибора проводились измерения смещений футеровки (рис. 8.28 и 8.29).

Относительные смещения футеровки, измеренные во время первоначального разогрева воздухонагревателя и в режимах «нагрев», «дутье», не превышали 30 мм в радиальном и 25 мм в меридиональном направлении.

Из полученных данных следует, что по мере повышения температуры купола происходит радиальное сжатие деформативных матов, заполняющих компенсационные зазоры, и проскальзывание огнеупорного оката футеровки относительно кожуха. Наибольшая интенсивность радиального сжатия матов наблюдалась до температуры купола 400 °С, после чего она существенно уменьшилась. Можно предположить, что это является следствием выгорания при температуре выше 400 °С прокладок, установленных в зазоры.

Таблица 8.2

Приращения Δ меридиональных напряжений в кожухе воздухонагревателя при переводе его с нагрева на дутье (МПа)

Точка	I измерение			II измерение			III измерение			IV измерение		
	Напряжения, МПа											
	Нагрев	Дутье	Δ	Нагрев	Дутье	Δ	Нагрев	Дутье	Δ	Нагрев	Дутье	Δ
I-1	74	82	8	76	91	15	84	84	0	26	52	26
I-2	109	126	17	105	138	33	117	124	7	49	89	40
I-3	107	117	10	113	127	14	128	131	3	63	86	23
II-1	85	98	13	75	102	27	100	101	1	33	50	17
II-2	139	153	14	120	150	30	127	142	15	85	101	16
II-3	115	138	23	102	130	28	133	144	11	107	118	11
III-3	66	78	12	50	70	20	74	69	–5	63	74	11
IV-1	117	48	31	17	53	36	18	66	48	–28	–3	20
IV-2	30	48	18	25	43	18	11	37	26	–19	–11	2
IV-3	25	46	21	20	44	24	11	31	20	–20	–8	12

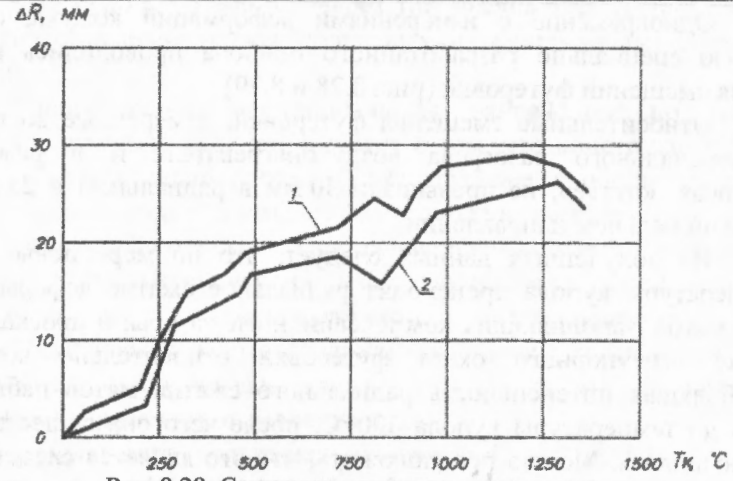


Рис. 8.28. Смещение высокоплотного динаса в радиальном направлении:
1 – точки 2 и 3 в сечении II-II соответственно

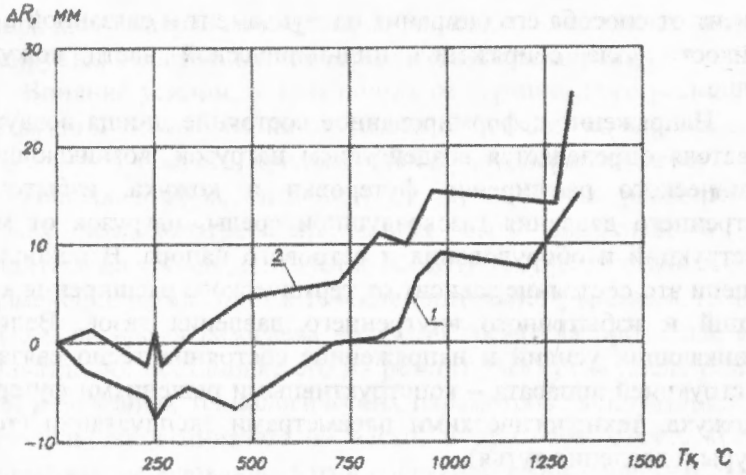


Рис. 8.29. Смещение высокоплотного динаса в меридиональном направлении:
1 – точки 2 и 3 в сечении II-II соответственно

Следует заметить, что при температуре купола 1200-1300 °С происходит резкое возрастание интенсивности проскальзывания футеровки при одновременном уменьшении степени сжатия матов.

Многолетние наблюдения за работой кожухов воздухонагревателей и анализ работы огнеупорной кладки в диапазоне ее рабочих температур показали, что при повышении температуры купола с 1300 ° до 1350 °С напряженное состояние кожуха практически не меняется.

Так как радиальное давление кладки на кожух зависит от напряжений в самой кладке, объяснить это явление можно тем, что с ростом температуры выше 1300 °С температурные деформации кладки немного увеличиваются при одновременном уменьшении модуля упругости. Эти два фактора оказывают противоположное влияние на напряженное состояние, незначительно изменяя его.

§ 8.3. Исследование работы узла опирания кожуха воздухонагревателя на фундамент

Надежная долговременная работа воздухонагревателя на высоких технологических параметрах в значительной степени

зависит от способа его опирания на фундамент и связанной с этим стойкости узла сопряжения цилиндрической части кожуха с днищем.

Напряженно-деформированное состояние днища воздухонагревателя определяется воздействием нагрузок, возникающих от термического расширения футеровки и кожуха, избыточного внутреннего давления газовоздушной среды, нагрузок от массы конструкций и оборудования и ветрового напора. В наибольшей степени это состояние зависит от термического расширения конструкций и избыточного внутреннего давления газов. Величина возникающих усилий и напряженное состояние тесно связаны с конструкцией аппарата – конструктивными решениями футеровки и кожуха, технологическими параметрами эксплуатации (температуры и давления дутья).

На основе накопленного опыта и результатов ряда исследований может быть рассмотрен следующий механизм работы днища в районе его сопряжения с цилиндрической оболочкой кожуха.

Во время первоначального разогрева воздухонагревателя при отсутствии давления газа, в результате термического расширения футеровки и ее взаимодействия с кожухом возникают значительные меридиональные усилия в цилиндрической части и вертикальная нагрузка на днище, являющаяся суммой воздействий от термического расширения и массы конструкций. При этом неравномерность теплового расширения по толщине футеровки периферийных стен приводит к передаче нагрузок на днище от термического расширения и массы периферийных стен на некотором удалении от контура сопряжения днища с цилиндром.

Неразрывная связь цилиндра с днищем приводит к уравновешиванию этих усилий. Поскольку нагрузки, прижимающие днище к фундаменту, распределены по всей поверхности днища, а меридиональные усилия в кожухе действуют на днище по его контуру, равновесие узла сопряжения днища с цилиндром наступает после отрыва периферийной части днища от фундамента.

В результате такого отрыва в области узла сопряжения днища с цилиндром возникают дополнительные деформации изгиба и соответствующие им напряжения. При постановке воздухонагревателя на дутье избыточное давление газов создает

аналогичное напряженно-деформированное состояние, которое суммируется с состоянием от термического расширения.

Влияние усилий, возникающих от термического расширения конструкций и избыточного давления газов, на прочность и долговечность области, прилегающей к узлу, неравнозначно.

Напряжения, возникающие от термического расширения в кожухах воздухонагревателя, могут быть высокими и даже находиться на уровне, близком к пределу текучести стали. Однако их изменение происходит в течение длительного времени, главным образом, во время разогрева воздухонагревателя при вводе его в эксплуатацию, постановке его на ремонт, разогрева после ремонта и при изменениях технологических параметров эксплуатации. Эти обстоятельства возникают не часто, и при этом отсутствует их циклическое чередование, что в сочетании с применением стали с соответствующими свойствами обеспечивает длительную прочность конструкции.

В то же время, работа воздухонагревателя на дутье имеет достаточно высокую формализованную частоту повторения, и если амплитуда дополнительных напряжений от этого достигает определенного уровня, то, суммируясь с ранее достигнутым уровнем напряжений от термического расширения, возникает состояние, известное, как малоцикловая усталость металла, которая существенно снижает надежность и долговечность воздухонагревателя.

Таким образом, на прочность этого узла влияют два основных фактора – меридиональные усилия в кожухе, вызывающие подъем и изгиб окрайков днища, и цикличность воздействия дутья, вызывающая напряжения малоцикловой усталости металла. Исключение или снижение этих воздействий на узел может повысить его длительную прочность.

Уменьшение меридиональных усилий в кожухе может быть достигнуто только путем оптимальной компоновки футеровки, обеспечивающей минимальные воздействия на кожух.

Известно, что в аппаратах, где в качестве заполнителя компенсационных зазоров использовались малодеформируемые материалы (например засыпка), стойкость узла сопряжения цилиндрической части кожуха с днищем оказывалась недостаточной. Во

время разогрева имели место значительные (до 150 мм) подъемы окрайков днища, частые разрушения анкеров, сквозные трещины в днище, нарушающие газоплотность аппарата и трудно поддающиеся ремонту.

С применением теплоизоляционных деформативных матов меридиональные напряжения в кожухе значительно снизились, подъемы окрайков днища во время разогрева уменьшились до 10 – 15 мм, стойкость узла сопряжения цилиндрической части кожуха с днищем возросла.

Что касается цикличности воздействия нагрузки от дутья, то, поскольку она является составляющей технологического процесса, исключить ее можно только путем закрепления кожуха к фундаменту, что, препятствуя деформированию узла, одновременно приводит к росту меридиональных усилий N в кожухе.

Анализ применяемых конструктивных решений узлов сопряжения кожуха воздухонагревателя с днищем позволяет разделить их на три группы (рис. 8.30):

1. Воздухонагреватели с плоскими днищами.

2. Воздухонагреватели с днищами, образованными несколькими коническими оболочками или полусферой.

3. Воздухонагреватели с кожухами, защемленными в фундаменте.

В указанных схемах эти усилия вызывают различное напряженно-деформированное состояние.

Основное отличие конструктивных решений состоит в том, что при плоском днище узел его сопряжения с первым поясом воздухонагревателя (рис. 8.30*а*) допускает деформации при воздействии меридиональных усилий. Эти деформации приводят к подъему окрайков днища с отрывом от фундамента, что, с одной стороны, снижает величину меридиональных усилий и соответствующих напряжений от них в кожухе, но, с другой стороны, приводит к изгибу узла и связанным с ним значительным напряжениям краевого эффекта.

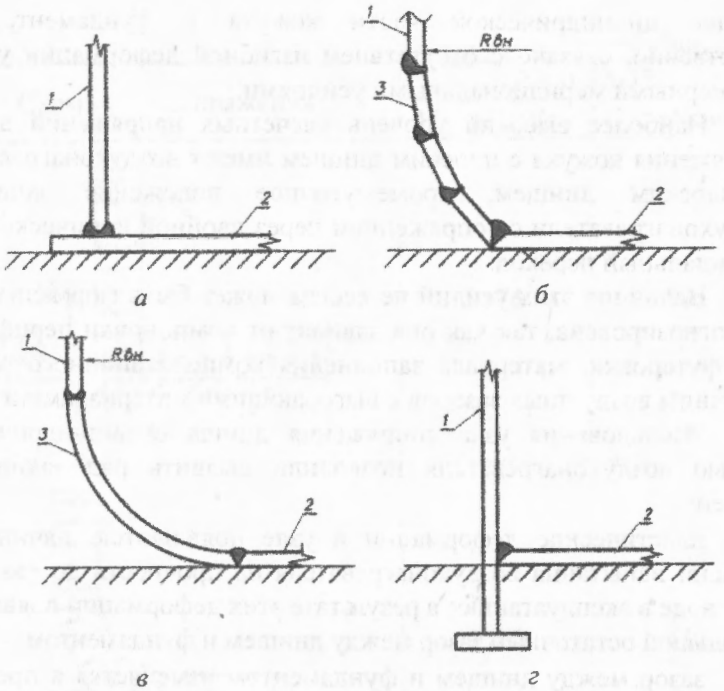


Рис. 8.30. Формы сопряжения кожуха воздухонагревателя с днищем:
а – плоское днище; *б*, *в* – конический и сферический переход;
г – защемленный цилиндр; 1 – цилиндрическая часть кожуха;
2 – днище кожуха; 3 – переходные конические и сферические элементы

В кожухах с днищами, образованными несколькими коническими оболочками или полусферой, а также с днищами, защемленными в фундаменте или в жестком основании (см. рис 8.30 *б*, *в*, *г*) деформации от меридиональных усилий не происходят, и, соответственно, уровень меридиональных напряжений достаточно высок, но, в то же время, отсутствует изгиб узла.

С целью изучения напряженно-деформированного состояния узла сопряжения днища с кожухом был теоретически проанализирован ряд решений приведенных выше различных конструктивных форм.

Сопоставительный расчетный анализ (см. табл. 8.3) показал, что наименьшие напряжения и деформации возникают при полной

заделке цилиндрической части кожуха в фундамент, что, естественно, связано с отсутствием изгибной деформации узла и чрезмерными меридиональными усилиями.

Наиболее высокий уровень расчетных напряжений в узле сопряжения кожуха с плоским днищем имеют воздухонагреватели с плоским днищем, промежуточное положение занимают воздухонагреватели с сопряжением через двойной конический или тороидальный переход.

Величина этих усилий не всегда может быть формализована и прогнозирована, так как она зависит от компоновки периферийной футеровки, материала заполнения компенсационного зазора, величины воздушных зазоров с выгорающими материалами и пр.

Исследования узла сопряжения днища с цилиндрической частью воздухонагревателя позволили выявить ряд закономерностей:

– пластические деформации в узле появляются, начиная со времени испытания воздухонагревателя на прочность до разогрева при вводе в эксплуатацию; в результате этих деформаций появляется небольшой остаточный зазор между днищем и фундаментом;

– зазор между днищем и фундаментом изменяется в пределах 2–4 мм в зависимости от температурного режима и давления дутья при эксплуатации;

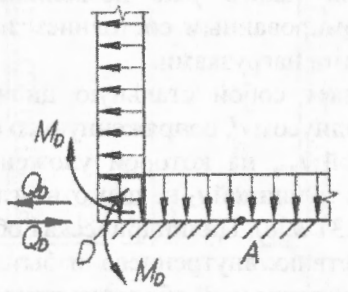
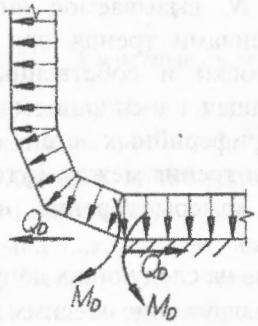
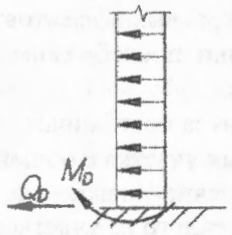
– упругая линия формы сопряжения, а, следовательно, и напряжения в области этого узла существенно зависят от температуры днища.

С точки зрения конструктивной формы опирания кожуха воздухонагревателя на фундамент можно выделить:

– безанкерные воздухонагреватели;
– воздухонагреватели со всеми видами анкерных устройств;
– воздухонагреватели с кожухом, защемленным в фундаменте.

Воздухонагреватели без анкеров являются весьма перспективным конструктивным решением при реконструкции и строительстве их на существующих фундаментах. Отдельные такие воздухонагреватели в течение ряда лет успешно эксплуатируются без повреждений на некоторых промышленных предприятиях.

Таблица 8.3

Схема узла сопряжения	P = 0,4 МПа	
	M_D, кНсм/см	Q_D, кНсм/см
	9176	380
	3200	440
	1221	91

Однако отсутствие достоверной информации о работе безанкерного узла сопряжения днища с кожухом воздухонагревателя в условиях отмеченных выше воздействий не дает достаточных оснований для его широкого применения.

Теоретические исследования такого узла позволили проследить за его напряженно-деформированным состоянием и установить взаимосвязи с действующими нагрузками.

Расчетная схема представляет собой стальную цилиндрическую оболочку толщиной $t_ц$ и радиусом d, сопряженную со стальной круглой пластиной толщиной $t_{шп}$, на которой уложен слой шамотного огнеупорного кирпича толщиной t_2 на шамотно-глинистом растворе толщиной $2h$ (рис. 8.31 *а, в*). Цилиндрическая оболочка и пластина подвержены действию внутреннего избыточного давления P газовой среды. К цилиндрической оболочке приложено контурное меридиональное усилие N, вызываемое внутренним избыточным давлением на купол, силами трения при температурном росте периферийной футеровки и собственным весом кожуха (рис. 8.31*б*). Пластина, лежащая на сплошном бетонном основании, пригружена массой периферийных стен с учетом распределенных по ширине стены сил трения между футеровкой и кожухом, массой кладки купола и камеры горения, насадки и поднасадочного устройства (рис. 8.31*г*).

Математическая модель строится на следующих допущениях:

– материалы линейно-упругие и нагружение осесимметричное;

– цилиндрическая оболочка является достаточно длинной, чтобы не учитывать взаимное влияние краевых эффектов;

– продольные деформации оболочки пренебрежимо малы по сравнению с прогибами края пластины;

– температура пластины вдоль радиуса постоянна;

– пластина разбита на два кольцевых участка с общей границей $r = b$, нагруженных равномерной поперечной нагрузкой, имеющей различную интенсивность в пределах каждого из участков (q_1 и q_2);

– основание пластины абсолютно жесткое;

– цилиндрическая оболочка вдали от краев находится в безмоментном состоянии.

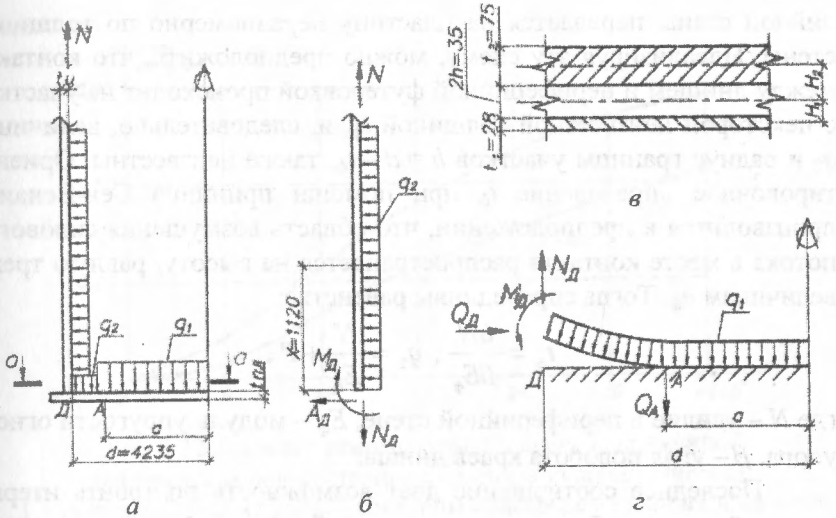


Рис. 8.31. Расчетные схемы узла сопряжения кожуха с днищем

Разрешающими являются уравнения неразрывности деформаций цилиндра и пластины в общих точках, т. е. обычные уравнения метода сил. Однако расчетная модель имеет ряд особенностей, усложняющих задачу.

Во-первых, днище рассматривается как трехслойная пластина, в которой роль заполнителя играет шамотно-глинистый раствор. Такая модель обусловлена тем, что раствор обеспечивает совместную работу стальной пластины и слоя огнеупоров, а условия изгиба днища таковы, что на долю огнеупорного слоя приходится зона сжимающих напряжений, которые кладка может воспринять. Таким образом, жесткость днища определяется как приведенная.

Во-вторых, центральная часть днища при деформации остается плоской, прижатой к основанию, т. е. изгибается только кольцевая часть с неизвестным внутренним радиусом a. Задача определения величины a из дополнительного условия отсутствия моментных напряжений в плоской части пластины $M_{r=a} = 0$ является нелинейной, что существенно усложняет расчет, т. к. это уравнение решается совместно с системой уравнения метода сил.

В-третьих, при подъеме краев днища нагрузка от перифе-

рийной стены передается на пластину неравномерно по толщине стены. Идеализируя эту схему, можно предположить, что контакт между днищем и периферийной футеровкой происходит на участке с некоторой неизвестной толщиной $t_ф$, и, следовательно, величина q_2 и радиус границы участков $b = d - t_ф$, также неизвестны. Ориентировочное определение $t_ф$ при помощи принципа Сен-Венана производится в предположении, что область возмущения силового потока в месте контакта распространяется на высоту, равную трем величинам $\delta_ф$. Тогда справедливы равенства:

$$t_ф = \frac{6N}{\beta E_ф};\ q_2 = \frac{N}{E_ф} + P,$$

где N – усилие в периферийной стене, $E_ф$ – модуль упругости огнеупора, β – угол поворота краев днища.

Последнее соотношение дает возможность построить итерационный процесс. Задаваясь величиной $\beta = \beta_n$ ($n = 0, 1, 2 \ldots$), определяем $\delta_ф$ и все характеристики напряженно-деформированного состояния, включая угол поворота края $\theta = \beta_n^1$. Следующая итерация: $\beta_{n+1} = 0{,}5\left(\beta_n + \beta_n^1\right)$. Окончательное значение $\delta_ф$ соответствует β_n, при котором $\beta_n - \beta_n^1 << 1$.

Алгоритм решения задачи реализован при следующих исходных данных:

- модуль упругости для стали $E = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\nu = 0{,}3$;
- $d = 424$ см; $t_ц = t_{шл} = 2{,}8$ см; $h = 2{,}75$ см; $t_2 = 7{,}5$ см;
- модуль упругости для огнеупора $E_ф = 5 \cdot 10^3$ МПа; $q_1 = 0{,}52$ МПа;
- коэффициент линейного теплового расширения стали $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$;
- погонный вес кожуха 100 кг/см, футеровки – 423 кг/см.

На рис. 8.32 показано влияние температуры днища на напряженно-деформированное состояние кожуха и днища в зоне их сопряжения. Здесь рассмотрено состояние аппарата, когда одновременно действуют усилия от термического расширения футеровки и от нагрева днища.

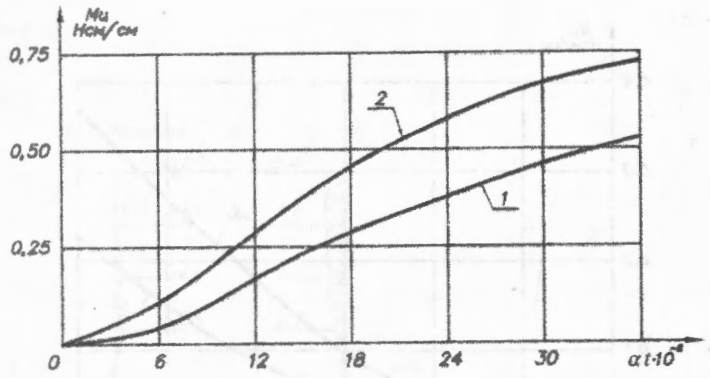


Рис. 8.32. Влияние температуры днища на напряженно-деформированное состояние элементов узла (сечение а-а):
1 – цилиндр; 2 – днище; $M_ц$ – контурный распределенный изгибающий момент в цилиндре в месте сопряжения его с пластиной кожуха; t – температура днища; α – коэффициент линейного расширения

Из графиков видно, что повышение температуры днища увеличивает как действующие усилия, так и перемещения края днища. При этом с ростом температуры днища снижается ее влияние на напряженно-деформированное состояние. Особенно ощутимо влияние нагрева днища в пределах реальных температур– 50–150°С.

Из графика взаимосвязи меридиональных усилий N в кожухе с внутренним давлением газовоздушной среды P (рис. 8.33) видно, что они возрастают по нелинейной зависимости. С повышением этого параметра резко возрастает момент, а, следовательно, и напряжения.

На рис. 8.34 показан характер упругой линии и эпюры распределения изгибающего момента по цилиндру и днищу при холодном днище. Упругая линия имеет точку перегиба на цилиндре и точку перегиба на днище. Максимальная величина изгибающего момента имеет место на днище, и оно является наиболее опасным с точки зрения возможности образования трещин.

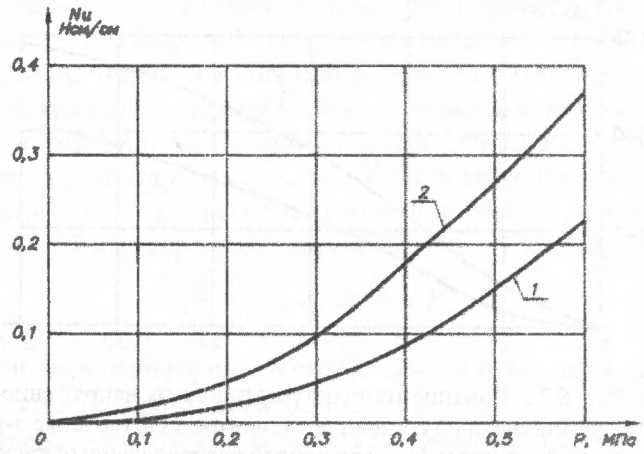


Рис. 8.33. Влияние внутреннего давления на напряженно-деформированное состояние элементов узла (сечение а-а):
1 – цилиндр; 2 – днище; $N_ц$ – контурное распределенное нормальное усилие в цилиндре

При нагреве днища форма упругой линии несколько меняется. На рис. 8.35 показаны упругая линия и эпюры распределения изгибающего момента по цилиндру и днищу при нагреве днища на 50 °С, где видно, что упругая линия имеет точку перегиба на цилиндре и не имеет перегибов на днище.

Графики содержат наглядный пример того, как вследствие этих воздействий упругая линия днища и цилиндра приобретает различные формы, зависящие от того, влияние какого из факторов, действующих совместно, преобладает.

Из этого следует, что упругие линии при действии только меридиональных сил и при совместном действии меридиональных сил с повышенной температурой днища имеют различные формы. Форма эпюры моментов, следовательно, и эпюра напряжений, совпадают с эпюрой при действии только меридиональных сил N. Следовательно, напряженно-деформированное состояние от меридиональных усилий N и нагрева днища суммируются.

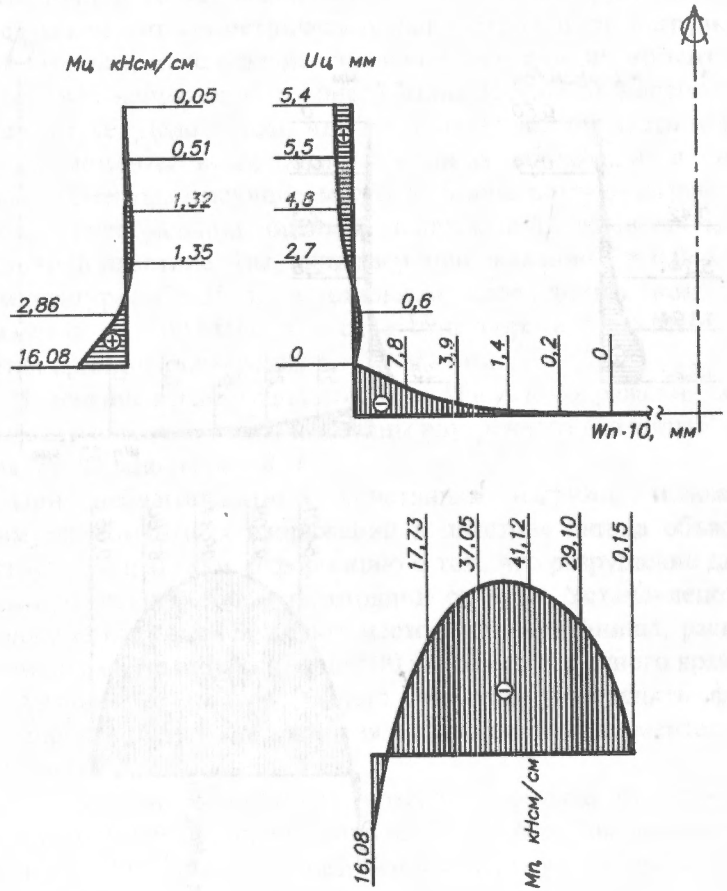


Рис. 8.34. Упругая линия и эпюры распределения изгибающего момента по цилиндру и днищу при холодном днище:
$M_ц$ – контурный распределенный изгибающий момент в цилиндре в месте сопряжения его с пластиной кожуха; $M_п$ – то же в пластине днища; $U_ц$, $W_п$ – приращение радиуса для цилиндра и пластины днища соответственно

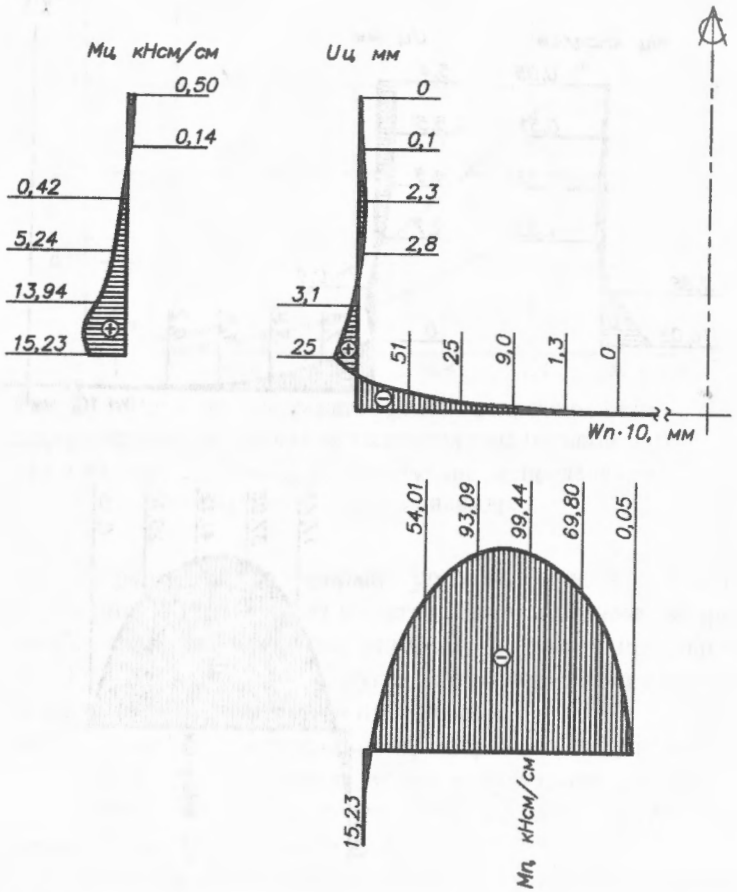


Рис. 8.35. Упругая линия и эпюры распределения изгибающего момента по цилиндру и днищу при нагреве днища на 50 °С:
$M_ц$ – контурный распределенный изгибающий момент в цилиндре в месте сопряжения его с пластиной кожуха; $M_п$ – то же в пластине днища; $U_ц$, $W_п$ – приращение радиуса для цилиндра и пластины днища соответственно

Из рассмотрения эпюры моментов следует, что наибольшего значения моменты достигают не на внешнем диаметре, а в промежуточной точке, положение которой в каждом конкретном случае зависит от геометрических параметров и от нагрузки. С другой стороны, максимальное значение изгибающих моментов не означает, что напряжения в конструкции достигают максимума в этой же точке. Дело в том, что в цилиндрической части кожуха меньшие моменты воспринимаются лишь оболочкой, а значительные моменты, имеющие место в днище воздухонагревателя, являются интегральной оценкой напряжений, возникающих в трехслойной пластине. Так, например, при давлении $P = 0{,}045$ МПа и температуре $T = 75$ °С в стальном слое днища возникают напряжения $\sigma = 200$ МПа, а в слое огнеупора $\sigma = -36$ МПа. При расчетах принята сила трения $N = 3000$ кг/см.

Изменение изгибающих моментов M в узле сопряжения днища с кожухом в зависимости от величины внутреннего давления P и сил трения N показано на рис. 8.36.

При неблагоприятных сочетаниях нагрузок положение максимума моментных напряжений в пластине днища объясняет известную из практики информацию о том, что разрушение днища происходит на некотором расстоянии от края. Установлено, что наибольшие напряжения имеют место в сечении днища, расположенном на расстоянии примерно 500 мм от его наружного края.

Анализ результатов расчета позволил определить форму деформирования и распределения напряжений в элементах узла сопряжения.

На уровень напряжений краевого эффекта существенное значение оказывает распределение нагрузки, передаваемой периферийной стеной на днище. С повышением жесткости опирания части стены, прилегающей к днищу, напряжения краевого эффекта уменьшаются, что может служить направлением по снижению этих напряжений.

Например, известны предложения по устройству кольцевой балки повышенной жесткости под периферийной стеной по всему периметру, что может расширить область применения безанкерных воздухонагревателей.

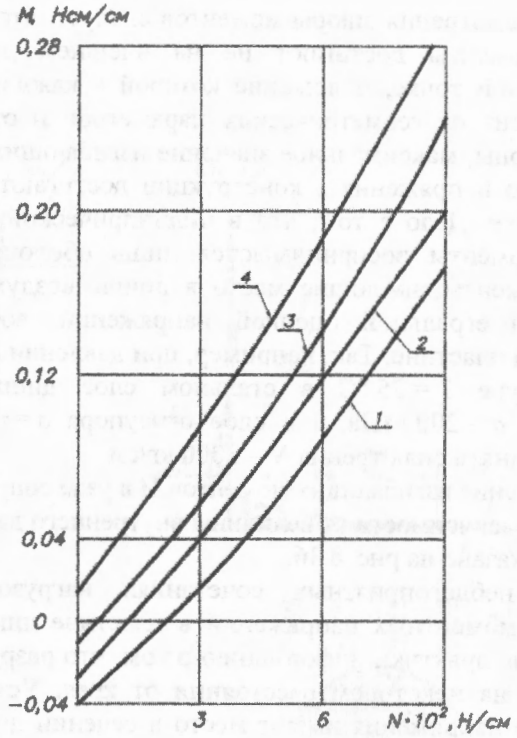


Рис. 8.36. Изменение изгибающих моментов M
в зависимости от внутреннего давления и сил трения:
1, 2, 3, 4 – внутреннее давление P = 0, 0,15, 0,3 и 0,45 МПа
соответственно

Для изучения динамики реального поведения окрайков днища и кожуха в районе узла их сопряжения были проведены натурные исследования днища безанкерного воздухонагревателя в период разогрева и начального периода эксплуатации.

На рис. 8.37 показана дислокация точек измерения величины подъема днища.

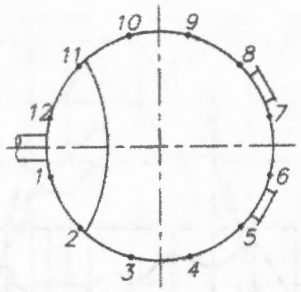


Рис. 8.37. Дислокация точек измерения
подъема днища воздухонагревателя:
1, 2, 3, …, 12 – номера точек расстановки приборов

Замеры подъема края днища над фундаментом в условиях отсутствия анкерных креплений показали, что при испытании воздухонагревателя внутренним избыточным давлением (до его разогрева) образовавшийся зазор не превышал 4 мм. Подъем днища во время разогрева и дальнейшей эксплуатации воздухонагревателя в режиме «нагрев-дутье» нарастал с повышением температуры купола до 1200 °С. При этом, максимальный подъем со стороны камеры горения не превышал 7 мм, а с противоположной стороны по оси воздухонагревателя – 12 мм.

На рис. 8.38 показаны приращения величины подъема окрайков днища от внутреннего давления при испытании воздухонагревателя на прочность. Здесь наблюдается, практически, линейная зависимость величины подъема от величины внутреннего давления. Распределение величины подъема окрайков днища не имеет ярко выраженной закономерности.

Величины подъема окрайков днища при разогреве (рис. 8.39) воздухонагревателя значительно больше, чем при нагрузке внутренним испытательным давлением, и их распределение характерно и соответствует действующей удерживающей нагрузке – со стороны камеры горения величины подъема меньше, чем со стороны камеры насадки.

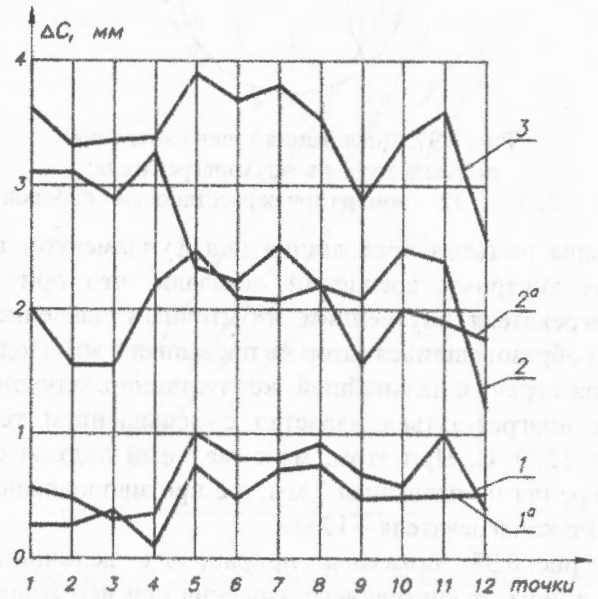


Рис. 8.38. Динамика подъема днища при испытании на прочность:
1, 2, 3 – изменения показаний глубиномера при нагружении давлением 0,2, 0,3 и 0,36 МПа соответственно;
1^a, 2^a – изменение показаний глубинометра при разгрузке

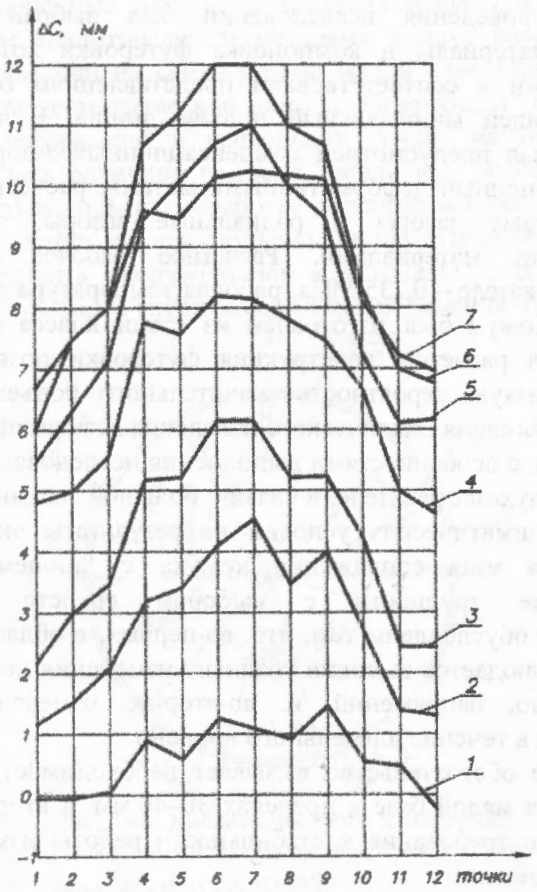


Рис. 8.39. Динамика подъема днища при разогреве и эксплуатации:
1…7 – температура купола 490, 810, 950, 1150, 1100 и 1190 °С соответственно

С целью более глубокого анализа работы узла сопряжения кожуха воздухонагревателя с плоским днищем было проведено экспериментальное исследование его действительной работы. Основной целью исследований было определение детальной картины поля напряжений и деформаций краевого эффекта этого узла без его закрепления к фундаменту и рассмотрение взаимосвязи его работы с нагрузками и воздействиями.

Для проведения исследований был выбран воздухонагреватель, материалы и компоновка футеровки которого были оптимальными и соответствовали представлениям об условиях, обеспечивающей минимальный подъем днища. В частности, в футеровке был предусмотрен компенсационный зазор величиной 52 мм, заполненный деформативными матами, расчетные воздушные кольцевые зазоры и радиальные зазоры, заполненные выгорающими материалами. Расчетное рабочее давление в воздухонагревателе – 0,235 МПа, рабочая температура под куполом – 1300 °С. Кожух был изготовлен из стали класса С345. Такая обоснованная расчетом конструкция футеровки позволяла предположить низкую вероятность значительного подъема днища и решающего влияния циклического появления деформаций.

Наряду с особенностями выполнения исследования на действующем воздухонагревателе, в связи с большой загазованностью и влиянием климатических условий на результаты эксперимента, исследования узла сопряжения кожуха с днищем вызывают определенные трудности с выбором средств измерений. Затруднения обусловлены тем, что, во-первых, в области краевого эффекта наблюдается высокий градиент изменения деформаций и, следовательно, напряжений, и, во-вторых, измерения должны выполняться в течение длительного времени.

Первое обстоятельство вызывает необходимость проводить измерения на малой базе в пределах 30–40 мм, а второе предъявляет высокие требования к стабильности работы измерительных средств во времени.

Учитывая сложность обеспечения указанных условий, известные методы экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния в области краевого эффекта не нашли применения, и была разработана методика для узлов, где основное напряженное состояние определяется изгибом с большим градиентом напряжений.

Методика состояла в определении геометрической формы образующей цилиндрической части кожуха, примыкающей к днищу, и динамики ее в процессе разогрева и последующей эксплуатации.

По изменениям формы образующей и измеренным кольцевым деформациям аналитическими методами в двух сечениях вычислялись деформации на сколь угодно малой базе. Одновременно с определением геометрической формы образующей производились измерения деформаций в нескольких точках на большой базе, устанавливалась величина подъема днища и температура кожуха, которые учитывались при обработке результатов измерений.

Определение высоты подъема днища относительно поверхности фундамента производились в 8 точках по его периметру (рис. 8.40) с помощью глубиномера с ценой деления 0,1 мм.

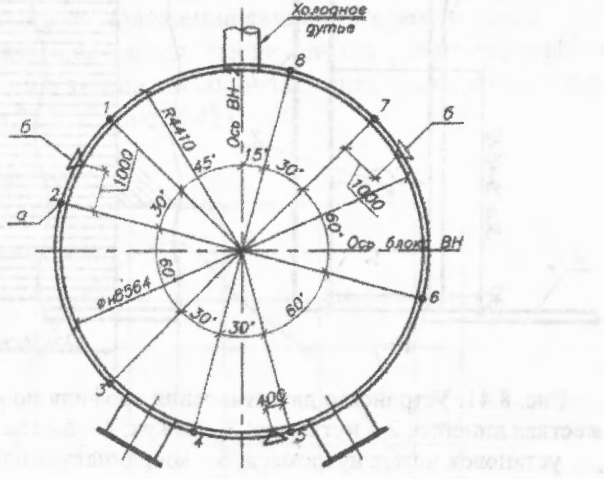


Рис. 8.40. Дислокация точек измерений:
1 – место измерения подъема днища; 2 – место измерения профиля меридиана и деформаций кожуха; 3 – воздухопровод холодного дутья; 4 – дымовые клапаны

Измерения деформаций цилиндрической части кожуха производились в 3 местах по периметру воздухонагревателя механическим компаратором с базой 234 мм, снабженным индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм. В каждом месте измерения определялись деформации в кольцевом направлении в шести уровнях и в меридиональном – в трех уровнях. В точках измерения деформаций проводились замеры температуры кожуха прибором с ценой деления 1 °С, работающим в диапазоне температур от –30 ° до 120 °С .

В местах деформации кожуха проводились также измерения профиля образующей его цилиндрической части. С этой целью было установлено устройство – профилемер (рис. 8.41), состоящий из жесткой линейки (1), прикрепленной верхним концом к кожуху, и нутромера (2).

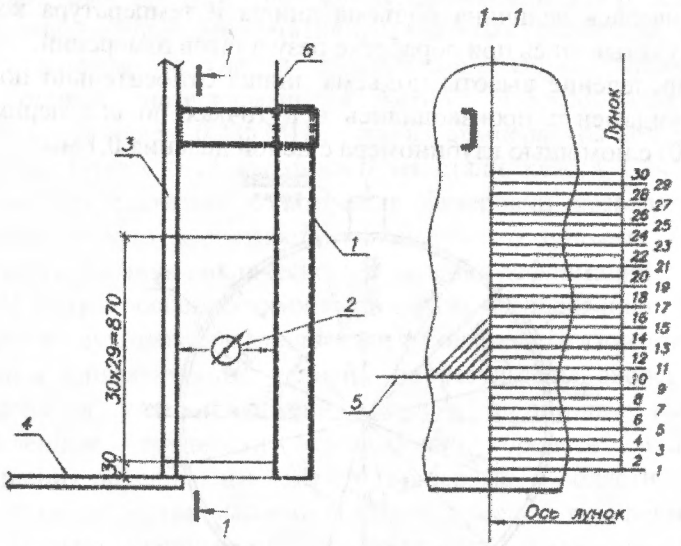


Рис. 8.41. Устройство для измерения профиля меридиана:
1 – жесткая линейка; 2 – нутромер; 3 – кожух; 4 – днище; 5 – лунки для установок ножек нутромера; 6 – координатная плоскость

На кожухе и на линейке было образовано 30 лунок с шагом 30 мм, расположенных вдоль образующей в одной радиальной плоскости воздухонагревателя, которые являются фиксированными точками установки нутромера. Линейка служит координатной плоскостью, от которой фиксируются изменения профиля образующей кожуха.

Экспериментальные исследования позволили проследить за динамикой поведения узла под нагрузкой, изменениями напряженно-деформированного состояния и сделать следующие выводы.

Наибольшая величина подъема к фундаменту днища была зафиксирована во время испытания аппарата на прочность перед началом разогрева.

После окончания испытания на прочность отмечено наличие остаточного подъема днища до 0,2–1,2 мм, причину которого установить трудно, но можно предположить возможное влияние следующих факторов:

– во время испытания на прочность испытательным давлением воздуха произошло проскальзывание кожуха относительно футеровки; при снятии давления силы трения между кожухом и футеровкой препятствовали возвращению кожуха в исходное положение;

– в днище появились пластические деформации, и невозвращение его в исходное положение явилось их результатом.

В последующее время, после начала разогрева наибольшая величина подъема днища наблюдалась при температуре газов под куполом около 750 °С (рис. 8.42).

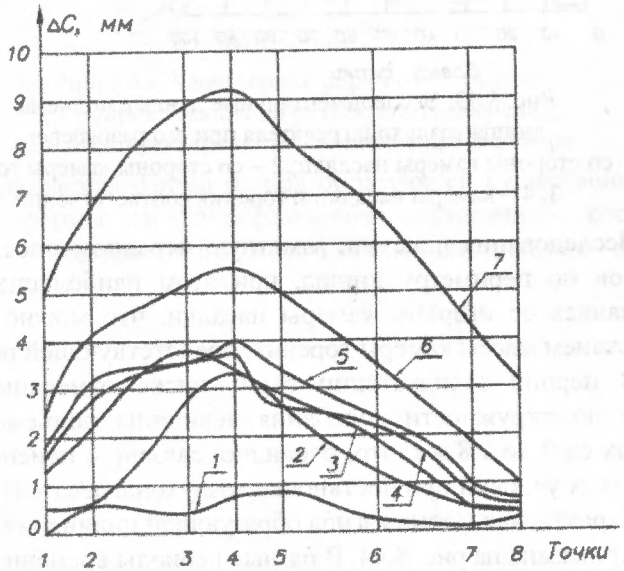


Рис. 8.42. Экспериментальные данные подъема днища воздухонагревателя при разогреве:
1 – начальное положение (в холодном состоянии без давления);
2, 3, 4, 5, 6 – при отсутствии давления и при температуре купола 300, 500, 550, 600 и 650 °С соответственно; 7 – при давлении 0,22 МПа и температуре T = 750 °С

На рис. 8.43 приведены экспериментальные данные по подъему плоского днища воздухонагревателя при его разогреве, полученные при экспериментальных исследованиях других воздухонагревателей [23].

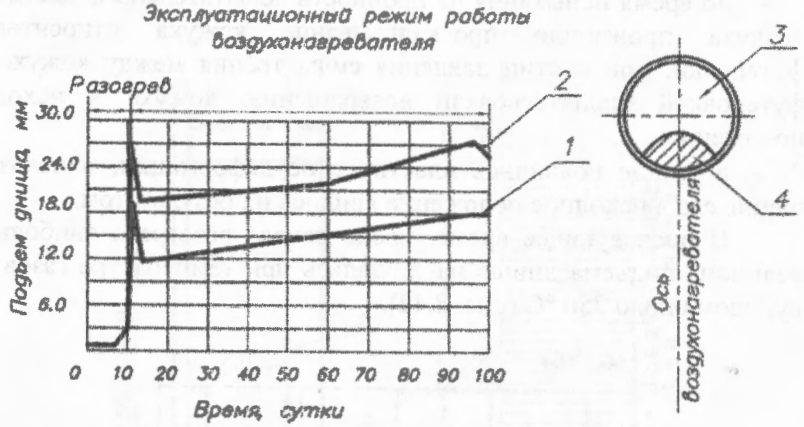


Рис. 8.43. Экспериментальные данные подъема днища воздухонагревателя при его разогреве:
1 – со стороны камеры насадки; 2 – со стороны камеры горения;
3, 4 – камеры насадки и горения соответственно

Исследования показали заметную неравномерность величин подъемов по периметру днища, при этом наибольшие подъемы наблюдались со стороны камеры насадки, что можно объяснить воздействием массы камеры горения, препятствующей подъему.

В период эксплуатации были также отмечены неравномерные по окружности колебания величины подъема днища в пределах от 0 до 1,8 мм, что, очевидно, связано с изменением температурных условий при постановке воздухонагревателя на дутье.

Характерная форма изгиба образующей цилиндрической части кожуха показана на рис. 8.44. В разные периоды времени изменялась величина стрелки изгиба и радиуса кривизны в различных точках, но вогнутая форма кривой с наибольшей величиной стрелки у днища сохранялась в течение всего периода наблюдений.

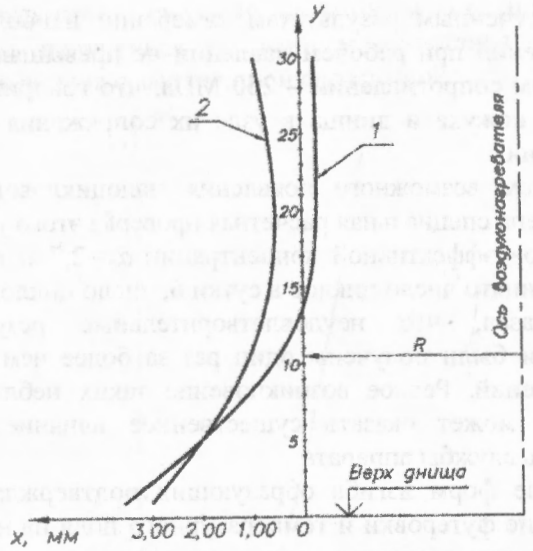


Рис. 8.44. Характерная форма образующей:
1 – аппроксимация по результатам измерений;
2 – по корректировке на смещение профилемера

Наблюдаемая форма изгиба образующей существенно отличается от формы изгиба образующей аналогичного сосуда без футеровки, подверженного воздействию внутреннего давления (рис. 8.45).

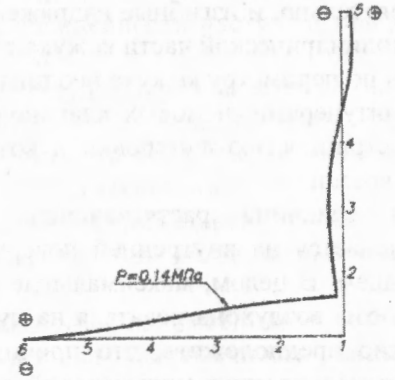


Рис. 8.45. Форма изгиба образующей в зоне краевого эффекта узла сопряжения цилиндра с днищем нефутерованного сосуда при внутреннем давлении

По полученным результатам измерений наибольшая величина напряжений при рабочем давлении не превышала 255 МПа, при расчетном сопротивлении – 260 МПа, что говорит о том, что конструкции кожуха и днища в узле их сопряжения работают в упругой стадии.

С учетом возможного появления малоцикловой усталости была выполнена специальная расчетная проверка этого узла с учетом коэффициентов эффективной концентрации $\alpha_\sigma = 2{,}7$ и $\alpha_\sigma = 3{,}2$. При этом было принято число циклов в сутки 6, число циклов в год 2190. Анализ показал, что неудовлетворительные результаты по долговечности были получены один раз за более чем двухлетний срок наблюдений. Редкое возникновение таких неблагоприятных ситуаций не может оказать существенное влияние на общую долговечность службы аппарата.

Различие форм изгиба образующих подтверждает существенное влияние футеровки и температурного поля на напряженно-деформированное состояние узла сопряжения цилиндрической части кожуха с днищем. Известные методы расчета не дают возможности учесть указанные факторы, и выводы о напряженно-деформированное состоянии рассматриваемой области кожуха могут быть сделаны только на основании экспериментальных данных.

Математическая обработка кривых показала, что наибольшая кривизна, а, следовательно, и изгибные напряжения имеют место в узле соединения цилиндрической части кожуха с днищем.

Деформации по периметру кожуха неодинаковы, наибольшие отмечены между штуцерами дымовых клапанов, что может быть связано с несимметричностью футеровки и возмущениями силового потока от их врезки.

Наибольшая величина растягивающих меридиональных напряжений наблюдается на внутренней поверхности около шва сопряжения с днищем. В целом, максимальные напряжения отмечены в период работы воздухонагревателя на дутье и изменяются во времени. Можно предположить, что причины этого явления связаны с изменением климатических условий, режимов нагрева и состоянием футеровки в зонах локального нагрева кожуха.

Характер влияния величины давления на подъем днища

можно проследить по рис. 8.46, на котором показана усредненная взаимосвязь, полученная по данным испытания на прочность воздухонагревателя с законченной футеровкой.

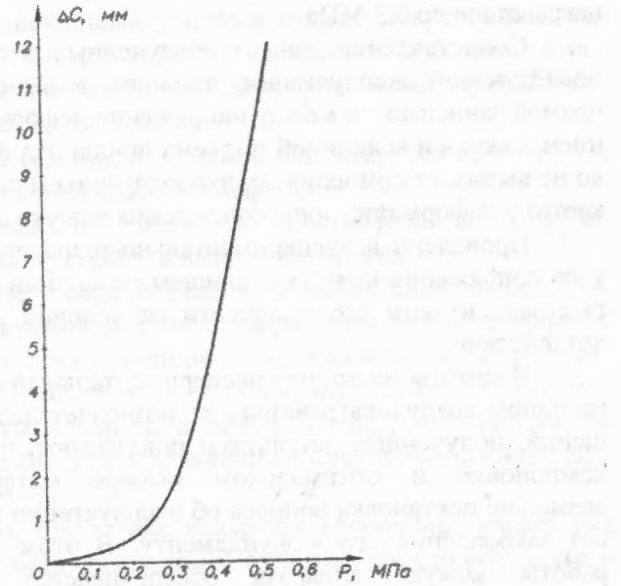


Рис. 8.46. Характер зависимости величины подъема днища от внутреннего давления

Из графика видно, что эта зависимость нелинейная, и резкое возрастание этой нелинейности наступает при давлении воздуха в пределах 0,25–0,3 МПа.

Полученные результаты характеризуют работу воздухонагревателя в указанном выше режиме эксплуатации. При необходимости работы аппарата на более высоких параметрах следует исходить из следующих положений:

– работа узла сопряжения кожуха с днищем должна оставаться в пределах упругости (без учета коэффициента концентрации напряжений);

– редкие повышения напряженного состояния не оказывают заметного влияния на долговечность эксплуатации воздухонагревателя;

– увеличение напряжений пропорционально увеличению давления дутья.

Так, для сохранения работы стали в упругой зоне напряжения не могут превышать расчетного сопротивления стали 260 МПа, что позволяет увеличить давление дутья в рассматриваемом воздухонагревателе до 0,3 МПа.

Сопоставление данных, полученных в период разогрева и последующей эксплуатации, приводит к выводу о том, что нет прямой зависимости между напряженно-деформированным состоянием кожуха и величиной подъема днища над фундаментом. Однако не вызывает сомнения то, что этот подъем оказывает влияние на картину деформаций зоны сопряжения кожуха с днищем.

Проведенные экспериментально-теоретические исследования узла сопряжения кожуха с днищем позволили установить некоторые зависимости его прочности от условий работы, нагрузок и воздействий.

Несмотря на то, что экспериментальный анализ работы узла на одном воздухонагревателе не позволяет делать широких обобщений, полученные результаты показывают, что при правильной компоновке и оптимальном выборе материалов футеровки возможна постановка вопроса об эксплуатации воздухонагревателя без закрепления его к фундаменту. В этом случае надежность работы кожуха аппарата обеспечивается прочностью узла сопряжения цилиндрической части кожуха с плоским днищем в условиях циклических изменений нагрузки с учетом напряжений от краевого эффекта.

Такое решение может быть реализовано, прежде всего, при исключении или минимизации вертикального роста кожуха и, тем самым, изгибающих моментов и напряжений краевого эффекта, определяющих прочность узла сопряжения кожуха с днищем. Для этого необходим тщательный расчетный анализ, подбор конструкции футеровки, рациональное расположение зазоров, применение материалов для компенсационных зазоров надлежащего качества с высокими деформативными и прочностными свойствами.

В результате этих мероприятий массой периферийной футеровки, оборудования и кожуха должна быть уравновешена подъемная сила от внутреннего давления, а незначительное «дыхание» окрайков днища практически должно исключить вероятность повреждения этого узла, связанного с эффектом малоцикловой усталости материала.

Как уже отмечалось, повысить надежность и долговечность узла сопряжения кожуха с плоским днищем безанкерного воздухонагревателя возможно следующими мероприятиями:

– снизить меридиональные усилия в кожухе, допустив возможность подъема окрайков днища с соответственным изгибом этого узла, одновременно минимизируя величину подъема, путем оптимальной компоновки футеровки;

– не допускать воздействия циклических нагрузок на этот узел и, тем самым, напряжения краевого эффекта.

При этих условиях возможна постановка вопроса об исключении анкерных устройств воздухонагревателя.

Поскольку при современных технологических параметрах меридиональные усилия в кожухе и напряжения краевого эффекта в этом узле достаточно велики и приближаются к пределу текучести стали, напряжения малоцикловой усталости в условиях циклической работы аппарата в режимах «нагрев», «дутье» на первом этапе могут быть определяющими в проблеме прочности и долговечности агрегата.

Вместе с тем, отсутствие анкерных креплений создает ряд технологических и организационных проблем при строительстве и пусковых испытаниях агрегата.

Прежде всего, это касается необходимости обеспечения устойчивости пустого (без футеровки) кожуха при воздействии ветрового потока в период монтажа и при сдаточных испытаниях пустого кожуха, предусмотренных действующими нормативными документами.

Отсутствие анкерных креплений делает, по существу, невозможным отдельный независимый монтаж металлоконструкций кожуха и его последующую футеровку из-за необходимости обеспечения устойчивости от опрокидывания пустого кожуха в ветровом потоке. Монтаж кожуха с одновременной кладкой футеровки обеспечивает эту устойчивость, но требует изменения технологии производства работ, проведения испытаний и, кроме того, нарушает общепринятые правила охраны труда.

При всем многообразии конструктивных решений узлов сопряжения днища с кожухом наиболее полно возможности реализации этих условий удовлетворяет форма узла в виде

плоского днища, сопряженного с нижним поясом оболочки кожуха.

Другие известные формы этого узла не нашли широкого применения. Причина, очевидно, состоит в том, что исключение (или значительное снижение) деформации узла и, тем самым, усилий краевого эффекта не приводит к снижению меридиональных усилий в кожухе, и напряжения от них могут превышать предел текучести.

В этих условиях, ввиду трудностей, связанных со строительством воздухонагревателей без анкерных закреплений, а также возможной опасности возникновения малоцикловой усталости в узле сопряжения кожуха с днищем наибольшее распространение нашел воздухонагреватель с плоским днищем, свободным для деформаций окрайков при разогреве аппарата и с анкерным креплением его к фундаменту при подаче дутья, исключающим знакопеременные деформации при циклической смене нагрузок.

Такая задача со взаимоисключающими, на первый взгляд, условиями решена путем поэтапного закрепления узла сопряжения плоского днища с кожухом к фундаменту анкерными устройствами, что позволило разделить работу этого узла на два этапа:

– на первом этапе при разогреве допускается подъем окрайков днища, чем снижаются меридиональные усилия в кожухе;

– на втором этапе, перед подачей дутья и началом циклических воздействий, деформированный узел закрепляется к фундаменту, чем исключаются его знакопеременные деформации при циклической смене нагрузок.

Анкера устанавливаются в период строительства и закрепляются по специальной технологии, обеспечивающей, во-первых, устойчивость воздухонагревателя на всех этапах строительства и испытания и, во-вторых, препятствующей знакопеременным деформациям узла при циклических изменениях режимов работы.

Анкерные устройства имеют определенное назначение на различных этапах создания и работы кожухов.

I этап. Строительство и испытание кожуха на плотность до футеровки.

Анкера играют роль временных креплений и воспринимают усилия от разности давления на купол и днище при испытании пустого кожуха на плотность давлением, равным 70 кПа, а также

опрокидывающий ветровой момент.

II этап. Испытание на прочность с футеровкой.

Сохраняется временное закрепление анкеров, воспринимающих неуравновешенную подъемную силу от внутреннего испытательного давления воздуха, равного 1,25 величины рабочего давления, и опрокидывающий ветровой момент.

III этап. Разогрев для пуска в эксплуатацию.

Перед разогревом анкерные закрепления удаляются, чем обеспечивается свобода деформации узла и возможный подъем окрайков днища при разогреве. При образовании зазоров между днищем и фундаментом они заполняются быстротвердеющим раствором.

IV этап. Подача дутья в разогретый воздухонагреватель.

После разогрева воздухонагревателя, возможного полного подъема окрайков днища и заполнения зазоров между днищем и фундаментом, перед подачей дутья анкерные устройства превращаются в постоянные крепления, удерживающие кожух и не допускающие деформации узла его сопряжения с днищем вследствие смены технологических режимов «нагрев-дутье» и, тем самым, исключающие эффект малоцикловой усталости материала.

При расчете анкерных устройств 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.

Усилия от температурного роста футеровки на анкерные устройства передаваться не должны, так как подъем окрайков днища и деформации узла произошли до постоянного закрепления анкеров.

Первые применявшиеся анкера были круглыми, болтовыми, удерживающими кожух с помощью опорных столиков, прикрепляемых к кожуху. Болтовое соединение имело преимущество в том, что оно легко отсоединялось на период остановки и остывания аппарата.

Рост технологических параметров (повышение рабочего давления и температуры) вызывал в ряде случаев разрушение анкеров, деформирование опорных столиков, появление в них трещин,

переходящих на кожух. При дальнейшем повышении параметров и увеличении размеров воздухонагревателя несущая способность круглых анкеров оказалась недостаточной, и были разработаны конструктивные решения с применением листовых анкеров.

При строительстве на новых фундаментах анкерное устройство (рис. 8.47) решается в виде полосы (1), закладываемой в массив фундамента (2), выступающей над ним на 600–700 мм и отстающей от кожуха (3) на толщину прокладки (4). Над прокладкой (4) устанавливается прокладка (5), толщина которой равна суммарно толщине прокладки (4) и толщине анкерной полосы (1).

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

– после монтажа одного-двух первых поясов кожуха наружный лист (6) анкерного устройства, играющий роль временного закрепления, приваривается к полосе (1), заложенной в фундамент, и к прокладке (5) на кожухе (3);

– после окончания монтажа проводится испытание кожуха на плотность внутренним давлением 70 кПа;

– выполняется футеровка воздухонагревателя;

– производится испытание воздухонагревателя давлением воздуха, равным 1,25 величины рабочего внутреннего давления;

– по окончании испытания лист (6) разрезается с принятием мер, предохраняющих кожух от механических повреждений;

– производится разогрев воздухонагревателя (без внутреннего давления);

– при возможном подъеме периферийной части днища после разогрева воздухонагревателя образовавшийся зазор между днищем и фундаментом заполняют быстротвердеющим раствором;

– после окончания разогрева, перед подачей дутья полоса (1), заложенная в фундамент и играющая роль постоянного анкера, приваривается к накладке (4) на кожухе (3).

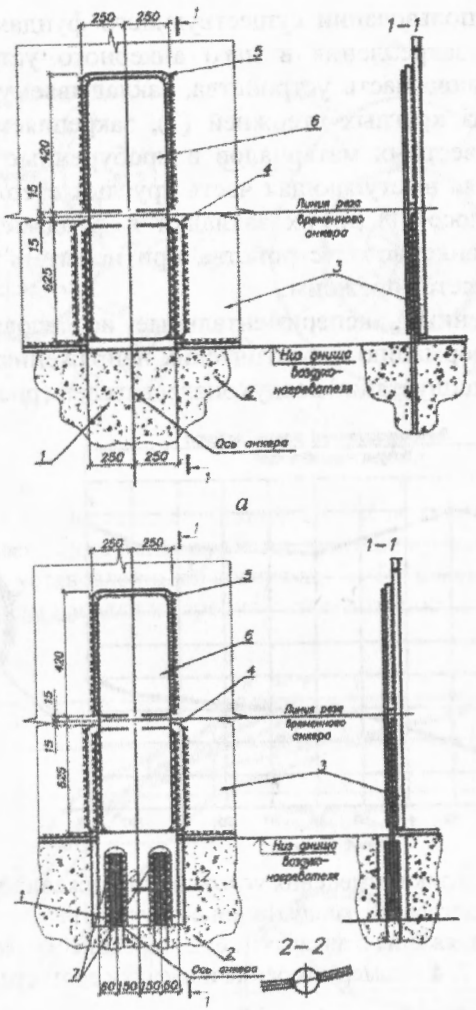


Рис. 8.47. Анкерное устройство:
а – на новом фундаменте; *б* – на существующем фундаменте; 1 – полоса, закладываемая в фундамент (постоянный анкер); 2 – фундамент; 3 – нижний пояс кожуха; 4, 5 – нижняя и верхняя накладки соответственно; 6 – временная анкерная полоса; 7 – анкерные болты, закрепляемые в фундамент

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 (7), закрепляемых с помощью одного из известных материалов в пробуренные отверстия (рис. 8.47*б*). Верхняя выступающая часть круглых стержней крепится к анкерной полосе (1) до их закладки в фундамент, и механизм закрепления анкерного устройства при испытании воздухонагревателя сохраняется прежним.

Проведенные экспериментальные исследования позволили получить информацию о фактических напряжениях в анкерах при разогреве и эксплуатации воздухонагревателей (рис. 8.48) [23].

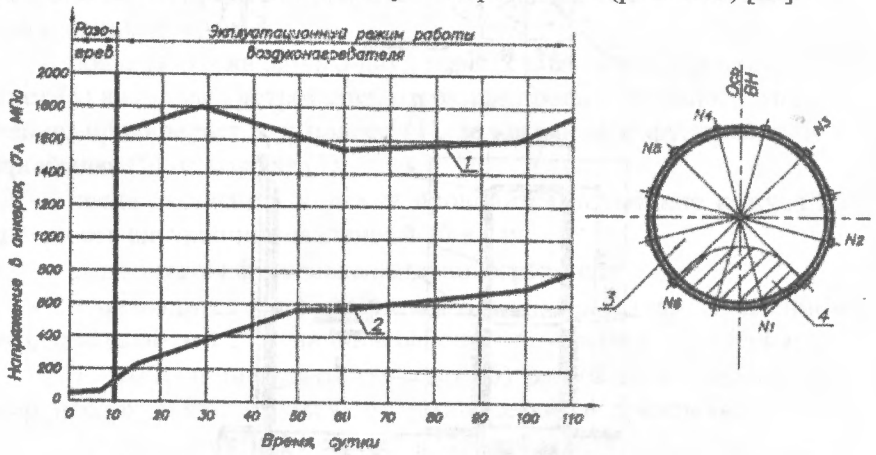
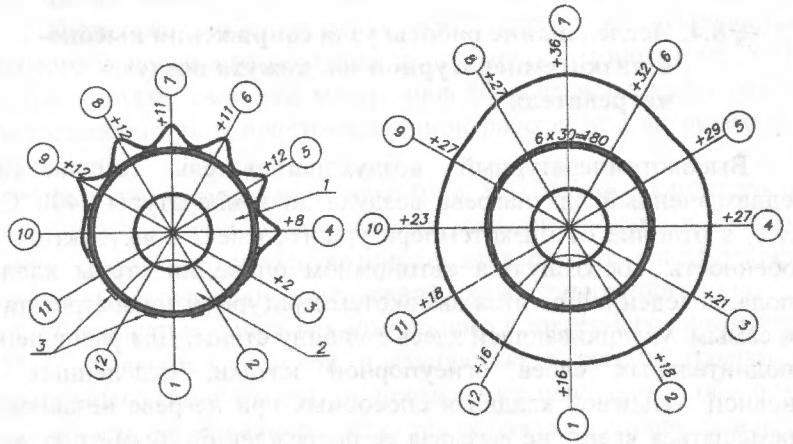


Рис. 8.48. Графики изменения условных напряжений в анкерах при разогреве и эксплуатации воздухонагревателей:
1 – средние напряжения в анкерах 1, 6; 2 – средние напряжения в анкерах 2…5; 3, 4 – камеры горения и насадки соответственно

На рис. 8.49 приведены экспериментальные данные по фактической величине максимального подъема днища воздухонагревателя при закрепленном и незакрепленном воздухонагревателе, на рис 8.50 показана зависимость величины напряжений в анкерах от давления дутья.



а *б*

Рис. 8.49. Экспериментальные данные по величине максимального подъема днища воздухонагревателя:
а – с установленными анкерами; *б* – без анкеров;
1, 2 – камеры насадки и горения соответственно; 3 – анкеры

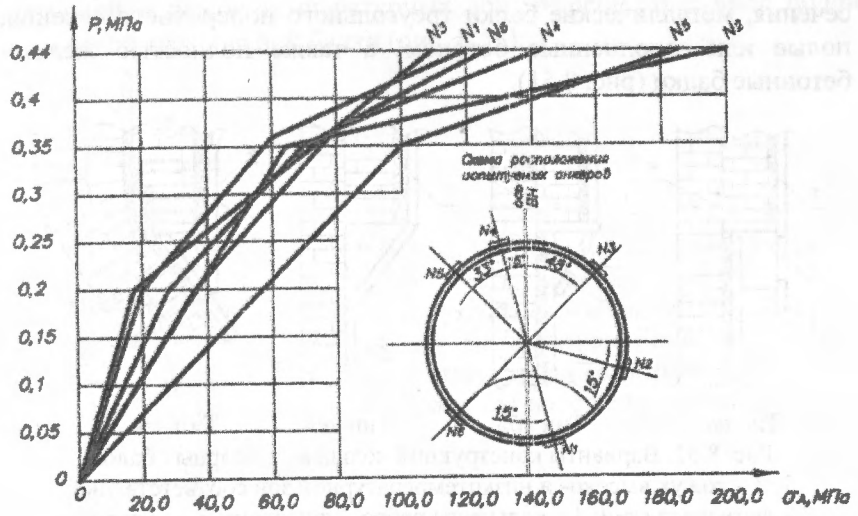


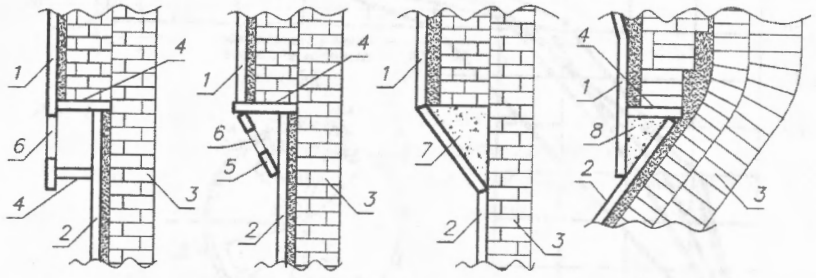
Рис. 8.50. Зависимость величины напряжений в анкерах от давления дутья

§ 8.4. Исследование работы узла сопряжения высоко- и низкотемпературной зон кожуха воздухонагревателя

Высокотемпературный воздухонагреватель (см. рис. 1.6), предназначенный для нагрева воздуха до температуры 1400 °С и более, в отличие от низкотемпературного, имеет конструктивную особенность, состоящую в автономном опирании стены кладки купола, доведенной до низа высокотемпературной зоны агрегата и, тем самым, увеличивающей здесь толщину стены. Для размещения дополнительных слоев огнеупорной кладки, отделенных от основной кольцевой кладки и способных при нагреве независимо перемещаться вверх, не вызывая ее повреждений, диаметр кожуха делают в верхней части, соответственно, большим, чем в нижней.

Узел сопряжения оболочек кожухов разных диаметров решается с помощью переходной кольцевой балки, которая может иметь различные конструктивные формы.

Известны балки коробчатого прямоугольного поперечного сечения, металлические балки треугольного поперечного сечения, полые или заполненные бетоном, а также полностью железобетонные балки (рис. 8.51).



Тип «*а*» Тип «*б*» Тип «*в*» Тип «*г*»

Рис. 8.51. Варианты конструкций кольцевых опорных балок:
1, 2 – кожух высоко- и низкотемпературной зон соответственно;
3 – футеровка стен; 4 – кольцевое ребро – шпангоут; 5 – наклонный кольцевой элемент; 6 – отверстия для вентиляции; 7 – железобетонная кольцевая балка; 8 – жаропрочный бетон

Балки каждого типа имеют свои особенности.

В сталежелезобетонных балках – металлических балках треугольного поперечного сечения, заполненных бетоном (рис. 8.51*а*), разные упругие свойства материалов (бетона и металла) создают неопределенность в пространственной работе, чем затрудняют их применение

В полой треугольной балке (рис. 8.51*б*) примыкание наклонного листа к кожуху в направлении поперек проката, в Z-направлении, создает опасность возникновения расслоя листа металла, что при высоком уровне напряжений снижает прочность узла.

Коробчатые балки прямоугольного поперечного сечения (рис. 8.51*в*) отличаются высокой надежностью в работе, однако они весьма многодельны, и при их применении необходимо обеспечить возможность естественного охлаждения кожуха в районе балки.

Поэтому, выбор типа балки индивидуален и связан с общей компоновкой конструкции.

Представляют интерес результаты экспериментального анализа напряженно-деформированного состояния достаточно простого узла сопряжения цилиндрических частей кожухов низкотемпературной и высокотемпературных зон, решенного в виде полой кольцевой треугольной балки (рис. 8.52).

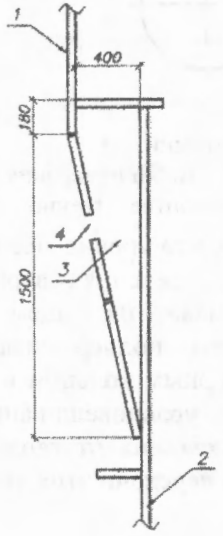


Рис. 8.52. Конструктивная схема кожуха воздухонагревателя:
1, 2 – кожухи высоко- и низкотемпературной зоны соответственно;
3 – треугольная кольцевая балка;
4 – проем для естественной вентиляции

На рис. 8.53 показана дислокация мест контроля напряженно-деформированного состояния этого района кожуха воздухонагревателя.

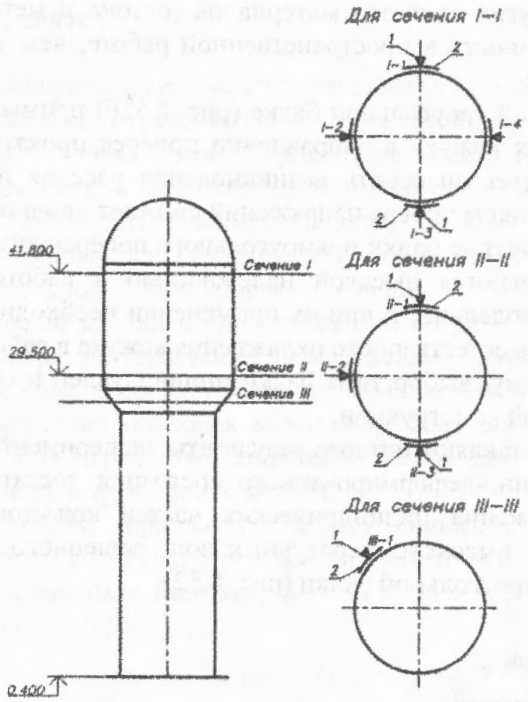


Рис. 8.53. Дислокация точек измерений:
а – по высоте; *б* – в кольцевом сечении; 1, 2 – точки измерения кольцевых и меридиональных деформаций соответственно

Из графиков рис. 8.54, 8.55, 8.56 видно, что уровни меридиональных напряжений в верхнем и нижнем сечениях верхнего цилиндра близки между собой. Это указывает на защемление кладки наружного огнеупорного оката стен, поддерживающих кладку купола между кожухом купола и опорным кольцом в узле сопряжения. Такое защемление приводит к уравновешиванию в пределах верхнего цилиндра усилий, возникающих от теплового расширения этого оката стен, и исключению передачи этих усилий на треугольную кольцевую балку.

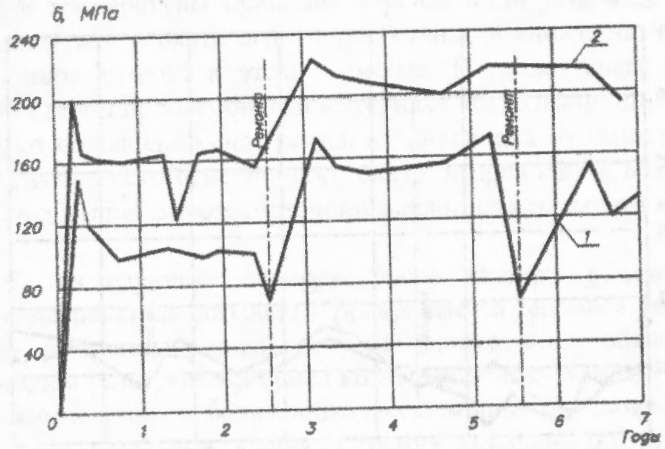


Рис. 8.54. Максимальные напряжения (МПа) в сечении I кожуха воздухонагревателя (точка I-4):
1 – в режиме «нагрев», 2 – в режиме «дутье»

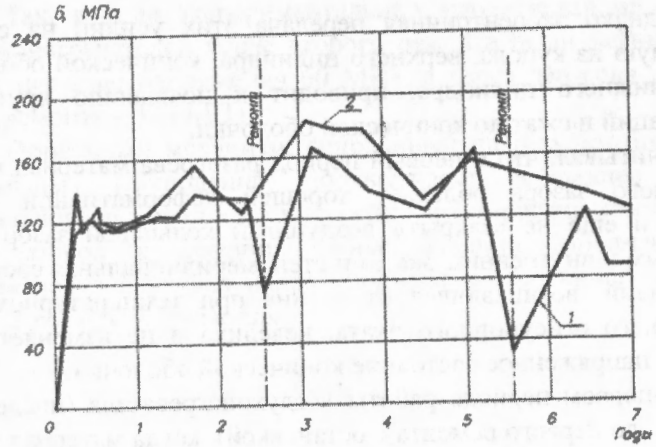


Рис. 8.55. Максимальные напряжения (МПа) в сечении II кожуха воздухонагревателя (точка II-2):
1 – в режиме «нагрев», 2 – в режиме «дутье»

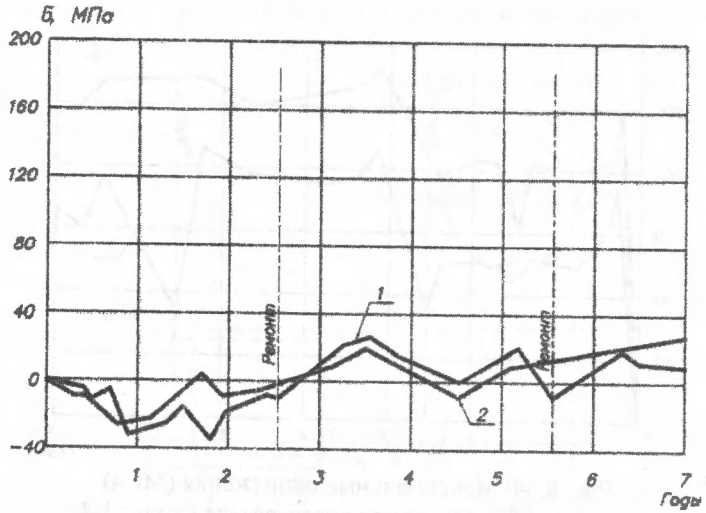


Рис. 8.56. Максимальные напряжения (МПа)
в сечении III кожуха воздухонагревателя (точка III-1):
1 – в режиме «нагрев», 2 – в режиме «дутье»

Однако эксцентричная передача этих усилий на систему, состоящую из купола, верхнего цилиндра, конической оболочки и части нижнего цилиндра, приводит к появлению крутильных деформаций и сжатию конической оболочки.

Учитывая, что в первый период разогрева материал компенсационного зазора обладает хорошей деформативной способностью и еще не «закрыт» воздушный кольцевой зазор между наружным и внутренним окатами стен, меридиональная составляющая усилий, возникающая от трения при температурном росте внутреннего огнеупорного оката, невелика и не изменяет состоявшееся напряженное состояние конической оболочки.

В первом периоде работы воздухонагревателя (после строительства, до первого ремонта с остановкой), когда материал компенсационного зазора обладает хорошей деформативной способностью и в состоянии компенсировать радиальное тепловое расширение огнеупоров, в конической оболочке имеют место сжимающие напряжения.

Длительное воздействие сжимающих усилий в условиях высокой температуры приводит к релаксации усилий, действующих в наружном окате огнеупоров стены, и снижению величины сжимающих усилий в этом элементе. В дальнейшем снижение деформационной способности материала компенсационного зазора вызывает повышение сил трения, возникающих от температурного роста внутреннего огнеупорного оката, и приводит к возрастанию их роли в напряженном состоянии наклонного элемента кольцевой балки.

В последующие периоды после каждого ремонта, когда воздухонагреватель остывает и прекращается тепловое расширение кожуха, компенсационный зазор становится менее обжатым. При следующем разогреве материал компенсационного зазора несколько хуже компенсирует радиальные деформации футеровки, возрастают меридиональные усилия от трения, вызванного вертикальным ростом внутреннего оката огнеупоров, и в конической оболочке уже после первого ремонта могут возникнуть растягивающие напряжения. С каждым последующим периодом растяжение этой оболочки может увеличиваться.

Так, в ходе экспериментальных наблюдений на одном из воздухонагревателей после второго ремонта были зафиксированы растягивающие напряжения 60 МПа, а через два года после третьего ремонта – 123 МПа.

Описанный механизм, основанный на результатах экспериментальных наблюдений, подтверждает решающее значение правильного выбора геометрических характеристик компенсационных зазоров и деформационных свойств заполняющих их материалов для уровня напряженно-деформированного состояния кожуха воздухонагревателя.

Глава 9 ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОЖУХА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

§ 9.1. Основные принципы дислокации средств измерений

Принимая во внимание большую поверхность кожуха печи и дискретное расположение приборов, измеряющих деформации кожуха, весьма важной оказывается проблема их рациональной дислокации, позволяющей достаточно достоверно судить об общем напряженно-деформированном состоянии кожуха.

На кожух доменной печи одновременно действует большое количество нагрузок, и в процессе эксплуатации возникают непрогнозируемые случаи резкого локального повышения давления, температуры, массы шихтовых материалов и жидких продуктов плавки из-за изменения или нарушений технологического процесса. Эти факторы затрудняют учет нагрузок при анализе напряженно-деформированного состояния конструкций.

Особенность учета нагрузок состоит еще и в том, что кожух доменной печи конструктивно связан со смежными сооружениями, и все они работают совместно, имея неодинаковую жесткость, режим работы и т. п. Кроме того, анализ напряженно-деформированного состояния кожуха затруднен неравномерным распределением нагрузок и воздействий от футеровки, холодильников и прочего как в кольцевом, так и в меридиональном направлении.

Все эти факторы вызывают различного рода локальные возмущения напряженного состояния, места которых, как и величины, прогнозировать не представляется возможным.

В связи с этим, расчетное напряженное состояние кожуха рассматривается только в идеализированном виде, в качестве критерия надежности которого принимается максимальный уровень приведенных или кольцевых напряжений в контролируемой точке.

Проблема определения фактических напряжений в кожухе печи, которые могли бы свидетельствовать об общем уровне надежности, также усугубляется, как отмечено, чрезмерно большой анализируемой поверхностью кожуха. Оценить уровень напряжений отдельно в каждой точке такой поверхности кожуха не представляется реальным. Здесь возможна установка измерительных приборов только дискретно, с определенными интервалами.

Поэтому, как и при расчетной оценке, фактический уровень напряженно-деформированного состояния может быть оценен с той же степенью идеализации по максимальным значениям напряжений, зафиксированных в дискретных точках. Величина этих напряжений при нормальной работе печи может служить критерием общей оценки надежности ее кожуха.

В связи с этим, при оценке напряженного состояния кожуха печи важно определить репрезентативные участки кожуха, состояние которых в наибольшей степени определяет общую прочность кожуха на рассматриваемом этапе.

Известно [4], что одним из основных критериев оценки состояния кожуха и продолжительности кампании доменной печи является состояние кожуха металлоприемника, рабочая поверхность футеровки которого подвергается воздействию следующих факторов и кожуха лещади в зоне возможной ямы разгара:

– термические напряжения, обусловленные резкими перепадами температур в кладке;

– проникновение чугуна в кладку печи и эрозия ее потоком агрессивных жидких продуктов плавки;

– проникновение в футеровку доменной печи щелочей, цинка и других агрессивных включений;

– использование недостаточно совершенной техники выпуска продуктов плавки;

– работа доменной печи с использованием материалов, не отвечающих требованиям доменной плавки.

Ранее выполненные исследования и опыт эксплуатации доменных печей также показали, что с точки зрения условий работы, изменчивости конструктивной формы и нестабильности действующих нагрузок наиболее неформализованным и опасным районом является зона лещади доменной печи. Определяющее значение прочности этого участка кожуха печи в общей проблеме прочности кожуха подтверждается результатами контроля напряженно-деформированного состояния и при задувках доменных печей, после капитальных ремонтов, при которых из пространства разгара лещади остановленной на ремонт печи не был выпущен расплавленный чугун.

В связи с этим, в большинстве случаев именно для этого участка, где температура внутри печи максимальная и где, собственно, реализуется технологический процесс получения чугуна, характерно проведение работ по оценке напряженно-деформированного состояния кожуха.

Таким образом, выбор этих зон в качестве репрезентативных, являющихся критериальными для оценки уровня напряженно-деформированного состояния кожуха печи, основан на информации о возникающих здесь наибольших усилиях.

Полученные дискретные величины измеренных напряжений обычно являются основой для выявления экстремальных напряжений и оценки общего уровня напряженно-деформированного состояния кожуха печи.

Напряжения в точках кожуха печи, расположенных между датчиками, могут отличаться и даже, в отдельных случаях, превышать измеренные напряжения, что, как отмечено, может быть связано с неравномерным распределением нагрузок и воздействий, а также возможными концентраторами напряжений. Однако тенденция роста напряжений будет зафиксирована, что привлечет внимание персонала и будет сигналом для принятия управляющих мер.

Дислокация измерительных приборов и размещение точек измерений на кожухе металлоприемника производится с учетом наличия свободных от установленного оборудования мест. Точки измерений, как правило, равномерно располагаются по сечению кожуха с учетом положения выводных труб и элементов крепления холодильников, в связи с чем некоторые точки могут быть смещены относительно равномерного проектного положения.

По высоте лещади обычно устраивается 3–4 уровня (зоны) расположения точек измерений, при возможности, увязанных с имеющимися в этом районе на печи площадками для доступа к приборам. В каждом уровне устанавливается принятое количество датчиков измерений деформаций. Как правило, принимается по 8–12 датчиков измерения кольцевых и 8–12 – меридиональных деформаций. Возможна также установка всего 8–12 двухкоординатных тензометрических устройств.

§ 9.2. Анализ напряженно-деформированного состояния кожуха доменной печи при вводе ее в эксплуатацию после строительства или после капитального ремонта I разряда

За время эксплуатации (с 1975 г.) на крупнейшей доменной печи № 9 объемом 5000 м^3 предприятия ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (бывший металлургический комбинат «Криворожсталь», Украина) дважды выполнялся капитальный ремонт I разряда – в 1989 и 2004 годах.

Ввод печи в эксплуатацию после каждого ремонта проводился с организацией контроля напряженно-деформированного состояния кожуха.

В 1989 г. такой контроль был осуществлен на кожухе лещади этой печи, комбинированной конструкции, выполненной из высокоглиноземистого кирпича, а по периферии и снизу – из углеродистых и глиноземистых блоков, с охлаждением снизу воздухом (рис. 9.1).

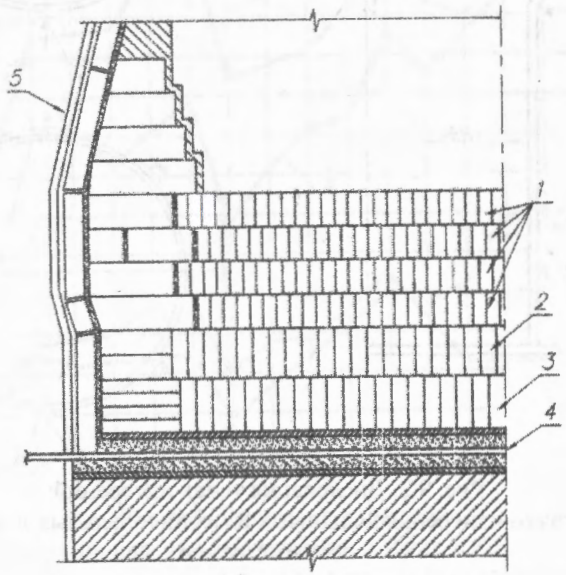


Рис. 9.1. Конструкция лещади:
1 – муллитовые изделия; 2 – углеродистые блоки; 3 – графитированные блоки; 4 – воздушное охлаждение; 5 – кожух

Контроль был проведен с помощью двухкоординатных тензометрических устройств, размещенных в двух уровнях, положение которых во многом определялось наличием площадок, пригодных для выполнения измерительных работ. Показания приборов фиксировались визуально специальным персоналом.

В сечении первого уровня были выбраны восемь точек измерений, второго – девять (рис. 9.2).

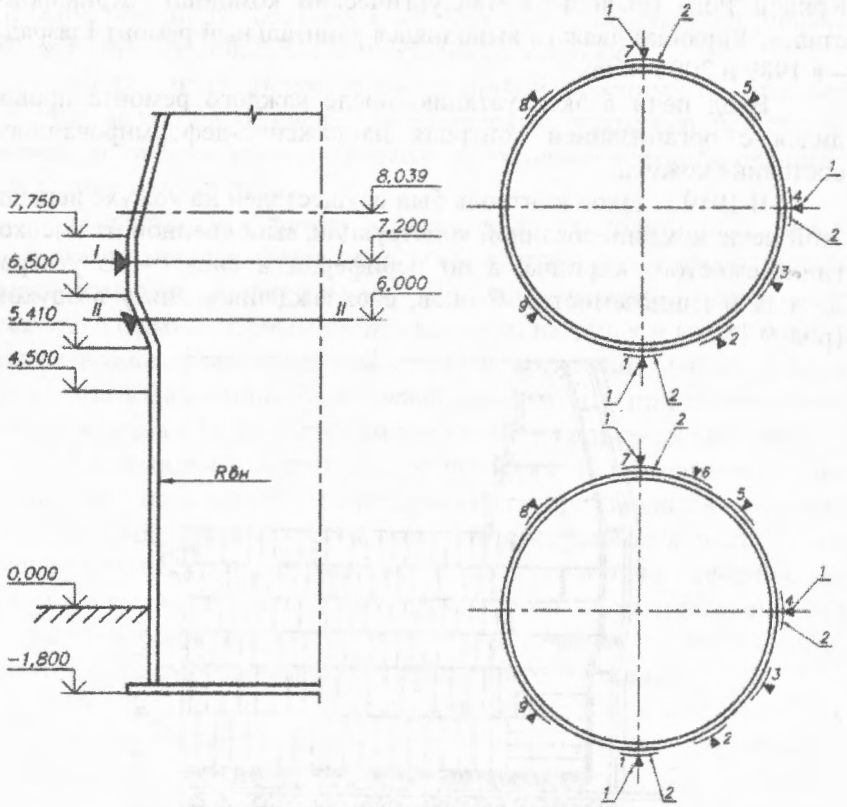


Рис. 9.2. Дислокация точек измерений:
1, 2 – точки измерения кольцевых и меридиональных деформаций соответственно

Контроль напряжений проводился в кольцевом и меридиональном направлениях, т. е. в направлениях главных напряжений. В качестве «нулевых» были приняты напряжения, зафиксированные

показаниями приборов на остановленной и остывшей печи, когда в кожухе имели место только напряжения от собственного веса. Измерения деформаций начались одновременно с задувкой печи.

При анализе результатов измерений учитывалось, что установленные тензометрические приборы реагируют только на механические деформации кожуха, т. к. тепловые деформации кожуха компенсировались соответствующей тепловой деформацией тензоприбора.

На рис. 9.3 показана динамика изменения кольцевых и меридиональных напряжений, определенных по измеренным деформациям, с учетом двухосного напряженного состояния на протяжении контролируемого периода.

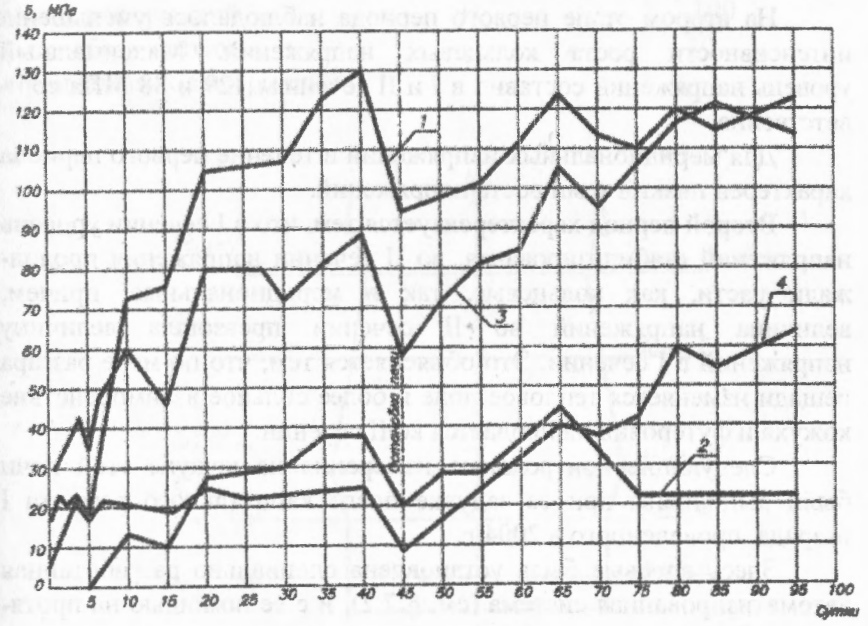


Рис. 9.3. Динамика кольцевых
и меридиональных напряжений в зонах 1 и 2:
1, 2 – кольцевые напряжения в зонах 1 и 2 соответственно;
3, 4 – меридиональные напряжения в зонах 1 и 2 соответственно

Результаты исследования позволили установить наличие периодов с разным характером работы кожуха.

Первый период продолжительностью около 3-х месяцев, в свою очередь, состоит из двух этапов.

Первый этап длительностью около месяца характеризуется большой интенсивностью роста кольцевых напряжений в обоих сечениях.

Во втором этапе наблюдались отдельные моменты падения напряжений с последующим их повышением. Интенсивность повышения напряжений на этом этапе во II сечении отстает от скорости роста напряжений в I сечении. Это может быть объяснено более высокой температурой футеровки в I сечении, а, значит, и более сильным ее взаимодействием с кожухом.

На втором этапе первого периода наблюдалось уменьшение интенсивности роста кольцевых напряжений. Максимальный уровень напряжений составил в I и II сечениях 129 и 88 МПа соответственно.

Для меридиональных напряжений в течение первого периода характерен низкий темп роста напряжений.

Второй период характереизуется тем, что в I сечении уровень напряжений стабилизировался, во II сечении напряжения продолжали расти, как кольцевые, так и меридиональные, причем, величина напряжений во II сечении превзошла величину напряжений в I сечении. Это объясняется тем, что по мере разгара лещади изменяется тепловое поле и более сильное взаимодействие кожуха и футеровки наблюдается во II сечении.

Следующие контрольные измерения на кожухе этой печи были выполнены при ее задувке после капитального ремонта I разряда, проведенного в 2004 г.

Здесь впервые была установлена специально разработанная автоматизированная система (см. § 7.2), и с ее помощью на протяжении более пяти лет осуществлялся мониторинг напряженно-деформированного состояния кожуха печи.

В качестве репрезентативных участков кожуха печи, определяющих максимальные напряжения, были также приняты районы металлоприемника, который, как отмечалось, является

наиболее напряженным и неформализованным, с точки зрения нагрузок и воздействий, участком кожуха печи, и верхний участок лещади, где со временем появляется яма разгара.

Всего было принято пять зон контроля, где были установлены следующие приборы (рис. 9.4).

	Зоны контроля	Ориентировочные отметки, м
Преобразователи линейных кольцевых и меридиональных деформаций	А	3,950
	Б	6,100
	Г	9,400
	Д	13,000
Преобразователи линейных кольцевых и меридиональных деформаций, преобразователи радиальных деформаций	В	7,100

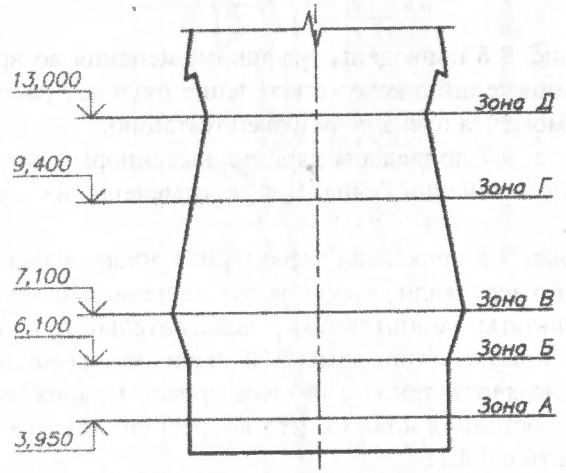


Рис. 9.4. Схема расположения зон контроля

Схема расположения приборов в каждой зоне контроля изображена на рис. 9.5.

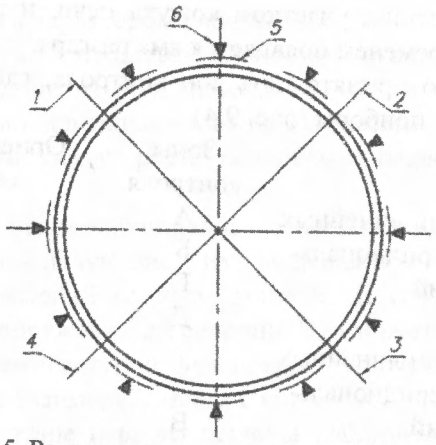


Рис. 9.5. Расположение датчиков в зонах контроля:
1, 2, 3, 4 – летки № 1, 2, 3 и 4 соответственно;
5, 6 – датчики измерения кольцевых и меридиональных деформаций соответственно

На рис. 9.6 приведены графики изменения во времени измеренных напряжений в кожухе в течение пяти лет работы системы, начиная с момента пуска печи в эксплуатацию.

На рис. 9.7 приведены характерные эпюры напряжений в горизонтальном сечении зоны Б, где отмечены их максимальные значения.

На рис. 9.8 приведена характерная эпюра максимальных напряжений по вертикали кожуха за тот же период наблюдений.

Результаты мониторинга действительного напряженного состояния кожуха этой доменной печи за время эксплуатации позволили выявить этапы с разным уровнем напряжено-деформированного состояния кожуха, что корреспондируется с выводами, отмеченными в § 4.1.

Первый этап, продолжительностью около 20 суток после задувки, характеризуется большой интенсивностью повышения до уровня 40–50 МПа напряжений во всех зонах контроля кожуха печи.

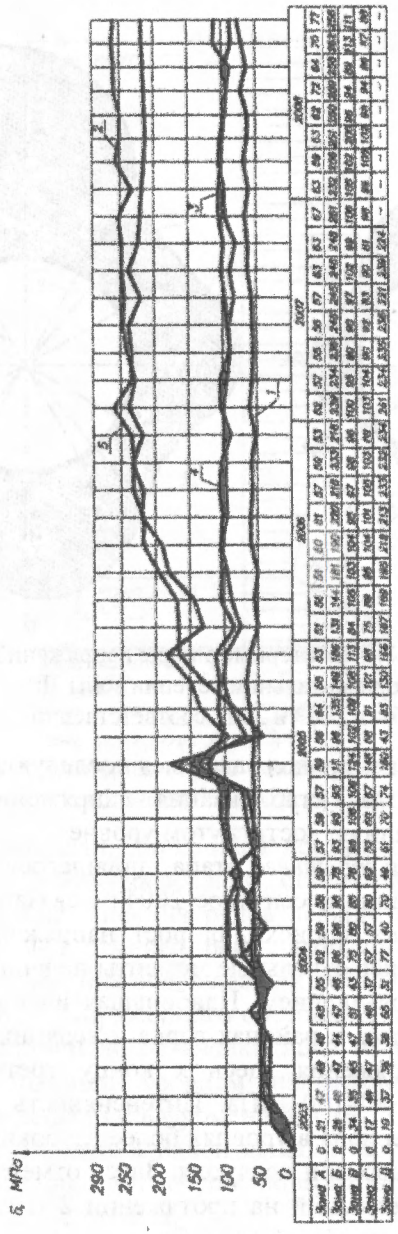
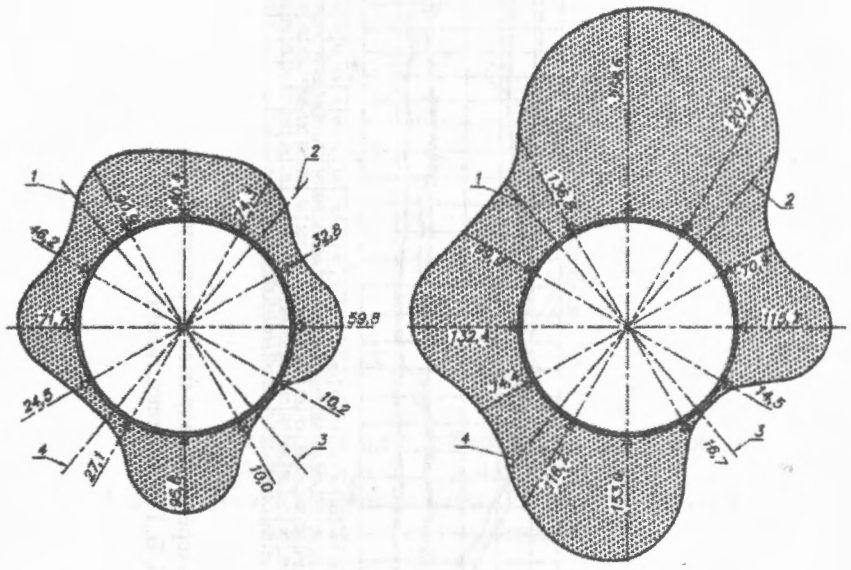


Рис. 9.6. Динамика во времени измеренных напряжений в кожухе:
1, 2, 3, 4, 5 – в зонах А, Б, В, Г, Д соответственно



а *б*

Рис. 9.7. Характерные эпюры напряжений в горизонтальном сечении зоны Д: *а*, *б* – в 2003 и 2007 соответственно

На *втором* этапе, продолжавшемся последующие 12 месяцев, наблюдалась некоторая стабилизация напряженного состояния кожуха горна и лещади на достигнутом уровне.

На протяжении *третьего* этапа, длившегося еще 9 месяцев (до аварийной ситуации в сентябре 2004 г., связанной с отрывом фурменного прибора), происходил рост напряжений. В течение этой фазы наблюдались отдельные моменты падения напряжений с последующим их повышением. Наибольшая интенсивность роста напряжений отмечалась в районах горна и верхних рядов лещади. Максимальные напряжения здесь к концу третьего этапа наблюдений составили 80–100 МПа. Интенсивность же повышения напряжений этого периода в уровнях более глубоких рядов лещади отставала от остальных зон контроля. Здесь отмечалось постепенное повышение напряжений на протяжении 2 месяцев до уровня порядка 60 МПа с дальнейшей их стабилизацией.

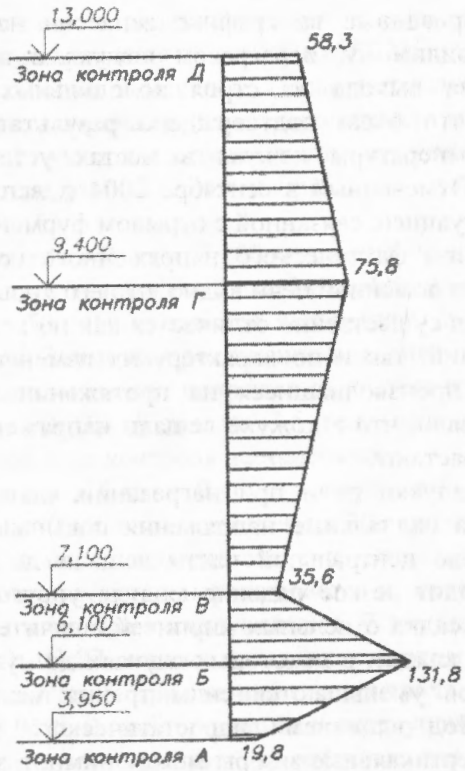


Рис. 9.8. Характерная эпюра максимальных напряжений по вертикали кожуха доменной печи через 2 года после пуска печи

Четвертый этап, длившийся последующие 14 месяцев, до января 2006 г., характеризовался стабилизацией напряженного состояния в уровнях нижних рядов лещади и в фурменной зоне. Одновременно был отмечен рост интенсивности напряжений в районах горна и верхних рядов лещади до 200–220 МПа.

Пятый этап напряженного состояния, продолжавшийся весь период эксплуатации до остановки печи на капитальный ремонт, отличался стабильным уровнем напряжений в районе более глубоких рядов лещади и в фурменной зоне. Уровень напряжений в районах горна и верхних рядов лещади на этой фазе был также практически стабилен. Отмечено лишь их некоторое постепенное повышение до 225–250 МПа.

Зафиксированные на графике всплески напряжений были вызваны, по-видимому, перегревом кожуха в отдельных зонах контроля из-за выхода из строя холодильных плит системы охлаждения, что было подтверждено результатами осмотра и измерения температуры кожуха в местах установки датчиков напряжений. Отмеченный в сентябре 2004 г. всплеск обусловлен аварийной ситуацией, связанной с отрывом фурменного прибора.

Из анализа фактического напряженного состояния кожуха лещади и горна доменной печи видно, что его уровень в различных зонах контроля существенно отличается как по величине измеренных напряжений, так и по характеру их изменения во времени. Наблюдения, производившиеся на протяжении пяти лет после задувки, показали, что в кожухе лещади напряжения практически все время возрастают.

После задувки печи при нагревании кладки в результате отпора кожуха радиальные напряжения повышаются. При дальнейшем нагреве центральной части лещади до 1200–1400 °С и выше происходит резкое падение модуля упругой пластичности футеровки и усадка отдельных кирпичей, значительное снижение напряжений в кладке, в некоторых случаях до нуля. В результате этих процессов уменьшаются силы трения между отдельными кирпичами. Под влиянием гидростатического давления чугун проникает в вертикальные зазоры между ними, а затем и в зазоры между горизонтальными рядами углеродистых блоков. Под влиянием сил, равных разности удельных весов чугуна и футеровки с учетом сил трения, происходит всплытие отдельных кирпичей, а затем и целых рядов кладки лещади. При этом ранее всего происходит нарастание кольцевых напряжений.

В зоне контроля А (отм. 3,950 м – низ лещади) после выхода печи на заданный режим работы на 20-е сутки напряжения стабилизировались на уровне 40–50 МПа и в дальнейшем, по мере выгорания футеровки, медленно повышались. К концу пятилетнего периода эксплуатации уровень напряжений в этой зоне достиг величины порядка 70 МПа.

В зоне контроля Б (отм. 6,100 м – верхние ряды лещади), также на 20-е сутки после задувки, уровень напряжений достиг 50–55 МПа и оставался стабильным на протяжении 30 суток. Затем, по

мере вхождения печи в рабочий режим эксплуатации, за последующие 40 суток напряжения возросли до 100 МПа и оставались на этом уровне в течение 9 месяцев. После истечения этого срока напряжения в рассматриваемой зоне продолжали постепенно возрастать и спустя 3 года после задувки достигли уровня 220–250 МПа. Затем в период следующих 2 лет напряжения в этой зоне стабилизировались.

В зоне контроля В (отм. 7,100 м – выше металлоприемника) после стабилизации напряжений на 2-е сутки после задувки их уровень порядка 50 МПа оставался неизменным в течение последующих 30 суток. Затем на протяжении 5 месяцев, по мере углубления ямы разгара, значения напряжений постепенно возрастали и достигли 100–110 МПа. Далее, за 3,5 года наблюдений уровень напряжений в этой зоне контроля не изменялся.

В зоне контроля Г (отм. 9,400 м – горн) стабильный уровень напряжений в 50–60 МПа был отмечен на 20-е сутки и наблюдался на протяжении 8 месяцев после задувки. Это свидетельствует о том, что кладка стенок горна перерождается и теряет свои упругие свойства. Затем в течение следующих 6–7 месяцев напряжения возросли до 90–100 МПа и далее оставались на этом уровне.

В фурменной зоне горна печи (зона контроля Д, расположенная на отм. 13,000 м) наблюдавшийся рост уровня напряжений практически повторял тенденции, отмеченные для зоны контроля Б. Однако рост напряжений через 9 месяцев после задувки здесь зафиксирован не был. В фурменной зоне напряжения оставались на уровне 50–80 МПа в течение 1 года. На протяжении последующих 14 месяцев по мере выгорания футеровки напряжения росли и достигли величины порядка 220 МПа. В дальнейшем значения напряжений стабилизировались на уровне 220–255 МПа.

Что касается геометрии контура поперечного сечения кожуха на контролируемом уровне в зоне В, то результаты контроля показали весьма высокую равномерность деформирования контура поперечного сечения с величиной радиальных перемещений точек контура, практически не отличающейся от средних по кольцу значений. По величине зафиксированные перемещения достаточно близко коррелировались с действующими в этих точках напряжениями.

На рис. 9.9 приведен график изменения во времени измеренных в шести точках зоны В радиальных перемещений кожуха лещади печи.

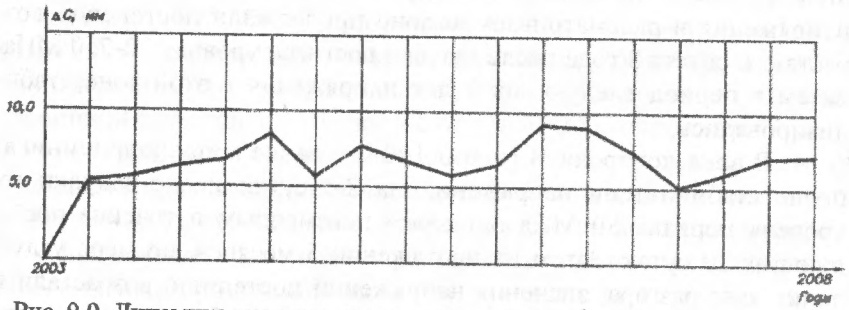


Рис. 9.9. Динамика максимальных радиальных деформаций поперечного сечения кожуха доменной печи в контролируемой зоне

По результатам проведенного контроля напряженно-деформированного состояния кожуха доменной печи на протяжении пяти лет эксплуатации, начиная со времени пуска до ее остановки на капитальный ремонт, можно сделать следующие выводы:

1. Рост уровня напряжений в процессе задувки печи отмечен на протяжении 20 суток. После окончания этого срока уровень напряжений во всех зонах контроля достиг величины порядка 50 МПа.

2. Максимальные измеренные напряжения зафиксированы, как и ожидалось, в районе верхних рядов лещади и в фурменной зоне. Напряжения здесь достигли 220–255 МПа при пороговом значении первого уровня порядка 290 МПа. Рост напряжений в этих зонах продолжался, практически, на протяжении всего периода эксплуатации и несколько стабилизировался лишь спустя три года после задувки печи. После достижения этого срока рост напряжений заметно замедлился.

3. В остальных зонах контроля максимальные приведенные напряжения находились в пределах 100–110 МПа.

4. Напряжения по поперечному сечению кожуха распределяются весьма неравномерно. При этом максимальные напряжения до 250 МПа, отмеченные между первой и второй летками, оказались растягивающими как в кольцевом (188 МПа), так и в меридиональном (128 МПа) направлениях, в то время, как с противоположной стороны кожуха зафиксированы зоны сжимающих напряжений, возникшие за счет меридионального сжатия. Это

связано, по-видимому, с местным нагревом кожуха в местах леток при выпуске чугуна, с нагревом кожуха воздухом, выходящим из фурм, а также с неравномерным распределением сил трения, возникающих между кладкой и кожухом.

Основной причиной указанной неравномерности напряжений, наблюдаемой на протяжении всей кампании печи, начиная от ее задувки, по-видимому, являются неточности изготовления и монтажа металлоконструкций, футеровки, выполнения компенсационных слоев и несовершенство свойств заполняющих его материалов.

5. Измеренные радиальные перемещения кольцевых поперечных сечений кожуха достаточно равномерны по окружности поперечного сечения и не превышают величины порядка 10,5 мм при пороговом значении первого уровня 15,44 мм.

6. Температура поверхности кожуха на всей контролируемой высоте, в том числе, в районе фурменной зоны, не превышала 50–60 °С.

Аналогичная система была установлена на доменной печи № 8 объемом 2700 м^3, с помощью которой доменная печь была успешно выведена на проектный режим после капитального ремонта I разряда.

Представляют также интерес результаты контроля напряженно-деформированного состояния кожуха доменной печи № 5 объемом 2000 м^3 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (Украина) при задувке ее после капитального ремонта I разряда.

Контроль проводился с помощью двухкоординатных тензометрических устройств, расположенных в восьми точках по кольцу на уровне третьего ряда лещади, примерно, на 1 м ниже точки перегиба кожуха (рис. 9.10). Показания приборов фиксировались визуально специальным персоналом.

Конструкция лещади – комбинированная, состоящая из центрального массива и углеродистых блоков различной длины по периферии. Система охлаждения горна и лещади – плитовые водяные холодильники, подлещадное охлаждение – воздушное.

График задувки предполагал выход на нормальные эксплуатационные параметры в течение 25 суток после задувки при следующих величинах: давление горячего дутья 0,275 МПа, давление под колошником – 0,15 МПа, температура горячего дутья – 1050 °С.

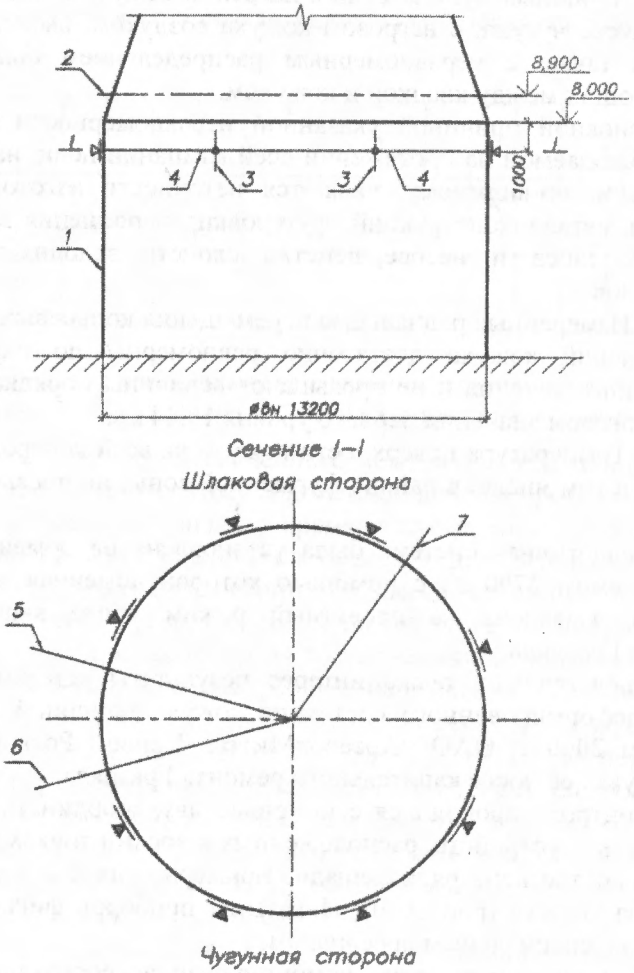


Рис. 9.10. Дислокация точек измерений на кожухе доменной печи:
1 – кожух лещади; 2 – уровень чугунных леток; 3, 4 – точки измерения меридиональных и кольцевых деформаций соответственно;
5, 6, 7 – ось чугунных и шлаковых леток соответственно

Фактическая задувка печи проходила с некоторым отставанием от теоретического графика (рис. 9.11).

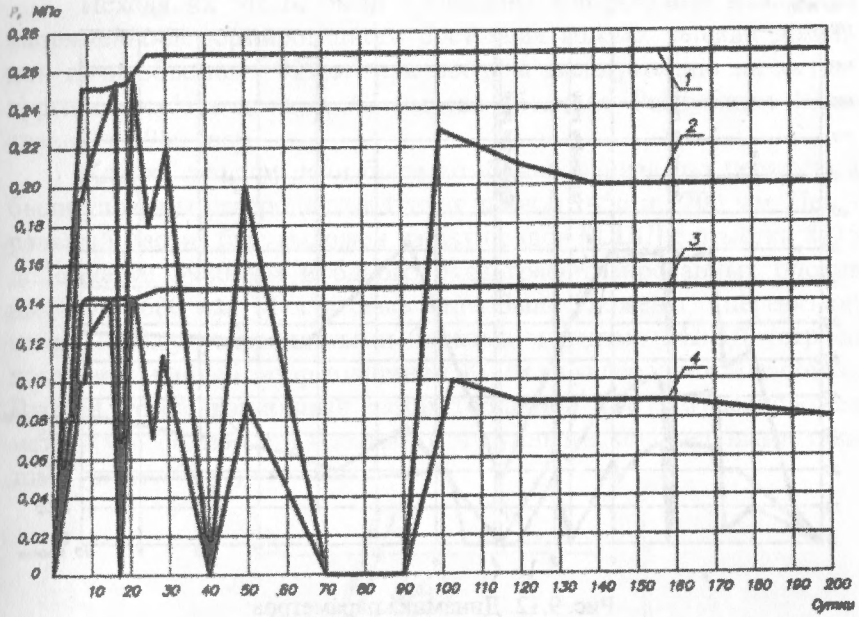


Рис. 9.11. Графики задувки печи:
1, 2 – теоретическое и фактическое давление дутья на фурмах соответственно; 3, 4 – то же под колошником

На рис. 9.12 представлены графики динамики средних кольцевых напряжений по сечению I–I и максимальных кольцевых напряжений в точке 6, а также график динамики давления под колошником, на котором прослеживается линейная зависимость от него суммарных напряжений.

В связи с частыми остановками печи по технологическим причинам, динамика напряженного состояния имела неравномерный характер. Максимальные напряжения были достигнуты к концу первого полугодия и составили 81 МПа. В дальнейшем напряжения снизились и через 8 месяцев к концу периода наблюдений стабилизировались на величине 59 МПа.

Уровень меридиональных напряжений в течение всего периода наблюдений был ниже кольцевых.

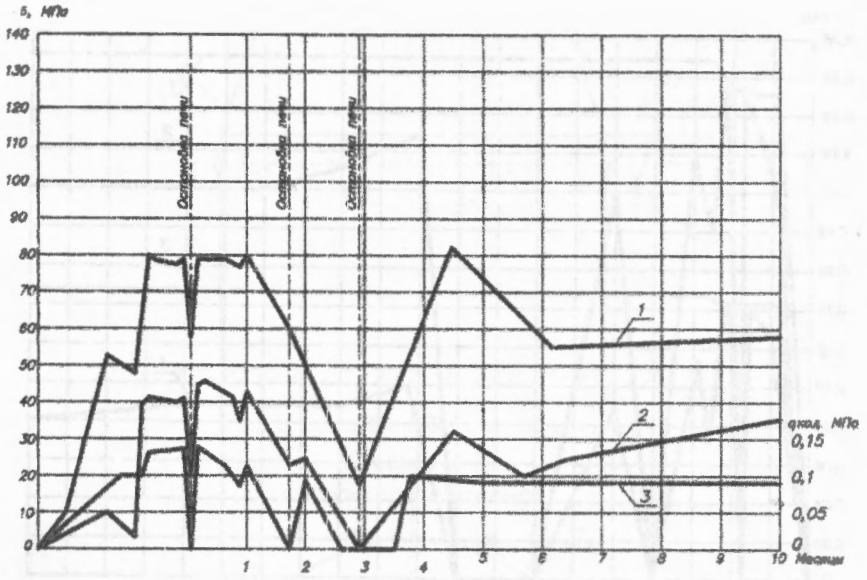


Рис. 9.12. Динамика параметров:
1 – максимальные кольцевые напряжения в точке 6; 2 – средние кольцевые напряжения в сечении I–I; 3 – давление под колошником

Невысокий уровень напряжений свидетельствует о нормальном ходе печи и отсутствии локальных перегревов в ходе всего периода наблюдений.

§ 9.3. Анализ напряженно-деформированного состояния кожуха доменной печи в период задувки ее после капитального ремонта без предварительного выпуска чугуна из ямы разгара лещади

При оценке напряженно-деформированного состояния кожуха доменной печи после капитального ремонта II разряда, выполненного без предварительного слива чугуна из зоны ямы разгара лещади, для определения общей промышленной безопасности кожуха печи в качестве критериального аналогично принимается напряженное состояние кожуха металлоприемника печи, а также кожуха лещади на участке возможной ямы разгара.

Исходя их этого, были проведены контрольные измерения напряженно-деформированного состояния кожуха лещади доменной печи объемом 1719 м^3 при вводе в эксплуатацию на металлургическом заводе в г. Смедерево (бывшая Республика Югославия) в 1986 году.

Кладка лещади печи была комбинированная, по периферии были уложены углеродистые блоки длиной 1450 и 1700 мм. Центральный массив был выложен из пяти рядов МЛЛД с отметки 8735 до отметки 5980 мм и одного ряда графитизированных блоков высотой 1600 мм. Муллитовые ряды были уложены с перевязкой швов. Между углеродистыми блоками и рядами МЛЛД устроен компенсационный зазор толщиной 40 мм из углеродистой набойки. Второй компенсационный зазор толщиной 120 мм расположен между углеродистыми блоками и чугунными холодильными плитами (рис.9.13).

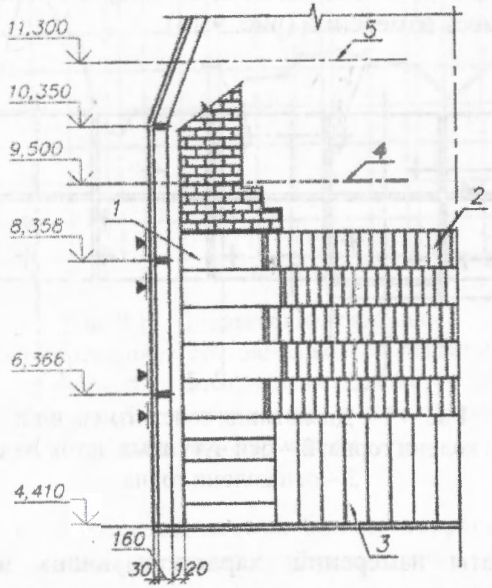


Рис. 9.13. Конструкция лещади:
1 – углеродистые блоки; 2 – высокоглиноземистые блоки;
3 – графитированные блоки; 4, 5 – оси чугунной и шлаковой леток соответственно

Первый расширенный капитальный ремонт II разряда длился с 29.03.93 г. до 13.08.95 г., после чего печь проработала до 28.10.95 г. Затем, в связи с чрезвычайными событиями в стране, печь была остановлена и вновь введена в эксплуатацию 28.03.96 г.

Таким образом, эта печь характеризовалась небольшим сроком эксплуатации после капитального ремонта – всего около 2,5 месяцев и сравнительно большим временем простоя – около 5 месяцев.

Для исследования были использованы двухкоординатные датчики с полосами длиной 1 м, показания приборов фиксировал специальный персонал. Места измерений располагались в трех уровнях с учетом реальной возможности размещения и закрепления.

Наибольшее количество точек было организовано в сечении I–I, где по периметру размещалось 12 точек. Остальные сечения содержали лишь те точки, подход к которым был доступен при организации мест измерений (рис. 9.14).

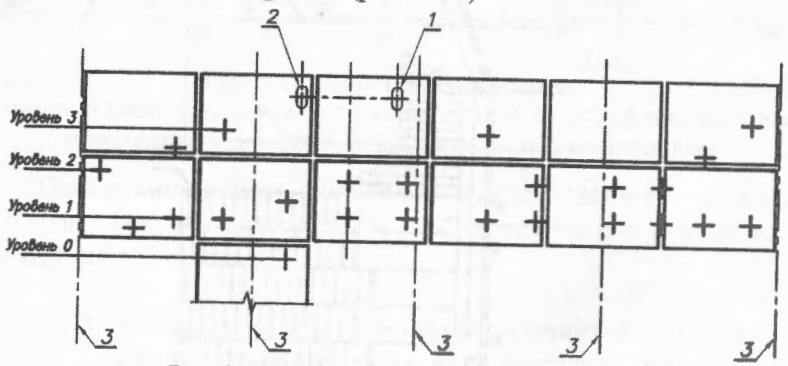


Рис. 9.14. Дислокация точек измерений:
1 – оси колонн горна; 2 – оси чугунных леток № 1 и № 2;
3 – оси колонн горна

Результаты измерений, характеризующих напряженно-деформированное состояние кожуха лещади, показаны на рис. 9.15.

Для оценки уровня напряжений были рассмотрены средние по сечению напряжения в каждой зоне и максимальные напряжения в точках измерений. Наблюдения велись в течение одного месяца с момента задувки печи после остановки.

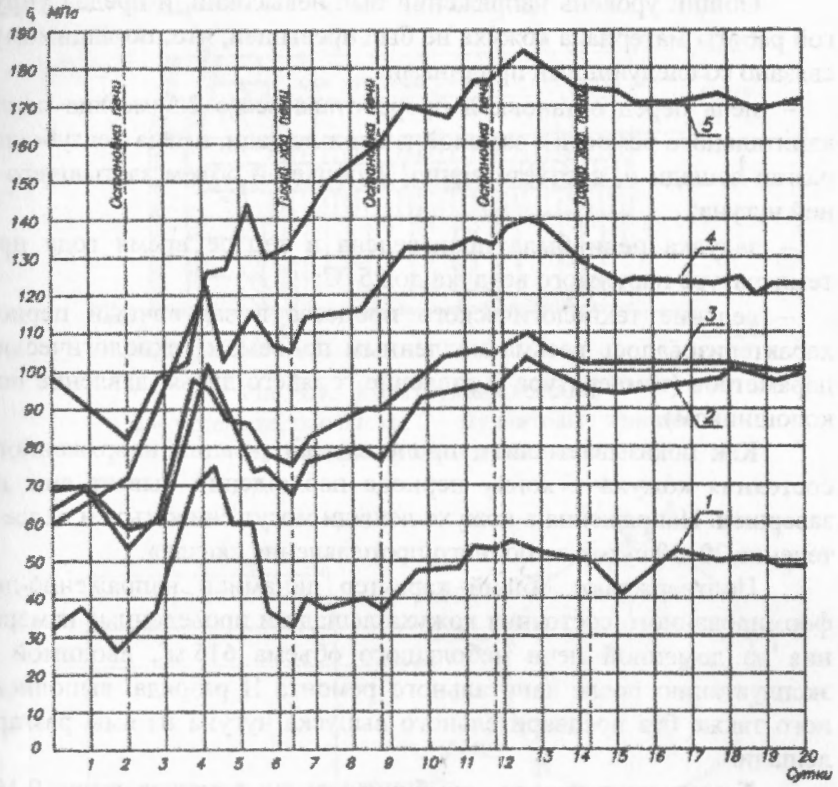


Рис. 9.15. Динамика напряженно-деформированного состояния кожуха лещади:
1, 2, 3, 4 – средние кольцевые напряжения на уровнях 0, I, II, III соответственно; 5 – максимальные кольцевые напряжения в точке 7 уровня III

Результаты измерений весьма близко корреспондируются с обобщенными этапами процесса задувки печи, сформулированными в § 4.1. На графиках хорошо прослеживается в первые 5–6 суток достаточно активный рост средних и максимальных напряжений и их заметное дальнейшее падение в течение 3–4 суток с последующей их стабилизацией.

Общий уровень напряжений был невысокий, и предел упругой работы материала кожуха не был превышен, что, по-видимому, связано со следующими причинами:

– печь перед остановкой проработала всего 2,5 месяца после капитального ремонта с заменой кладки лещади, имела неглубокий разгар лещади и, соответственно, небольшой объем застывшего в ней чугуна;

– задувка печи была произведена в теплое время года при температуре наружного воздуха до 25 °С;

– ведение технологического процесса в задувочный период характеризовалось весьма медленным подъемом технологических параметров (температура и давление горячего дутья, давление под колошником).

Как показывает опыт, процесс стабилизации напряженного состояния кожуха к концу периода наблюдений бывает еще не завершен. Напряжения в кожухе лещади могут снижаться и далее в течение 20–30 суток до полного проплавления «козла».

Подтверждают общий характер динамики напряженно-деформированного состояния кожуха лещади и проведенные измерения на доменной печи небольшого объема 615 м^3, вводимой в эксплуатацию после капитального ремонта II разряда, выполненного также без предварительного выпуска чугуна из ямы разгара лещади.

Конструкция лещади – комбинированная, показана на рис. 9.16:

– с отм. 2,975 м до отм. 4,475м – графитированные блоки;

– с отм. 4,475 м до отм. 6,228 м – высокопрочные муллитовые изделия (в центральной части), а по периферии – углеродистые блоки высотой 550 мм в 3 ряда; у кожуха расположены чугунные плитовые холодильники толщиной 300 мм.

Компенсационный зазор толщиной 116,5 мм между холодильниками и кладкой заполнен углеродистой массой. Второй компенсационный зазор толщиной 40 мм того же состава размещен на границе муллитовых изделий и углеродистых блоков.

На рис. 9.17 показана схема размещения точек измерений. Сечение, в котором производились измерения, расположено на 500 мм ниже перегиба кожуха.

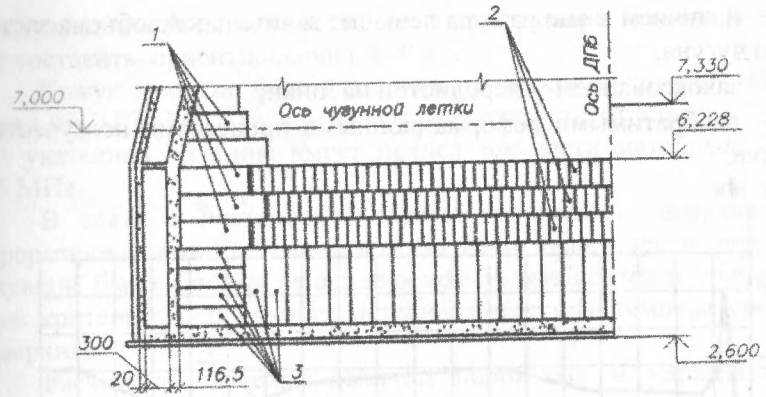


Рис. 9.16. Конструкция лещади:
1 – углеродистые блоки; 2 – муллитовые изделия;
3 – графитированные блоки

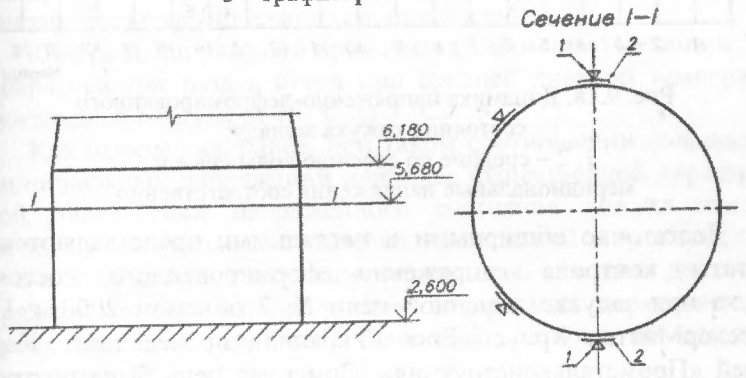


Рис. 9.17. Дислокация точек измерений на кожухе доменной печи:
1, 2 – точки меридиональных и кольцевых деформаций соответственно

На рис. 9.18 представлен график изменения напряжений в кожухе лещади в период задувки печи.

Динамика изменения напряженного состояния, в свою очередь, подтверждает общий характер работы кожуха.

Так, наблюдается резкий рост максимальных напряжений в первый период, в течение 15–20 суток, затем их резкое падение и дальнейшая равномерная стабилизация. Здесь следует отметить высокий уровень напряжений с появлением упруго-пластических деформаций, что можно объяснить следующими причинами:

– наличием в яме разгара лещади значительного объема застывшего чугуна;

– закоксованием углеродистой набойки;

– необратимыми деформационными процессами ползучести в кладке.

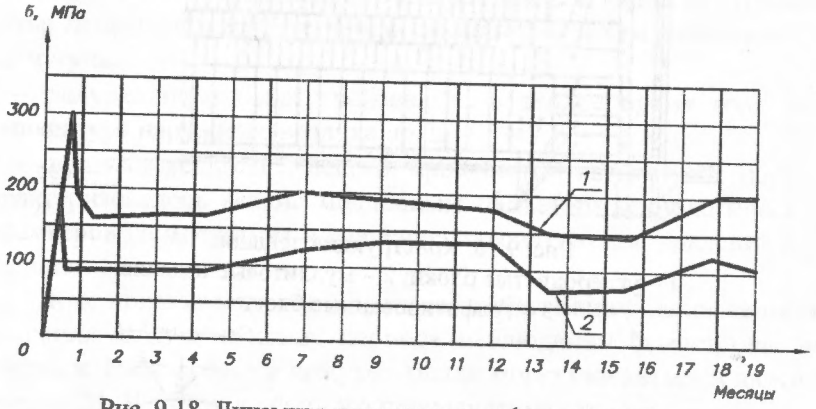


Рис. 9.18. Динамика напряженно-деформированного состояния кожуха лещади:
1, 2 – средние по сечению кольцевые и меридиональные напряжения соответственно

Достаточно обширными и наглядными представляются результаты контроля напряженно-деформированного состояния кожуха при задувке доменной печи № 7 объемом 2000 м^3 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (Украина), проведенного Корпорацией «Промстальконструкция». Доменная печь была построена по типовому проекту и была введена в эксплуатацию в 1962 г. Последний капитальный ремонт I разряда с заменой кладки и устройством комбинированной лещади был произведен в 1997 г. Капитальный ремонт II разряда проводился в 2002 г. и III разряда – в ноябре 2007 г. Печь проработала до июня 2009 г. и была остановлена в соответствии с графиком для планируемого расширенного капитального ремонта III разряда, в связи с чем скопившийся в яме разгара лещади чугун не был выпущен.

По организационным причинам печь простояла до сентября 2010 г., т. е. почти 15 месяцев, после чего, по окончании ремонта, был начат процесс ее задувки. По оценочным данным службы

эксплуатации объем скопившегося в яме разгара лещади чугуна мог составить, ориентировочно, 600 т.

Кожух лещади был выполнен из стали толщиной 43 мм марки 09Г2ДТ (М). Сталь этой марки соответствует классу С345 и при указанной толщине имеет предел текучести материала R_{yn} = 285 МПа.

В связи с постановкой задачи определения напряженно-деформированного состояния кожуха печи, практически перед ее задувкой, было принято решение осуществлять контроль только по двум критериям – прочности материала кожуха и температуре его поверхности.

Расчетные значения величин пороговых и управляющих напряжений $R_п$ и $R_{упр}$, соответствующие уровню промышленной безопасности кожуха на этапах задувки, были определены по упомянутой выше методике с применением действующих нормативных коэффициентов (см. приложение).

Контроль напряжений проводился с помощью механического компаратора три раза в сутки при средней дневной температуре окружающего воздуха от 20 °С до 5 °С.

Как отмечалось ранее, при таком соотношении кольцевых и меридиональных напряжений наиболее существенной характеристикой для оценки напряженного состояния кожуха является величина максимальных кольцевых напряжений в точках контролируемых сечений, которая, определенная как для двухосного напряженного состояния с учетом измеренных меридиональных напряжений, была принята в качестве критерия по прочности конструкции.

Определение фактических меридиональных напряжений проводилось для выявления их возможного аномального роста, а также для вычисления действующих кольцевых напряжений.

Для проведения контроля на кожухе металлоприемника и верхней части лещади на холодной печи в выбранных точках были установлены опорные элементы, используя которые перед началом задувки печи, с помощью ручных тензометров специальный персонал зафиксировал «нулевые» показания.

Величины кольцевых и меридиональных напряжений в каждой точке измерений определялись путем умножения разности среднего значения нулевого отсчета и отсчета на каждом этапе

задувки на цену деления прибора (для примененного тензометра 5,0 МПа /дел).

На рис. 9.19 показана схема зон контроля, на которых до задувки печи были организованы соответствующие точки измерений, расположенные:

– в районе нижней летки для выпуска жидкого чугуна (отм. ~ 3,200 м) – зона измерений I;

– на участке между нижней и верхней летками для выпуска жидкого чугуна (отм. ~ 5,000 м) – зона измерений II;

– в районе верхней летки для выпуска жидкого чугуна (отм. ~ 6,800 м) – зона измерений III.

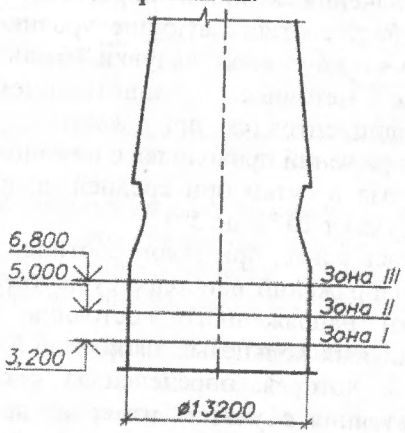


Рис. 9.19. Дислокация зон измерений

В каждой зоне измерений располагались по восемь узлов установки переносного тензометра (рис. 9.20), каждый из которых состоит из трех точек измерения деформаций (напряжений) в кожухе: двух – в кольцевом направлении и одной – в меридиональном.

Таким образом, общее количество контролируемых зон на кожухе печи – 3; узлов измерений – 24; точек измерения деформаций (напряжений) – 72.

Информация о температуре кожуха печи, необходимая для анализа его состояния, измерялась с помощью контактных термопар, расположенных на отм. 5,450 м и включенных в состав АСУТП ДП.

Результаты измерений показали, что максимальные кольцевые напряжения наблюдаются в верхней части лещади – в зоне I, и,

как правило, в районе входа прямого воздухопровода горячего дутья в кольцевой.

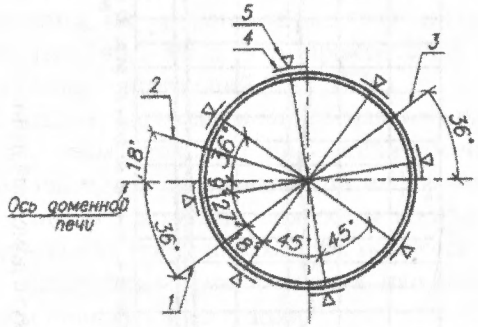


Рис. 9.20. Дислокация приборов в зонах контроля кожуха доменной печи:
1, 2, 3 – оси чугунных и шлаковых леток; 4, 5 – точки измерения меридиональных и кольцевых деформаций соответственно

На рис. 9.21 представлен график динамики максимальных кольцевых напряжений в контролируемых зонах кожуха лещади в период задувки печи, определенных по измеренным кольцевым и меридиональным деформациям.

Из графика также видно достаточно близкое соответствие динамики изменения напряжений общей картине, показанной в § 4.1.

Анализируя результаты исследований динамики роста кольцевых напряжений в кожухе лещади рассматриваемой печи, можно выделить четыре этапа напряженно-деформированного состояния кожуха.

На *первом этапе* задувки, в течение 11 суток наблюдался медленный рост напряжений до 40,0 МПа, связанный с низкими параметрами ведения технологического процесса.

Второй этап характеризовался интенсивным ростом напряжений на протяжении 4 суток, вызванным тепловым расширением застывшего чугуна. К концу второго этапа задувочного периода максимальные кольцевые напряжения достигли 181,6 МПа и не превысили пороговых напряжений, значения которых составили 242 МПа.

Однако в связи с тем, что уровень напряжений превосходил значения предельных напряжений (157 МПа), с целью его снижения были приняты меры по корректировке технологического процесса.

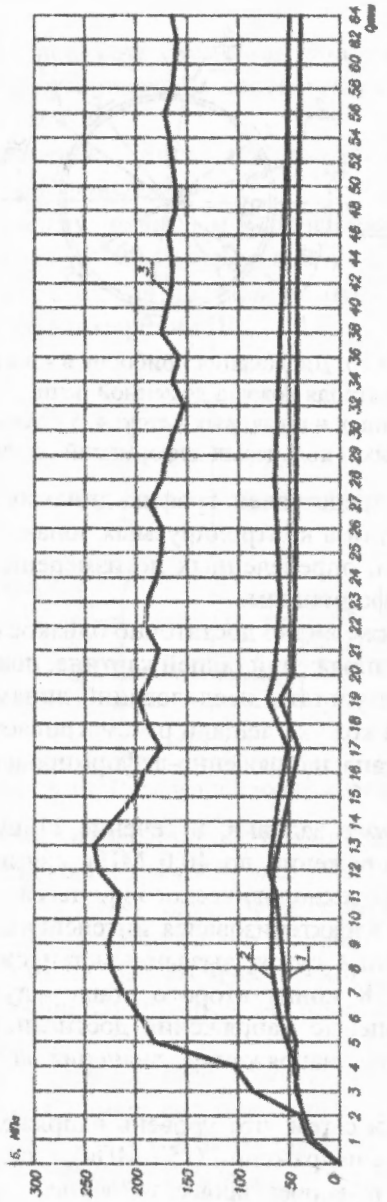


Рис. 9.21. Динамика максимальных кольцевых напряжений в кожухе доменной печи: 1, 2, 3 – для зон I, II, III соответственно

На *третьем этапе*, длившемся 8 суток, благодаря этим мерам процесс роста напряжений замедлился. Однако, ввиду инерционности системы, их уровень продолжал повышаться и концу этого этапа достиг 240,7 МПа, что, практически, соответствовало значению пороговых напряжений (242 МПа).

Таким образом, зафиксированные максимальные напряжения в кожухе и на этом этапе не превысили значения пороговых напряжений и, благодаря своевременной информации о напряженно-деформированном состоянии кожуха и соответствующей корректировке технологических параметров процесса задувки удалось не допустить дальнейшего роста уровня напряжений, грозящего возникновением нештатной ситуации.

На третьем этапе напряжения также превысили управляющие значения $R_{упр}$, и при достижении уровня 193 МПа были вновь приняты меры по их снижению.

Четвертый этап характеризовался постепенным снижением уровня деформаций (напряжений) кожуха. На 27-е сутки от начала задувки максимальные кольцевые напряжения составили $\sigma_к$ = 175,5 МПа. В дальнейшем, на протяжении 16 суток, в зависимости от изменений параметров технологического процесса уровень напряжений колебался от $\sigma_к$ = 190,4 МПа до $\sigma_к$ = 153,0 МПа, не превышая значений пороговых напряжений (208 МПа) и, практически, соответствовал значению управляющих напряжений на этом этапе (187,4 МПа).

После выхода печи на рабочие параметры, к концу 29-х суток кольцевые напряжения в кожухе стабилизировались, и на конец контролируемого периода их величина достигла 165,0 МПа, что составило 79% от пороговых значений и 68% от расчетного сопротивления стали.

За этот же период измерений кольцевые напряжения в зонах I и II практически были стабильны и не поднимались выше 50–70 МПа, а рост меридиональных напряжений значительно отставал.

Результаты контроля уровня напряженно-деформированного состояния кожуха металлоприемника на различных этапах задувки доменной печи с принятием управляющих мер по корректировке технологических параметров достаточно ярко свидетельствуют о значительной инерционности системы и длительности процесса стабилизации напряжений.

Анализ приведенной на рис. 9.22 эпюры распределения по поперечному сечению кожуха кольцевых напряжений для наиболее нагруженной III зоны измерений показывает, что их наибольшие величины возникают в узлах, приближенных к месту подачи горячего дутья в кольцевой воздухопровод, а минимальные – с противоположной стороны кожуха. Таким образом, одним из весьма эффективных методов снижения напряжений при задувке печи можно считать частичное отключение фурм со стороны входа прямого воздухопровода горячего дутья в кольцевой воздухопровод.

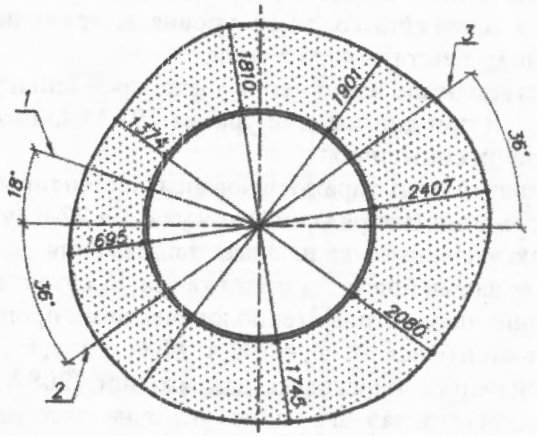


Рис. 9.22. Распределение максимальных кольцевых напряжений (МПа) в поперечном сечении зоны III кожуха доменной печи:
1, 2, 3 – оси чугунных и шлаковых леток

На рис. 9.23 показана взаимосвязь максимальных напряжений с некоторыми параметрами технологического процесса – давлением и температурой дутья, количеством действующих фурменных приборов.

Достаточно наглядно просматривается зависимость максимальных напряжений в зоне I от количества работающих фурменных приборов. Здесь видно падение максимальных напряжений при их частичном закрытии. Этот же график демонстрирует, что давление дутья не оказывает существенного влияния на уровень напряженно-деформированного состояния кожуха. При повышении давления на этапе снижения и стабилизации напряжений их заметный рост не происходит.

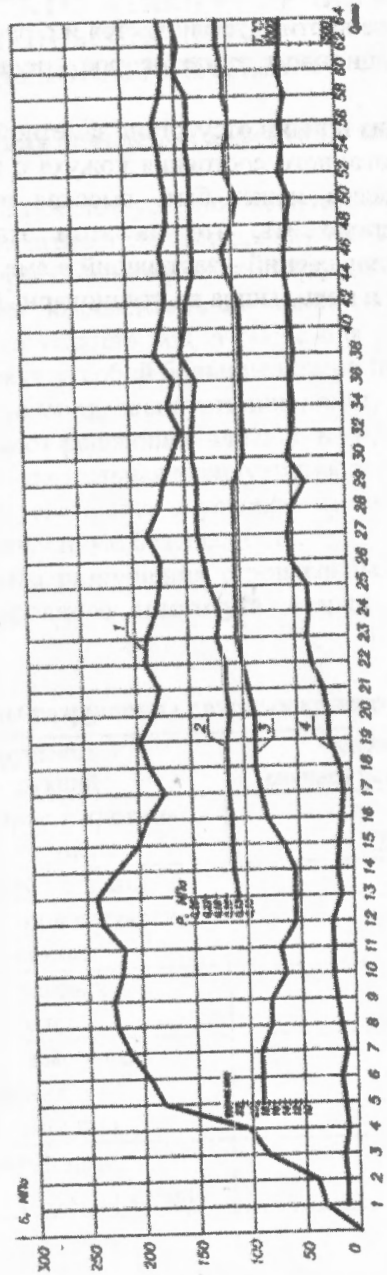


Рис. 9.23. Взаимосвязь напряженного состояния кожуха доменной печи с параметрами технологического процесса:
1 – динамика максимальных кольцевых напряжений в зоне III; 2 – давление на фурмах, МПа;
3 – количество работающих фурм; 4 – температура дутья, °С

Такая же картина наблюдается и с ростом температуры дутья. На стабилизационном этапе ее рост не приводит к увеличению напряжений.

Одной из причин отсутствия заметной взаимосвязи напряженно-деформированного состояния кожуха с параметрами технологического процесса может быть высокая инерционность системы. Можно предположить, что на этом этапе главный источник повышения напряжений – застывший в яме разгара лещади чугун – проплавился, и печь вышла на стационарный режим работы.

Глава 10 ДЕФЕКТЫ И ПОВРЕЖДЕНИЯ КОЖУХОВ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

§ 10.1. О причинах появления дефектов и повреждений

Отмеченные выше тяжелые условия эксплуатации кожухов доменных печей и воздухонагревателей нередко приводят к повреждениям, а иногда и к серьезным аварийным ситуациям. Остановки агрегатов для устранения повреждений, связанная с этим необходимость перевода печей на «тихий» ход, а также прямое сокращение выпуска продукции влекут за собой большие потери производства.

Специфические условия эксплуатации конструкций доменного комплекса оказывают решающее влияние на прочность и долговечность сооружений, длительная эксплуатация этих конструкций усугубляет техническое состояние и ускоряет износ, существенно влияющий на их промышленную безопасность.

Основные причины разрушения строительных конструкций по данным Международного института сварки приведены в таблице 10.1.

Таблица 10.1

Причины разрушения сварных конструкций

Причины разрушения сварных конструкций	Количество случаев разрушения, %
Нерациональность спроектированных конструкций, в том числе:	28,8
– неправильное конструирование	22,5
– введение сварных узлов в участки повышенных напряжений	6,3
Наличие дефектов в сварных соединениях, в том числе:	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

По 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%.

И если на промышленную безопасность и остаточный ресурс строительных конструкций влияют дефекты и повреждения, весомость которых оценена диаграммой Парето [40] (рис. 10.1), то для кожухов доменных печей и воздухонагревателей основными параметрами, влияющими на промышленную безопасность, являются особенности и воздействия технологического процесса.

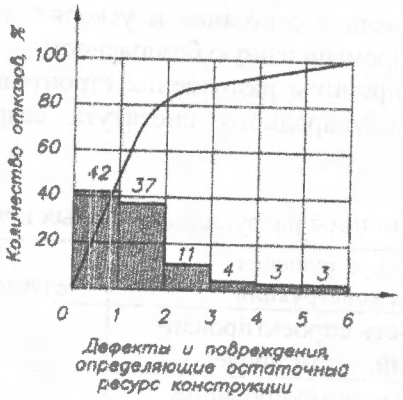


Рис. 10.1. Дефекты и повреждения, определяющие остаточный ресурс конструкции:
1 – коррозионно-механические повреждения; 2 – повреждения, обусловленные режимом эксплуатации; 3 – дефекты изготовления; 4 – ошибки при эксплуатации; 5 – дефекты металлопроката; 6 – другие дефекты и повреждения

Значительное количество простоев печей происходит по причинам, связанным с повреждением кожухов. Так, как уже отмечалось, по данным [6] количество аварий, связанных с повреждением кожухов доменных печей, составляет 6%, а количество простоев, связанных с кожухами, 8% от общего числа простоев.

По данным [37] среди металлургических производств доменное производство отличается наиболее высокой аварийностью, составляющей 26,32% от общего числа аварий на предприятиях черной металлургии.

Наиболее тяжелыми и часто происходящими авариями в доменном производстве являются разрывы кожухов доменных печей в зонах горна и чугунных леток, сопровождающиеся разрушением нижней части печи, выходом наружу раскаленного чугуна, кокса, шлака и газов.

Общее число аварий, связанных с разрывами кожухов доменных печей и прорывами горна и лещади, составляет до 15% от числа аварий доменных печей.

В 1975 г. из-за неудовлетворительного состояния кожухов доменных печей простои печей составили 1167 часов, потери производства – 144 тыс. т чугуна. Сократился период между капитальными ремонтами I и II разряда и увеличилась продолжительность ремонтов. В 1977 г. произошло 27 аварий металлоконструкций доменного комплекса, наиболее частые из которых – трещины, продувы, прогары и разрывы кожухов, в ряде случаев – с выбросом раскаленных материалов.

Прорывы горна в условиях высокого давления дутья и скопления значительных масс жидкого чугуна представляют собой серьезные аварии, вызывающие разрушение оборудования, взрывы, пожары, отравление и гибель персонала. Так, за период 1995–2000 годов на металлургических предприятиях Украины зарегистрировано 20 аварий доменных печей с разрывом кожухов в зоне горна и общим простоем до 300 суток [3] .

Анализ потерь производства на предприятиях бывшего Советского Союза показал, что по причине разрыва кожухов печей и воздухонагревателей только за один год они составляли до 7,7% от всех потерь.

Износ конструкций в значительной степени связан с ростом дефектов и повреждений, причины возникновения которых различны.

Под *дефектом* понимается отклонение качества, формы или фактических размеров элементов и конструкций от требований нормативно-технической или проектной документации, которое возникает в процессе создания конструкции – при проектировании,

изготовлении, транспортировке, монтаже и характеризует ее начальное состояние.

Повреждение – это отклонение от 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. Известно, в частности, что в 70% случаев появления трещин инициатором их служили ремонтные швы [28].

Крупные повреждения, приводящие к прекращению эксплуатации сооружения или вызывающие опасность полного или частичного разрушения конструкций, относят к аварийным. Причинами таких повреждений могут быть:

– отступления от проекта КМ в конструктивном решении кожуха;

– некачественные сварные соединения, выполненные без подварки корня шва, односторонним швом без остающейся технологической подкладки и пр.;

– незаваренные трещины любой длины в основном металле и в сварных швах;

– смещение кромок (депланация) листов в стыках более 0,1 толщины листов кожуха или более 4 мм для кожухов печей и более 3 мм для кожухов воздухонагревателей;

– 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;

– 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.

Ряд указанных дефектов и повреждений является прямым следствием некачественного ведения работ на монтаже и во время ремонтов.

К повреждениям, возникающим при эксплуатации, относятся разгары кладки, трещины, перекрытые накладками из полутруб или уголков с поперечными ребрами, трещины, заваренные некачественными швами без разделки кромок и засверливания их концов, локальные перегревы металла, вмятины, выпучины, корродированные участки кожуха и т. п.

Другие повреждения вызваны недостаточной стойкостью технологических конструкций, такие как перегревы, связанные с разрушением футеровки, изменением во времени физико-механическими свойств ее материалов, выхода из строя системы охлаждения, проходом горячих газов к кожуху и др. Выпучины обычно возникают в местах, где перегретый металл потерял способность воспринимать действующие на кожух нагрузки.

Повреждения кожухов, в зависимости от вызывающих их воздействий, могут быть разделены на:

– повреждения от силовых (механических) воздействий – трещины, разрывы, искривления и местные прогибы;

– повреждения от температурных воздействий – изменение геометрической формы оболочки, разрушения, связанные с падением прочностных характеристик металла, хрупкие трещины при отрицательных температурах, потеря устойчивости и волнообразование оболочек кожухов;

– повреждения от химических (электрохимических) воздействий – коррозия металла и разрушение защитных покрытий.

Повреждения возникают и развиваются в зависимости от срока эксплуатации кожухов и интенсивности силовых воздействий. Многократные обследования, участие в рассмотрении аварийных ситуаций и анализ работы таких конструкций позволили сделать определенные выводы.

Основной вывод состоит в том, что наблюдаемые дефекты и повреждения возникают не только вследствие низкого качества строительства, что зачастую имеет место в обычных строительных конструкциях, но, главным образом, по причинам, связанным с эксплуатацией сооружений.

Для кожухов доменных печей и воздухонагревателей это обстоятельство весьма существенно, т. к. они работают совместно с футеровкой и как технологические агрегаты испытывают

непосредственное воздействие технологического процесса и оборудования. Возникающие здесь повреждения особенно опасны: при несвоевременном принятии необходимых мер они могу развиваться с высокой скоростью и привести к нештатным ситуациям и остановке агрегатов.

Для устранения дефекта в данном случае, в первую очередь, требуется ликвидировать его причины, что, как правило, связано с восстановлением поврежденной технологической конструкции или изменением режима работы оборудования.

Как уже отмечалось, при эксплуатации футерованные конструкции испытывают широкий комплекс нагрузок и воздействий, связанных с технологическим процессом. Все это приводит к высокому уровню напряжений в кожухе и в кладке, постепенному износу футеровки, элементов охлаждения и т. п. Уровень напряжений в металле кожухов значительно повышается в районах концентрации напряжений вокруг отверстий и проемов, изменения геометрии кожухов, вблизи ребер, стесняющих свободную деформацию и пр.

Наряду с приведенным влиянием воздействий, на несущей способности кожухов отрицательно сказываются дефекты возведения и эксплуатации сооружений, приводящие к увеличению напряжений в кожухах и изменению свойств металла.

Количественно ориентировочный уровень дополнительных напряжений, вызванных некоторыми дефектами и повреждениями, связанными с нарушениями качества монтажа и нормального режима эксплуатации, показан в таблице 10.2.

Наличие указанных дефектов особенно опасно для кожухов воздухонагревателей, где из-за переменных величин воздействий могу возникать явления малоцикловой усталости.

Известные материалы о зарубежных доменных печах свидетельствуют о том, что основной причиной появления трещин являются местные перегревы.

Так, на доменной печи объемом 4084 м^3 одного из предприятий Германии в околошовной зоне между распаром и шахтой появилась трещина длиной 5 м. При изучении причин произошедшего выявилось, что кожух в этом районе перегревался до 720 °С, ввиду разрушения футеровки и периферийного хода газа.

Таблица 10.2

Уровень дополнительных напряжений, вызванных дефектом или повреждением

Дефект или повреждение конструкции, воздействие	Дополнительные напряжения, МПа
Местный перегрев кожуха до 300 °С	80
Местный перегрев кожуха до 500–700 °С	150–200
Депланации листов в стыках до 5 мм	300
Оставленные при монтаже футерованных кожухов скобы и кронштейны	80–150
Уменьшение компенсационного слоя в футеровке на 20–25 мм	70–80
Подрез глубиной 0,5 мм и радиусом 0,25 мм для толщины листа 20 мм	Коэффициент концентрации напряжений 3,6

Попытка простой заварки трещины была неудачной: через 14 дней трещина возникла на прежнем месте, после чего печь была остановлена на ремонт. Во время ремонта, продолжавшегося 42 дня, была заменена футеровка печи и участок кожуха высотой 4,5 м с одновременной заменой в этой зоне системы охлаждения.

§ 10.2. Характеристика дефектов и повреждений кожухов доменных печей

По данным общего анализа трещинообразования в кожухах доменных печей распределение трещин по кожуху составляет [3, 38]:

- зона горна, лещади и чугунных леток – 65 %;
- заплечики – 16 %;
- шахта печи – 19 %.

Ниже приведены наиболее часто встречающиеся трещины и их основные характеристики.

1. Трещины в кожухах доменных печей в 40 % случаев встречаются в зонах горна и лещади и составляют до 30 % от общего числа выявленных трещин. В большинстве случаев они

имеют вертикальное направление, появляясь в зоне горна, и распространяются вверх, до фурменных отверстий, и вниз, до конца лещади. Ширина раскрытия трещин в отдельных случаях доходит до 60–80мм. Расположение трещины часто совпадает с вертикальными стыками плитовых холодильников. Эти трещины обычно возникают преимущественно после капитальных ремонтов I разряда в начале кампании. Причиной их появления является совокупность воздействий ряда факторов, в том числе:

– недостаточный компенсационный зазор, т. к. при вертикальном росте кладка действует, как клин, и создает дополнительное радиальное давление;

– напряжения краевого эффекта и неравномерное давление кладки через холодильники при их взаимном повороте у вертикального стыка.

Однократная заварка таких трещин практически не дает результатов: их разрыв появляется вновь. Только с течением времени раскрытие прекращается, после чего трещина может быть окончательно заварена.

Такая последовательность образования трещин может быть объяснена постоянным прогревом кладки лещади и, как следствие этого, увеличением ее диаметра. Процесс прекращается после стабилизации температуры кладки.

Следует заметить, что с применением охлаждения лещади количество трещин в ее кожухе несколько уменьшается, что можно объяснить меньшей глубиной прогрева кладки и более быстрой стабилизацией режима.

2. Трещины различного направления в районе горна и фурменной зоны, чаще около чугунной летки, встречаются примерно в 65% обследованных печей, и к этой группе трещин относятся примерно до 40% выявленных трещин. Трещины обычно берут начало от углов рамы чугунной летки или от других мест концентрации напряжений и имеют протяженность 1,5–2,0 м.

Возникновение таких трещин связано с высокой циклической температурой в зоне чугунной летки, концентраторами напряжений, отсутствием в этой зоне компенсационного зазора между кладкой и плитами холодильников, а также воздействием переменных усилий от зацепа пушки чугунной летки, прикрепленной к кожуху.

3. Трещины вертикального направления в районе заплечиков, начинающиеся от линии сопряжения заплечиков с мораторным кольцом, обычно возникают во второй половине кампании печи в результате выхода из строя плит системы охлаждения. Подобные трещины были обнаружены на 15% обследованных печей и составляют примерно 15% от общего количества выявленных трещин.

4. Горизонтальные трещины в кожухе шахты длиной до 2–3 м. Причиной их возникновения обычно является недостаточность компенсационных зазоров между кожухом и кладкой, а также зазоров под защитными сегментами и под жестко закрепленными к кожуху заходящими в кладку холодильными плитами, вследствие чего в кожухе возникают большие меридиональные растягивающие напряжения от вертикального роста футеровки.

5. Трещины различного направления в охлаждаемой зоне кожуха шахты. Их протяженность колеблется от 1 до 2м. Причиной появления таких трещин чаще всего бывают местные перегревы металла кожуха, возникающие из-за контакта с высоконагретыми газами в местах дефектов футеровки.

6. Трещины в кожухе шахты, начинающиеся в углах вырезов для холодильников. Причиной появления таких трещин обычно являются значительная концентрация напряжений в этих местах и механические воздействия от поворота закрепленных в кожухе холодильников, возникающего при вертикальном росте футеровки.

7. Трещины вдоль вставок в кожухе и под углом к ним, составляющие примерно до 15% от всех обнаруженных трещин. Как правило, такие трещины связаны с некачественным выполнением сварных швов.

8. Трещины на куполе печи обычно возникают вследствие местного перегрева его участков при выходе из строя теплоизоляции или повышения температуры газов в подкупольном пространстве, а также в результате нарушения ведения технологического процесса.

9. Трещины в местах крепления газоходов к куполу печи. Появление таких трещин связано с местными перегревами, передачей на газоходы значительных вертикальных нагрузок и со связанными с ними большими усилиями горизонтального распора.

10. Трещины в местах примыкания колошникового фланца возникают из-за неравномерного нагрева фланца и примыкающего к нему кожуха при резких изменениях температуры отходящих газов (при нарушениях нормального технологического процесса) и вследствие неравноценной тепловой защиты этих конструкций. Причиной может также быть качество примененной для фланца стали, свойства которой не обеспечивают работу в таких условиях, а также неудовлетворительное качество сварного шва, прикрепляющего фланец к кожуху.

11. Трещины в местах приварки литого оборудования к кожуху возникают обычно из-за неправильного выбора марки стали литья, не обеспечивающей получение нормального сварного шва, и неудачных конструктивных решений узла сопряжения литья со стальной оболочкой.

12. Выпучивание кожуха шахты в неохлаждаемой зоне возникает в результате перегрева металла по всему периметру кожуха до потери несущей способности. В таких случаях кожух уже не в состоянии воспринимать вертикальную нагрузку, теряет устойчивость и «садится» с образованием волн.

Это явление, как правило, сопровождается расстройством работы загрузочного устройства, так как при неравномерной осадке образуется перекос колошникового фланца и нарушается его горизонтальность. Кроме того, при этом возможен наклон кожуха в непрогнозируемом направлении с повреждением расположенных рядом конструкций – колонн колошникового копра, связей и пр. В этой ситуации, как правило, возникают значительные нагрузки на опорные элементы, предназначенные для временного опирания кожуха печи во время ремонта, вследствие чего они теряют устойчивость (рис. 10.2).

13. Изгиб и кольцевые трещины в мораторном кольце с отрывом от колонн горна возникают при недостаточной величине зазора между кожухом и кладкой шахты или при жесткой связи между футеровкой и кожухом.

При своем вертикальном росте кладка, действуя, как клин, и за счет сил трения о кожух, приподнимает и отрывает кожух от колонн горна, изгибая мораторное кольцо в радиальном направлении. Сам по себе изгиб кольца в определенных пределах не

вызывает неприятностей, но при больших деформациях и большой жесткости в нем могут возникать кольцевые трещины.

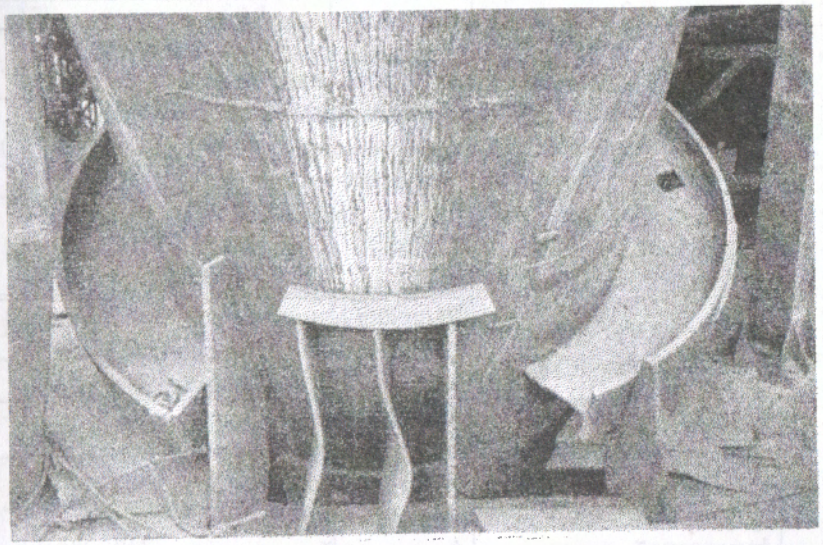


Рис. 10.2. Деформации опорных стульчиков при осадке кожуха печи

Обычно подъем кольца величиной в пределах от 2 до 30 мм начинается вскоре после задувки печи и, если болты, соединяющие колонны горна с кольцом, ошибочно были затянуты, может произойти их разрыв.

В таблице 10.3 приведены основные, наиболее часто встречающиеся повреждения кожухов доменных печей и возможные причины их появления [23].

Таблица 10.3

Характерные повреждения кожухов доменных печи

№ п/п	Характер повреждения	Факторы, вызывающие повреждения
1	2	3
1	Вертикальные трещины в кожухе лещади	Недостаточный компенсационный зазор в кладке лещади. При повторных раздувках печи застывший в яме разгара лещади чугун («козел»)

Продолжение таблицы 10.3

1	2	3
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 связанный с этим 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 цикличность температуры 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
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

Окончание таблицы 10.3

1	2	3
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 им несущей способности
15	Трещины в мораторном кольце	Недостаточный компенсационный зазор в футеровке
16	Местные нагревы кожуха	Циркуляция горячих газов между кожухом и кладкой, высокая пористость огнеупоров, недостаточный теплообмен между кладкой и холодильниками [38]

§ 10.3. Характеристика дефектов и повреждений кожухов воздухонагревателей

Примерно в 95% случаев обследованных воздухонагревателей встречались трещины или выпучины, перегревы, накладки и вставки неизвестного происхождения, чаще всего в районе штуцеров горячего дутья и газовых горелок, что вызвано некомпенсированными температурными перемещениями газовоздухопроводов.

При обследовании большого числа воздухонагревателей было установлено, что значительная часть дефектов связна с качеством монтажа. В таблице 10.4 приведены основные характерные дефекты, обнаруженные на обследованных воздухонагревателях.

Таблица 10.4

Характерные дефекты кожуха воздухонагревателя

№ п/п	Наименование дефекта	Величина обнаруженная, мм	Рекомендации нормативного документа
1	Депланации листов кожуха	5–6	СНиП III-18-75: 0,1 толщины кожуха, но не более 3 мм
2	Подрезы в сварных швах	2–3	СНиП III-18-75: 1 мм
3	Угловатости и западания в стыках	18–20	СНиП III-18-75: 5 мм
4	Вырывы в металле	5–6	Не допускаются
5	Зазор в стыковых швах приварки ремонтных вставок	15–18	ГОСТ 5264-80 0 + 3 мм
6	Зазоры в примыкании остающихся подкладок	5–6	ГОСТ 5264-80 0,5 мм

Кроме указанных в таблице, были обнаружены и другие дефекты: не всегда выполнялась разделка кромок в сварных швах, кривизна поверхности кожухов и ремонтных вставок не соответствовала проектной, применялись сварочные электроды неизвестного качества и пр.

Вследствие этих дефектов при эксплуатации воздухонагревателя появляются значительные дополнительные напряжения в кожухах, из-за чего возникают повреждения футеровки, которые приводят к перегревам кожухов и их повреждениям в виде трещин, выпучин и т. п.

Кроме того, установлено, что во многих случаях обнаруженные дефекты своевременно не устраняются, и воздухонагреватели продолжают эксплуатировать в неисправном состоянии с перегревами, выпучинами и даже с трещинами.

Наиболее часто повреждаемыми зонами являются узлы сопряжения с кожухом штуцера горячего дутья и патрубков газовой горелки.

Такие повреждения происходят по следующим причинам:

– вертикальный рост кольцевой огнеупорной кладки в зоне штуцеров сопровождается нарушением ее примыкания к кладке штуцера и, следовательно, перегревом металла;

– вследствие повышения температуры в воздухопроводах (без компенсаторов) происходят повороты их участков в горизонтальной плоскости относительно воздухонагревателей и прямого воздухопровода горячего дутья, вызывающие значительные напряжения в металле, часто сопровождаемые местными деформациями и трещинами;

– неодинаковые перемещения разных концов подвода к воздухонагревателю, опирающегося с одной стороны на кожух, а с другой – на отдельно стоящие опоры, вызывают повороты в вертикальной плоскости, приводящие к дополнительным напряжениям в металле.

Многолетние наблюдения и контроль напряженно-деформированного состояния зон узлов сопряжений штуцеров горячего дутья и кожухов воздухонагревателей, проведенные на ряде металлургических предприятий Украины, показали, что кольцевые напряжения в кожухе и футеровке в этой зоне достигают значительных величин и близки к меридиональным (таблица 10.5). Это говорит о том, что вертикальный рост кожуха является существенной, но не единственной причиной повреждений узла.

Таблица 10.5

Уровень напряженного состояния в зоне примыкания воздухопровода горячего дутья к кожуху

Наименование предприятия	№ ДП	№ ВН	Напряжение в кожухе воздухонагревателя, МПа		Напряжение в футеровке воздухонагревателя, МПа	
			$\sigma_к$	$\sigma_м$	$\sigma_к$	$\sigma_м$
Днепровский металлургический комбинат им. Дзержинского	7	5	45	56	2,3	2,9
	9	3	45	44	2,4	2,3
Днепропетровский металлургический завод им. Петровского	2	20	50	65	2,5	3,3
	3	2	30	48	1,1	1,7
	5	2	30	34	1,1	1,2
	5	3	41	42	1,5	1,5

Можно предположить, что отмеченный столь высокий уровень двухосного напряженного состояния в футеровке приводит к образованию трещин с последующим проникновением горячего воздуха к металлической оболочке воздухопровода и ее перегреву. В связи с этим и ввиду вертикальных перемещений кожуха воздухонагревателя, связанные с его нагревом, в этой зоне возникают повреждения, влияющие на общую надежность и промышленную безопасность агрегата.

Поэтому весьма радикальной мерой снижения напряжений и повышения стойкости этого узла является установка компенсаторов на участках от воздухонагревателей до прямого воздухопровода горячего дутья.

Трещины по вертикальным сварным швам могут возникать при переломах и отступлении от круговой формы поверхности кожуха, подрезах, депланациях и других нарушениях, превышающих нормативные допуски, а также от большой величины кольцевых напряжений, связанных с радиальным температурным ростом футеровки при недостаточной величине компенсационного зазора или малой компенсирующей способности материалов его заполнения.

Перегревы и выпучины возникают чаще всего в верхних зонах кожуха в случаях проникновения к нему горячего газа при снижении газонепроницаемости кладки вследствие появления трещин.

Разрывы анкерных креплений и изгиб днища обычно возникают в результате подъема кожуха огнеупорной насадкой при ее нагреве в случаях недостаточной величины зазоров в насадке и между насадкой и кольцевой кладкой. Вследствие радиального расширения от нагрева насадка прижимает кладку к кожуху и благодаря силам трения поднимает его при своем вертикальном росте.

При отсутствии свободного вертикального температурного роста кольцевой кладки возникают кольцевые разрывы вблизи шва приварки днища к кожуху.

В таблице 10.6 приведены основные наиболее часто встречающиеся повреждения кожухов воздухонагревателей и возможные причины их появления.

Таблица 10.6

Характерные повреждения кожухов воздухонагревателей

№ п/п	Характер повреждения	Причины, вызывающие повреждения
1	Трещины у 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 листов в стыках
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 сварных 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

§ 10.4. Рекомендации по устранению причин повреждения кожухов доменных печей и воздухонагревателей

Методы устранения причин повреждений кожухов доменных печей и воздухонагревателей весьма многообразны и, как правило, зависят от опыта конкретного предприятия и характера ведения технологического процесса.

Однако могут быть рекомендованы общие методы, основанные на принципиальной взаимосвязи элементов кожухов как комплексных конструкций.

В таблице 10.7 приведены рекомендации по возможным методам устранения причин повреждений в кожухах доменных печей.

Таблица 10.7

Рекомендуемые методы устранения причин, вызывающих дефекты и повреждения кожухов доменных печей

№ п/п	Наименование повреждения	Методы устранения причины повреждения	Время устранения
1	2	3	4
1	Вертикальные трещины	1.1. Зазор между кладкой и плитами холодильников заполнить углеродистой массой	Капитальный ремонт I разряда
		1.2. Зазор между кладкой и плитами холодильников заполнить шамотно-глинисто-цементным раствором	Капитальный ремонт I разряда
		1.3. Сопряжение цилиндрической и конической частей кожуха горна располагать не менее, чем на 1000 мм выше верха лещади	Капитальный ремонт I разряда

Продолжение таблицы 10.7

1	2	3	4
2	Трещины в зоне чугунной летки	2.1. Улучшить охлаждение этой зоны кожуха	Капитальный ремонт I разряда
		2.2. Перенести крепление электропушки с кожуха на отдельно стоящую конструкцию	Капитальный ремонт I разряда
3	Трещины в зоне заплечиков	3.1. Улучшить охлаждение этой зоны кожуха	Капитальный ремонт I или II разряда
		3.2. Зазоры между плитами холодильников выполнить: вертикальные – 5% от ширины плиты и горизонтальные – 3,5% от высоты плиты	Капитальный ремонт I разряда
4	Горизонтальные трещины на кожухе шахты	4.1. Увеличить зазор между кладкой и кожухом шахты	Капитальный ремонт II разряда
		4.2. Увеличить зазор между кладкой и защитными сегментами шахты	Капитальный ремонт II разряда
		4.3. Увеличить зазоры между плитами холодильников согласно п. 3.2	Капитальный ремонт II разряда
5	Трещины в кожухе шахты в районе сгоревших холодильников	5.1. Сохранить работоспособность холодильников, обеспечить возможность вертикальных перемещений холодильников в местах выводов трубок через кожух печи	Капитальный ремонт II разряда
		5.2. Величина зазоров должна быть согласно п. 3.2	Капитальный ремонт II разряда

Продолжение таблицы 10.7

1	2	3	4
6	Вертикальная трещина в верхней части кожуха шахты	Увеличить зазор между кладкой и кожухом шахты	Капитальный ремонт II разряда
7	Выпучивание кожуха печи	7.1. Закачать за кожух раствор из мертеля	Во время эксплуатации
		7.2. Заменить кладку и заполнение зазора, обеспечить газонепроницаемость	Капитальный ремонт II разряда
8	Трещины на куполе печи	8.1. Обеспечить надежное крепление купольных плит к кожуху купола печи	Капитальный ремонт II или III разряда
		8.2.Торкретировать купол печи	Капитальный ремонт II или III разряда
9	Перегревы и трещины на кожухе шахты	9.1. Закачать за кожух раствор из мертеля	Во время эксплуатации
		9.2. Заменить кладку и заполнение зазора, обеспечить газонепроницаемость	Капитальный ремонт II разряда
		9.3. При наличии кронштейновых холодильников заменить их на плитовые	Капитальный ремонт I и II разряда

Окончание таблицы 10.7

1	2	3	4
10	Отрыв мораторного кольца от колонн, кольцевые трещины в месте стыка кожуха шахты или горна и кольца	Увеличить зазор между кладкой и кожухом шахты	Капитальный ремонт II разряда

В таблице 10.8 приведены рекомендации по возможным методам устранения причин повреждений в кожухах воздухонагревателей.

Таблица 10.8

Рекомендуемые методы устранения причин, вызывающих дефекты и повреждения кожухов воздухонагревателей

№ п/п	Наименование повреждения	Методы устранения причины повреждения	Время устранения
1	2	3	4
1	Трещины в зоне штуцеров	1.1. Изменение схемы прямого воздухопровода горячего дутья с установкой замкнутых компенсаторов	Капитальный ремонт I разряда
		1.2. Установка предварительно напряженных пружин на опорах прямого воздухопровода горячего дутья	Капитальный ремонт I или II разряда
2	Горизонтальные трещины	Увеличить компенсационные зазоры под куполом	Капитальный ремонт II разряда

Окончание таблицы 10.8

1	2	3	4
3	Перегревы и выпучивания в верхней части кожуха	3.1. Закачать за кожух раствор	Текущий ремонт
		3.2. Замена дефектных участков кладки	Капитальный ремонт I или II разряда
		3.2. Заполнение компенсационных зазоров матами из деформативного материала	Капитальный ремонт I или II разряда
4	Подъем днища с разрывом анкеров	Увеличить компенсационные зазоры между кожухом и кладкой стен, под куполом, а также зазоры между насадкой и футеровкой стен	Капитальный ремонт I или II разряда

§ 10.5. Рекомендации по ремонту дефектов и повреждений кожухов доменных печей и воздухонагревателей

Эксплуатация кожухов агрегатов, работающих под давлением, с трещинами категорически не допускается вследствие угрозы их развития и увеличения вероятности создания аварийной ситуации сооружения.

Все ремонтные работы по устранению дефектов необходимо производить только при давлении внутри агрегата, равном атмосферному. При устранении дефектных мест кожуха печи, требующих применение вставок высотой более 400 мм, необходимы демонтаж холодильных плит и кладки в этой зоне, а также понижение уровня шихты ниже монтируемой вставки.

Не заваренные ранее трещины, а также трещины, на заварку которых отсутствует документация, должны быть нанесены на чертеж развертки кожуха и взяты под систематический надзор.

При повторном возникновении трещины после ее двукратной заварки участок с трещиной необходимо вырезать и на этом месте установить вставку.

Сварные швы вставок неизвестного происхождения подвергают ультразвуковому контролю для определения глубины проплавления и достижения уверенности в том, что другие дефекты отсутствуют.

Если существующая вставка заварена швом с полным проплавлением и класс стали, из которой она изготовлена, отвечает или выше класса стали кожуха, то вставка сохраняется. Производится также определение класса стали вставки и шва, для чего берутся пробы на химический анализ. Если вставка не отвечает перечисленным выше требованиям, то ее необходимо демонтировать и заменить новой.

Существующие накладки неизвестного происхождения площадью менее 1 м^2 разрешается сохранить после проверки качества сварных швов и устранения дефектов при условии проведения систематического надзора за ними. Накладки неизвестного происхождения площадью более 1 м^2 необходимо срезать с сохранением основного металла, устранить имеющиеся под ними дефекты. В случае, если накладка перекрывает проем, то в него должна быть установлена вставка.

Перегретые участки кожуха (о чем можно судить по изменению цвета кожуха) подвергаются тщательному осмотру с целью выявления трещин и местных деформаций. Обнаруженные трещины должны быть заварены.

Выпучины, вмятины и другие деформированные участки кожуха общей площадью деформации более 1 м^2 и стрелкой прогиба на шаблоне длиной 1500 мм (превышающей 40 мм) должны быть вырезаны и на их место установлены вставки. Если размеры деформации менее указанных, то эти участки сохраняются с организацией систематического надзора. В этих случаях в зазор между кожухом и кладкой необходимо закачать огнеупорный раствор.

Особое внимание следует уделить ликвидации трещин в основном металле и сварных швах кожуха. Необходимо тщательно установить начало и конец трещины, ее протяженность и разветвленность. Для этого лист кожуха в районе видимой трещины на расстоянии 100–150 мм от предполагаемых ее концов, на ширину 100–150 мм в обе стороны от трещины зачищается шлифовальной машинкой.

При температуре кожуха до 50 °С длина трещины определяется методом ультразвуковой или цветной дефектоскопии, при

более высокой температуре – травлением с осмотром при помощи лупы трех-четырехкратного увеличения.

Для предупреждения дальнейшего распространения трещины на расстоянии 15–20 мм от ее концов засверливаются отверстия диаметром 12 мм на кожухах печей и 5–8 мм на кожухах воздухонагревателей.

Если доступ к ремонтируемому месту с внутренней стороны невозможен, то заварка трещин производится на остающихся технологических подкладках. При этом длина трещины на кожухах доменных печей не должна превышать 1500 мм с шириной раскрытия до 15 мм, для кожухов воздухонагревателей, соответственно 600 мм и 10 мм, а смещение кромок устраняемых трещин должно составлять не более 3 мм или 0,1 толщины листа.

При превышении указанных параметров дефектный участок кожуха заменяется.

Минимальный размер вставки для кожухов доменных печей должен быть не менее 800 мм, для кожухов воздухонагревателей – 300 мм. Все вставки должны быть выполнены с закругленными углами радиусом, указанным в таблице 10.9.

Таблица 10.9

Радиус скругления углов прямоугольной вставки

Размер наибольшей стороны вставки, мм	До 1000	Свыше 1000
Радиус скругления углов, мм	100–150	150–200

Для сохранения проектных размеров оболочки агрегата в местах вставок и снижения уровня дополнительных напряжений от сварки вставки должны предварительно завальцовываться на больший диаметр.

Ручную и автоматическую дуговую сварку конструкций из стали классов С390 и С440, при температуре ниже указанной в таблице 10.10, следует производить с предварительным подогревом участков по 100 мм с каждой стороны соединения в зоне выполнения сварки до температуры 120–160 °С.

Смещение кромок (депланация) листов кожухов доменных печей, превышающее 0,1 толщины листа, но не более 4 мм на любой длине и 5–6 мм на длине до 300 мм, а также на кожухах

воздухонагревателей превышающее 0,1 мм толщины листа, но не более 3 мм на любой длине и 5–6 мм на длине до 300 мм, возможно исправлять наплавкой с созданием плавного перехода величиной, равной пяти величинам депланации.

Таблица 10.9

Допустимые минимальные температуры для выполнения сварочных работ без подогрева металла

Толщина свариваемых листов, мм	Температура °С для стали		
	Мало-углеродистая (класса С255)	Повышенной прочности (класса С345)	Высокой прочности (класса С440)
До 16 включительно	–30	–20	–15
17–30	–20	0	0
31–40	–10	5	0
Свыше 40	0	10	0

Депланации листов в стыках свыше указанных величин следует устранять путем вырезки части кожуха и установкой вставок.

Обнаруженные подрезы в сварных швах следует устранять следующим способом:

– перед заваркой подреза зону поверхности металла шириной 20 мм, прилегающую к подрезу, с обеих его сторон зачистить до металлического блеска;

– подрезы сварных швов, превышающие глубину 1 мм на кожухах воздухонагревателей и 2 мм на кожухах доменных печей, должны быть подготовлены под наплавку путем разделки кромок; подрезы глубиной менее указанных величин в разделке кромок не нуждаются;

– подготовленные под наплавку участки заплавляются на кожухах воздухонагревателей не менее, чем в два слоя, а на кожухах доменных печей – в один слой;

– после выполнения сварочных (наплавочных) работ необходимо обеспечить плавный переход наплавленного металла к основному.

Глава 11 ЭКСПЛУАТАЦИЯ КОЖУХОВ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

§ 11.1. Основные принципы эксплуатации кожухов доменных печей и воздухонагревателей

Как отмечалось, наиболее ответственными конструкциями комплекса доменной печи, несущими на себе основные технологические и строительные функции и определяющими работоспособность комплекса, являются кожухи доменной печи и воздухонагревателей. Поэтому обеспечению их промышленной безопасности, надежности, безаварийной работы и надлежащего технического состояния должно уделяться максимальное внимание.

Надежность и долговечность кожухов доменной печи и воздухонагревателей 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 в объеме и характере мероприятий, проведение которых необходимо для установления и поддержания их пригодности к дальнейшей безаварийной работе.

К общим принципам эксплуатации, обеспечивающим промышленную безопасности кожухов агрегатов доменного комплекса можно отнести следующие:

– контроль соответствия кожуха проекту КМ;

– контроль качества изготовления и монтажа конструкций, исключение их дефектов и повреждений на этих стадиях;

– контроль соответствия устанавливаемого оборудования проекту;

– обеспечение с момента строительства соответствия проекту материалов конструкций и футеровки, компоновки систем «кожух-футеровка», тщательное соблюдение требований к величине и заполнению компенсационных зазоров, объему и качеству сдаточных испытаний;

– немедленное устранение всех дефектов, выявленных при приемке кожуха в эксплуатацию;

– ввод в действие кожухов как листовых футерованных конструкций, находящихся в процессе эксплуатации под действием высоких температур, с инструментальным контролем напряженно-деформированного состояния, обеспечением минимальных взаимных воздействий в системе «кожух-футеровка» и исключением необратимых процессов в футеровке;

– проведение регулярных систематических осмотров кожухов доменных печей и воздухонагревателей;

– систематическая техническая диагностика напряженно-деформированного состояния кожухов с оценкой их технического состояния, необходимой корректировкой параметров технологического процесса и разработкой мероприятий, обеспечивающих промышленную безопасность и безаварийную эксплуатацию;

– организация постоянного наблюдения за техническим состоянием кожухов с целью предупреждения отказов, своевременного выявления дефектов, повреждений и обеспечения требований промышленной безопасности;

– немедленный ремонт всех обнаруженных дефектов и исключение работы агрегатов с недопустимыми повреждениями.

При проведении капитальных ремонтов для решения вопроса о возможности сохранения и использования существующих кожухов необходима оценка технического состояния с определением возможности их дальнейшей эксплуатации, допустимых эксплуатационных режимов работы, необходимости и объемов усиления и пр. Особая роль здесь отводится диагностике технического состояния и мониторингу промышленной безопасности кожухов агрегатов 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, поведение оборудования агрегатов и прочее, чтобы не допустить несанкционированного увеличения нагрузок и воздействий на кожухи, могущих вызвать их повреждение и потерю работоспособности. Следует контро-

лировать уровень напряженно-деформированного состояния кожухов, являющийся обобщенным показателем работоспособности и промышленной безопасности

Действующие в настоящее время в Российской Федерации «Правила безопасности в доменном производстве» ПБ 11-542-03 [33] и аналогичный документ ДНАОП 1.210-1.02-97 [34], действующий в Украине, не включают достаточного спектра требований к числу контролируемых параметров, необходимых для диагностики. Так, согласно этим документам, вновь строящиеся и реконструируемые печи оборудуются лишь приборами контроля температуры кожуха печи по всей высоте. При отсутствии таких приборов температура кожухов печей и воздухонагревателей должна систематически, не менее 2-х раз в месяц измеряться по всей высоте сооружения переносными контактными термопарами 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.

В то же время, к числу таких нагрузок, воздействий и параметров следует отнести:

– избыточное внутреннее давление в агрегатах;
– температурный режим в агрегатах;
– химический состав воздушно-газовой среды, скорость коррозии и истирания конструкций кожухов в процессе эксплуатации;
– режимы работы оборудования;
– состояние футеровки, системы охлаждения и температура поверхности кожухов агрегатов;
– фактическое напряженно-деформированное состояние кожухов печи, воздухонагревателей и других конструкций.

§ 11.2. Диагностика технического состояния кожухов

Диагностика технического состояния кожухов представляет собой комплексную систему мероприятий, предназначенную для обеспечения их надежности и промышленной безопасности в период эксплуатации и своевременного выполнения ремонта и усиления.

Целью диагностики является оценка эксплуатационных параметров и критериев прочности кожухов, 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 поддержания общего ресурса кожухов и, тем самым, осуществление оперативного управления процессом обеспечения их безопасности и эксплуатационной надежности.

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*, включающее:

– 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*, включающее:

– уточнение замерами геометрических параметров оболочек кожухов, установление параметров работы и физико-механических характеристик материала кожухов;
– выявление, обмер и составление ведомостей дефектов и повреждений кожухов;
– анализ результатов и составление заключения о техническом состоянии кожухов.

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 перево-

оружением или модернизацией, проводимых с сохранением существующих кожухов

3. *Специальное обследование*, включающее длительные инструментальные наблюдения.

Специальные обследования проводятся в случаях недостаточности данных для принятия обоснованного решения о техническом состоянии кожуха.

По срокам проведения обследования конструкций различают:

а) периодические обследования, частота которых устанавливается предприятием, исходя из интенсивности эксплуатации и предполагаемого технического состояния кожуха;

б) внеочередные обследования, связанные с повреждениями кожуха, технологическими отказами и авариями на данном или подобных предприятиях, стихийными бедствиями, а также когда техническое состояние кожуха вызывает нарушение технологического процесса.

Для кожухов доменных печей и воздухонагревателей в [30] предусмотрены специальные сроки обследования, которые приведены в таблице 11.1.

Проведение технической диагностики является многофакторной задачей, и критерии, по которым дается оценка состояния кожуха, формализуются только после выполнения комплекса мероприятий, в объем которых входят:

- натурный осмотр кожуха и освидетельствование его состояния;
- инструментальное исследование оболочки кожуха с определением фактической толщины листов, геометрической формы оболочки и качества сварных швов;
- лабораторные анализы материала кожуха с установлением его фактических физико-механических свойств;
- поверочный расчет кожуха с учетом действующих и перспективных нагрузок и воздействий;
- разработка заключения о состоянии кожуха;
- выработка предложений по ремонту, обеспечивающему безаварийную эксплуатацию кожуха;
- разработка необходимой рабочей документации.

Таблица 11.1

Периодичность обследования кожухов доменных печей и воздухонагревателей

Наименование		Среднестатистический ресурс работоспособного состояния, лет	Периодичность освидетельствования		
			Осмотр комиссией	Сроки обследования специализированными организациями	
				Первичное обследование, лет	Вторичное обследование, лет
Кожух доменной печи с полезным объемом, м^3	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 с 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

Для определения и оценки технического состояния кожухов доменных печей, воздухонагревателей выполняется обследование конструкций с выявлением и регистрацией дефектов и повреждений.

Устанавливаемые при этом параметры и методы их определения показаны в таблице 11.2.

Таблица 11.2

Параметры технического состояния кожухов

Параметры	Методы определения
1	2
Соответствие конструкций и футеровки рабочему проекту, требованиям СНиП и других 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 пр.) проектному режиму	Анализ записей в агрегатном журнале и, при необходимости, опрос персонала
Информация о проведенных ремонтах и реконструкциях	Анализ записей в агрегатном журнале и изучение технической документации
Качество сварных швов, особенно в местах их пересечений, примыкания штуцеров, усиления вырезов и проемов в кожухе, усиливающих накладок и пр	Осмотр конструкций, анализ исполнительной документации и записей в агрегатном журнале, контроль сварных швов с оформлением актов
Наличие трещин на внутренней поверхности кожуха воздухонагревателя, связанных с коррозионным растрескиванием под напряжением, преимущественно в околошовных зонах купола и районов кожуха с высокой температурой	Ультразвуковой контроль сварных швов в зонах их пересечения, в местах изменения геометрии кожуха, в местах расположения ребер, стесняющих свободную деформацию

Продолжение таблицы 11.2

1	2
Наличие трещин, выпучиваний и других деформаций конструкций, местных перегревов и повреждений, отклонения от проекта положения, толщины и состава компенсирующих слоев, системы охлаждения и пр.	Осмотр конструкций, анализ актов приемки и записей в агрегатном журнале
Фактическая температура кожухов и других конструкций, находящихся в условиях термических воздействий	Применение инструментальных средств по специально разработанной программе
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

Основные дефекты и повреждения, выявляемые при обследовании, и возможные их признаки, видимые при осмотре конструкций сооружений кожухов доменной печи и воздухонагревателя, приведены в таблице 11.3.

Таблица 11.3

Основные дефекты и повреждения кожухов и признаки их определения

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

Продолжение таблицы 11.3

1	2
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	Взаимное положение кожуха и колонн шахты, вертикальных газоходов и колонн колошникового копра, ремонтных опор под вертикальные газоходы и балок колошниковой площадки
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
Кожух воздухонагревателя	
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

Окончание таблицы 11.3

1	2
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

*Температуру, до которой нагревался металл, ориентировочно определяют по соответствующему цвету остывшей поверхности металла, так называемому цвету «побежалости». На поверхности стали до появления красного свечения видны желтые, синие или радужные цвета, связанные с изменением толщины появившейся окисной пленки. В табл. 11.4 показано ориентировочное соответствие этих параметров температуре нагрева.

Таблица 11.4

Цвет металла	Температура нагрева,°С
Соломенный	220
Золотистый	230
Коричневый	240
Красно-коричневый	250
Пурпурный	260
Фиолетовый	280
Синий (васильковый)	300
Светло-голубой	320
Светло-серый	330–350

Оценку воздействия высокой температуры на сталь, кроме того, можно производить по внешнему виду поверхности кожуха.

В таблице 11.5 [30] приведены рекомендации по определению уровня температурного воздействия и возможной дальнейшей эксплуатации кожуха.

Таблица 11.5

Внешние признаки	Режим температурного воздействия	Результаты испытания на твердость	Заключение об использовании	Проверка твердости
1	2	3	4	5
Участок мало деформирован и имеет на поверхности легко очищаемый нагар и обгоревшую кромку	Непродолжительное при температуре 400–600 °С	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 °С	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 °С	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 °С	Твердость снижена на 30% и более	Непригоден	

Окончание таблицы 11.5

1	2	3	4	5
Участок сильно деформирован и имеет изломы, надрывы, оплавленные и пережженные участки	Длительное при температуре около 1400 °С	Твердость снижена на 30% и более	Непригоден	Обязательна

Оценка защитных свойств существующего антикоррозионного покрытия производится визуально, оценивается по площади разрушения, по степени разрушения и в баллах в соответствии с [8] (табл. 11.6).

Таблица 11.6

Балл по ГОСТ 9.407-84	По площади разрушенного покрытия, % при наличии		По размерам разрушенного покрытия	
	Отслаивание	Коррозия металла	Глубина отслаивания	Диаметр коррозионных очагов, мм
1	Разрушение отсутствует			
2	До 5	До 1	Разрушение внешнего слоя, видимое при увеличении в 10 раз	До 0,5
3	5–25	1–5	Разрушение внешнего слоя, видимое невооруженным глазом	0,5–1,0
4	25–50	5–15	Разрушение грунтовочного 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 в соответствии с [9] требованиями к поверхности в зависимости от планируемой системы восстановления покрытия, которые показаны в таблице 11.7.

Таблица 11.7

Обозначение степени подготовки поверхности перед ремонтным окрашиванием	Степень удаления загрязнений и продуктов	Характеристика подготовленной поверхности
I	Полное удаление старого лакокрасочного покрытия и продуктов коррозии	Удаление окислов до второй степени (не видны невооруженым глазом). Дальнейшая подготовка поверхности проводится, как для вновь изготавливаемых изделий
II	Удаление старого лакокрасочного покрытия, ржавчины, отстающей большими кусками, окалины	На поверхности конструкции остаются прочно прилегающий несплошной слой грунтовки, отдельные точки ржавчины, небольшие куски окалины, плотно прилегающие 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

Дефекты, возникающие при строительстве, должны быть выявлены и устранены до приемки сооружения в эксплуатацию. Обнаруженные после приемки дефекты должны устраняться в соответствии с изложенными выше рекомендациями.

Повреждения, возникающие в процессе эксплуатации, выявляются при осмотрах сооружений, которые должны проводиться регулярно.

§ 11.3. Рекомендации по организации контроля состояния конструкций кожухов доменных печей и воздухонагревателей

В соответствии с практикой и нормативными требованиями на каждом металлургическом предприятии должна быть создана комиссия под руководством начальника доменного цеха с участием главного механика и представителя проектного отдела [14].

Осмотр кожухов этой комиссией производится два раза в месяц. Результаты осмотра, меры по устранению обнаруженных повреждений, объем и качество выполненных работ должны регистрироваться в специальном агрегатном журнале, форма которого приведена в табл. 11.8.

Таблица 11.8.

ЖУРНАЛ

регистрации комиссионных осмотров кожуха доменной печи*

Лещадь доменной печи**

Дата осмотра	Подпись лица, производившего осмотр	Повреждения, обнаруженные при осмотре	Дата ремонта	Перечень выполненных основных работ по устранению повреждений	По какой технической документации устранялись повреждения	Подпись ответственного лица за произведенный ремонт	Замечания начальника цеха, заместителя по оборудованию
1	2	3	4	5	6	7	8

* Соответственно, кожуха воздухонагревателя № и т. д.

** Соответственно, горн, фурменная зона, заплечики и т.д.

Кроме того, распоряжением начальника доменного цеха формируется подчиненная механику цеха бригада слесарей для ежесменного осмотра и ремонта кожухов доменных печей и воздухонагревателей. При осмотре особое внимание обращается на наличие трещин, выпучиваний и перегревов.

Температура кожухов измеряется по всей высоте не менее 2-х раз в месяц. Если стационарные приборы отсутствуют (или неисправны), измерения производятся контактными термопарами.

Результаты осмотра заносятся в журнал учета повреждений кожуха и его ремонтов (табл. 11.9), а обнаруженные дефекты и повреждения (трещины, места нагревов выше 150 °С, вышедшие из строя холодильники и т. п.) заносятся на схему развертки кожуха.

Рекомендуемый примерный порядок осмотра приведен в табл. 11.10. Обнаруженные дефекты и повреждения в виде трещин и перегревов должны немедленно устраняться. Работа агрегатов при незаваренных трещинах не допускается.

При проведении в процессе эксплуатации работ, связанных с прорезкой кожухов (смена поврежденных участков, заварка трещин, врезка люков и т. п.) следует оценить степень повреждения металла коррозией. Места таких вырезов и степень повреждения наносятся на схему кожуха с тем, чтобы накопленный материал мог быть использован при определении объема ближайшего капитального ремонта.

Таблица 11.9

Агрегатный журнал дефектов и повреждений кожуха и его ремонтов

Наименование узла, в котором обнаружено повреждение	Дата и время осмотра	Краткая характеристика повреждения	Должность, фамилия и подпись лица, производившего осмотр	Дата и время ремонта	Перечень работ, выполненных при устранении повреждения	Узлы и детали, замененные при ремонте			Ссылки на рабочую документацию	Подпись механика цеха
						Наименование	Количество	Срок службы		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Таблица 11.10

Рекомендованный график осмотров кожухов доменных печей и воздухонагревателей

Участок осмотра	Персонал, проводящий осмотр	Периодичность осмотра	Лица, ответственные за осмотр
Кожух доменной печи	Сменные водопроводчики	Ежемесячно	Мастер водопроводных работ
Нижняя часть доменной печи до моратора	Мастер доменной печи	Ежемесячно	Старший мастер производства
Кожух доменной печи	Общезаводская комиссия	2 раза в месяц	Начальник доменного цеха
Кожух доменной печи и воздухонагревателей	Сменные газовщики	Ежемесячно	Мастер газового хозяйства
Кожух доменной печи и воздухонагревателей	Слесари дневной бригады участка доменных печей	Ежедневно	Мастер-механик участка
Кожух доменной печи и воздухонагревателей	Мастер-механик участка	1 раз в 7–15 дней	Мастер-механик участка
Кожух доменной печи и воздухонагревателей	Механик доменного цеха	1–2 раза в месяц	Механик доменного цеха

Приложение 1

ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПОРОГОВЫХ КОМПОНЕНТОВ НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОЖУХА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Приведены примеры определения значений пороговых компонентов напряженно-деформированного состояния для двух случаев задувки доменных печей:

– задувка доменной печи после строительства или после капитального ремонта I разряда с заменой кожуха и кладки лещади;

– задувка доменной печи после капитального ремонта II разряда без предварительного выпуска чугуна из ямы разгара лещади.

1. *Определение значений пороговых компонентов напряженно-деформированного состояния кожуха печи при ее задувке после строительства или после капитального ремонта I разряда с заменой кожуха и футеровки*

1.1. Значения величин пороговых напряжений критерию по прочности

В качестве примера рассмотрим доменную печь объемом 5000 м^3.

Для кожуха этой доменной печи применена сталь марки 16Г2АФ с электрошлаковым переплавом. Прокат из этой стали по прочности соответствует классу С440, т. е. $R_{ут} = 440$ МПа.

В этом случае значения пороговых напряжений должны соответствовать прочностным характеристикам материала кожуха, с учетом нормативных коэффициентов и ослабления его отверстиями, а также нормативным данным по температуре поверхности кожуха. Эта величина, с учетом коэффициента условий работы γ_c, коэффициента ослабления $K_{осл}$, коэффициента надежности по материалу γ_m и коэффициента, учитывающего двухосное напряженное состояние $K_м$, может быть принята в качестве значения порогового напряжения $R_п$.

Как отмечалось выше, с учетом равномерного распределения внутреннего давления от всех действующих факторов, в качестве

критерия, характеризующего максимально возможное напряженное состояние, в некоторый запас прочности можно считать достижение кольцевыми напряжениями, определенными с учетом плоского напряженного состояния, пороговых значений.

В соответствии с инструктивными и руководящими материалами коэффициент условий работы принимается $\gamma_c = 0{,}95$, коэффициент ослабления $K_{осл} = 0{,}85$, коэффициент надежности по материалу $\gamma_m = 1{,}15$.

Коэффициент, учитывающий двухосное напряженное состояние, $K_м$ всегда больше единицы и, как правило, равен 1,15, в связи с чем, в запас прочности, он может не приниматься во внимание.

Таким образом, значение пороговых напряжений определится:

$$R_п = \frac{R_{ут}\gamma_c K_{осл}}{\gamma_m} = \frac{440 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}85}{1{,}15} = 308\ \text{МПа}.$$

Тогда значения пороговых напряжений для каждого уровня промышленной безопасности составят:

для первого уровня $R_п \le 308$ МПа;

для второго уровня 308 МПа $\le R_п \le 440$ МПа;

для третьего уровня $R_п \le 440$ МПа.

1.2. Значения величин пороговых радиальных деформаций

Принимаем следующие исходные данные для расчета:

– радиус кожуха 9500 мм;

– толщина стенки кожуха 45 мм.

Исходя из общего условия прочности $\sigma_к \le R_п$, где $\sigma_к = Pr/t$, получаем максимальное суммарное внутреннее давление для каждого уровня промышленной безопасности.

Для первого уровня промышленной безопасности исходим из $R_п = 308$ МПа.

Отсюда, $P = R_п t/r = 308 \cdot 4{,}5/950 = 1{,}45$ МПа

Соответствующее этому давлению увеличение диаметра кожуха печи определится из следующего уравнения:

$$\varepsilon_i = \frac{3\varepsilon_i PD}{8R_п t},$$

где $\varepsilon_i = \sigma_1 / E$.

Приращение диаметра кожуха:

$$\Delta D = D\varepsilon_t = \frac{3PD^2}{8Et} = \frac{3 \cdot 1{,}31 \cdot 1900^2}{8 \cdot 2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 4{,}5} = 1{,}86 \text{ см}.$$

Следовательно, пороговые значения увеличения радиуса кожуха печи составят для первого уровня $R_{рд} = 0{,}93$ см.

Аналогично для второго уровня промышленной безопасности

$$9{,}3 \text{ мм} \le R_{рд} \le 15{,}0 \text{ мм}.$$

Для третьего уровня промышленной безопасности:

$$R_{рд} \le 15{,}0 \text{ мм}.$$

1.3. Значения величин пороговых критериев температуры поверхности кожуха

Исходя из расчетных предположений, нормативных и инструктивных материалов, а также из опыта эксплуатации, в качестве значений пороговой температуры поверхности кожуха можно принять следующие величины:

- для первого уровня промышленной безопасности:

$$R_t \le 80 \text{ °C};$$

- для второго уровня промышленной безопасности:

$$100 \text{ °C} \le R_t \le 80 \text{ °C};$$

- для третьего уровня промышленной безопасности:

$$R_t \le 100 \text{ °C}.$$

Полученные значения пороговых компонентов напряженно-деформированного состояния приведены в таблице 1.

2. *Определение значений пороговых компонентов напряженно-деформированного состояния кожуха печи при ее задувке после капитального ремонта II разряда без предварительного выпуска чугуна из ямы разгара лещади*

В качестве примера для определения пороговых значений компонентов напряженно-деформированного состояния кожуха доменной печи рассмотрим доменную печь объемом 2000 м^3, имеющую следующие геометрические характеристики (по кожуху лещади):

- форма кожуха лещади – цилиндрическая;
- внутренний диаметр – 13208 мм;
- высота кожуха лещади – 7802 мм.

Таблица 1.

Значения пороговых компонентов напряженно-деформированного состояния

Параметр порогового значения	Обозначения	Единицы измерения	Уровни состояния промышленной безопасности		
			Первый	Второй	Третий
			Пороговые значения		
Кольцевые напряжения	$\sigma_к$	МПа	$R_п \le 308$	$308 \le R_п \le 440$	$R_п \le 440$
Радиальные деформации	$R_{рд}$	мм	$R_{рд} \le 9{,}3$	$9{,}3 \le R_{рд} \le 15{,}0$	$R_{рд} \le 15{,}0$
Температура поверхности кожуха	t	^{0}C	$R_t \le 80$	$80 \le R_t \le 100$	$R_t \le 100$

Материал конструкций кожуха – сталь марки 09Г2ДТ(М) по ТУ ЧМТУ/ЦНИИЧМ 157-59 толщиной 43 мм. Сталь этой марки по прочности соответствует классу С345 и при указанной толщине имеет предел текучести $R_{ут} = 285$ МПа.

Доменная печь после остановки простояла 14 месяцев. С учетом выше изложенного и принимая во внимание, что промышленная безопасность здесь ограничивается только первым уровнем, значения пороговых напряжений $R_п$ и управляющих пороговых напряжений $R_{упр}$ составляют:

- для первого и второго этапов задувки:

$$R_п = 285/1{,}15 \cdot 0{,}85 \cdot 1{,}15 \le 242 \text{ МПа},$$
$$R_{упр} = 0{,}65 \cdot 285/1{,}15 \cdot 0{,}85 \cdot 1{,}15 \le 157 \text{ МПа};$$

- для третьего и четвертого этапов задувки:

$$R_п = 285/1{,}15 \cdot 0{,}85 \cdot 1{,}15 \le 242 \text{ МПа},$$
$$R_{упр} = 0{,}8 \cdot 285/1{,}15 \cdot 0{,}85 \cdot 1{,}15 \le 194 \text{ МПа};$$

- для пятого этапа задувки:

$$R_п = 285/1{,}15 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}85 \le 200 \text{ МПа},$$
$$R_{упр} = 0{,}9 \cdot 285/1{,}15 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}85 \le 180.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Байшев Ю. П. Доменные печи и воздухонагреватели (конструкции, эксплуатационные воздействия, свойства материалов, расчеты) [Текст]: монография / Ю. П. Байшев. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 1996. – 993 с. – Библиогр.: с. 43–44, 213–214, 273–276, 333–334, 394–395, 484–487, 592–594, 770–775, 877–884.

2. Большаков В. И. Современные тенденции развития доменного производства [Электронный ресурс] / В.И. Большаков // Новые технологические решения в практике производства чугуна итоги Междунар. науч.-тех. конф., 7–8 июля 2005 г.: тезисы докл. / офиц. сайт Запорожсталь. – Запорожье, 2005. – Режим доступа: http://www.zaporizhstal.com/off-line/news/conference/solutions/reports/Bolshakov.pdf (11.07.2011). – Загл. с экрана.

3. Большаков В.И. Проблема повышения прочности и надежности кожухов доменных печей в работах ИЧМ [Текст] / В. И. Большаков //Труды / Ин-т черн. металлург. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 11: Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – С. 237–246. – Библиогр.: с. 246.

4. Большаков В. И. Научно-технические решения по обеспечению безопасной работы доменных печей в стационарных и переходных режимах [Текст] / В. И. Большаков, Н. М. Можаренко, Л. Г. Тубольцев, Г. Н. Голубых //Труды / Ин-т черн. металлург. – Днепропетровск, 2008. – Вып. 17: Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – С. 283–300. – Библиогр.: с. 300.

5. Большаков В. И. Промышленная безопасность доменных печей при задувке и выдувке [Текст] / В. И.Большаков, Г. Н. Голубых, Н. М. Можаренко, Л. Г. Тубольцев //Труды / Ин-т черн. металлург. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 14: Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – С. 290–309. – Библиогр.: с. 308–309.

6. Большаков В. И. Проблемы промышленной безопасности при эксплуатации доменных печей [Текст] / В. И. Большаков, Л. Г. Тубольцев, Н. М. Можаренко, Г. Н. Голубых // Проблемы доменного тпроизводства: науч.-практ. конф., 14–16 мая, 2008 г.: тезисы докл. – Днепрпетровск, 2008. — С. 39. – Библиогр.: с. 39.

7. Востров В. К. Трещиностойкость и долговечность кожухов доменных печей и воздухонагревателей [Текст] / В. К. Востров // Пром. и гражд. стр-во. – 2007. – № 11. – С. 40–43. – Библогр.: с. 43.

8. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида [Текст]: ГОСТ 9.407-84. – Введ. 1985–01–07. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 7 с.

9. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей перед окрашиванием [Текст]: ГОСТ 9.402-2004. . – Введ. 2006-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 43 с.

10. Горицкий В. М. Восстановление механических свойств стали 09Г2С кожуха доменной печи [Текст] / В. М. Горицкий, А. М. Кулемин // Пром. и гражд. стр-во. – 2005. – № 5. – С. 14–16. – Библиогр.: с. 16.

11. Горицкий В. М. Тепловая хрупкость стали [Текст]: монография / В. М. Горицкий. – М.: Металлургиздат, 2007. – 381 с. – Библиогр.: с. 365–381.

12. Горицкий В. М. Особенности диагностирования технического состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей [Текст] / В. М. Горицкий, Г. Р. Шнейдеров // Пром. и гражд. стр-во. – 1998. – № 5. – С. 11–13. – Библиогр.: с. 13.

13. Горицкий В. М. Причины трещинообразования в куполе воздухонагревателя доменной печи [Текст] / В. М. Горицкий, Г. Р. Шнейдеров, В. П. Малов // Безопасность труда в промышленности.– 2008. – № 11. – С. 21–22. – Библиогр.: с. 22.

14. Грацилев В. М. Реконструкция, ремонт и техническая эксплуатация стальных конструкций доменной печи [Текст]: коллект. монография / В. М. Грацилев, А. Е. Любин, В. Я. Миллер.– М.: Металлургиздат, 1984.– 128 с.: ил. – Библогр.: с.127–128.

15. Грудев Т. Д. Трещинообразование в кожухах воздухонагревателей от локального нагрева [Текст] / Т. Д. Грудев, В. К. Востров, А. Н. Галыбин // Строительная механика и расчет сооружений. – 1982. – № 1. – С. 21–22. – Библиогр.: с. 22.

16. Нагрузки и воздействия [Текст]: ДБН В.1.2-2:2006. – Введ. 2007-01-01. – К.: Минстрой Украины, 2006. – 78 с. – (Система обеспечения надежности и безопасности строительных объектов; Государственные строительные нормы Украины).

17. Ефименко Г. Г. Металлургия чугуна [Текст]: учеб. пособ. / Г. Г. Ефименко, А. А. Гиммельфарб, В. Г. Левченко. – К.: Вища школа, 1874. – 486 с.: ил. – Библиогр.: с. 485–486.

18. Іосилевич О. С. Аналіз критеріїв оцінки напружено-деформованого стану самонесучого кожуха доменної печі великого об'єму [Текст] / О. С. Іосилевич // Будівництво України. – 2006. – № 7. – С. 41–44. – Бібліогр.: с. 44.

19. Инструкция по обследованию и ремонту воздухонагревателей доменных печей [Текст] : утв. Госстроем СССР / рук. А. Л. Крейндель ; ГПИ Днепрпроектстальконструкция – Днепропетровск, 1956. – 22 с.

20. Инструкция по футеровке и сушке доменных печей и их вспомогательных устройств [Текст]: Т-115424: утв. М-вом черн. металург. СССР 23.12.1985: введ. в действие с 01.01.1986 / [рук. В. О. Берзон; исполн.: Н. П. Андрианов, И. В. Петрова и др.]; Гипромез – М.: Металлургиздат, 1985. – 114 с. (Нормативный документ Минчермета СССР. Инструкция).

21. Кандаков Г. П. Повышение надежности и ресурса доменных печей на основе оценки и прогнозирования состояния металла [Текст] / Г. П. Кандаков, В. М. Горицкий, Г. Р. Шнейдеров, В. Д. Мартынчук // Пром. и гражд. стр-во. – 2007. – № 4. – С. 14–16. – Библиогр.: с. 16.

22. Леонидов Н. К. Сооружение и оборудование доменных цехов [Текст]: монография / Н. К.Леонидов. – М.: Металлургиздат, 1955. – 400 с.

23. Любин А. Е. Металлические конструкции комплекса доменной печи. Проектирование. Эксплуатация. Диагностика технического состояния [Текст]: монография / А. Е. Любин. – К.: Сталь, 2010. – 472 с. – Библиогр.: с. 459–465.

24. Любин А. Е. Работа воздухонагревателей в оптимизированном режиме [Текст] / А. Е. Любин, Б. Я. Шаломов // Сталь. – 1977. – № 1. – С. 25–27. – Библиогр.: с. 27.

25. Любин А. Е. О причинах разрушения кладки лещади доменной печи [Текст] / А. Е. Любин, А. А. Медведенко, С. М. Родов, Б. Я. Шаломов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1987. – № 1. – С. 17–18. – Библиогр.: с. 18.

26. Любин А. Е. Современные тенденции развития конструктивных решений металлоконструкций доменной печи [Текст] / А. Е. Любин, Е. С. Иосилевич // Будівельні металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку: V Міжнар. наук.-тех. конф., 19–22 вер. 2006 р.: тези доп. / Укр. наук.-дослід. та проект. ін-т стал. констр. ім. В. М. Шимановського – Київ, 2006. – С. 100.

27. Любин А. Е. Диагностика технического состояния кожуха доменной печи [Текст] / А. Е. Любин, З. А. Шульман // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 3. – С. 123–126.

28. Матвеюшкин С. А. Трещиностойкость кожухов шахты доменных печей [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: спец. 05.23.01 / С. А. Матвеюшкин. – Магнитогорск, 2002. – 16 с.

29. Медведенко А. А. Исследование состояния кожуха воздухонагревателя в зоне местного перегрева [Текст] / А. А. Медведенко, А. Е. Любин, Б. Я. Шаломов // Проблемы прочности. – 1988. – № 3. – С.118–119.

30. Методика определения технического состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей [Текст]: РД 11-288-99: утв. Госгортехнадзором Рос. Федерации 02.06.1999 № 35: ввод в действие с 02.06.1999. – М.: НТЦ «Промышленная безопасность», 1999. – 21 с.

31. Миллер В. Я. Стальные конструкции комплекса доменной печи и газоочистки [Текст]: коллект. монография / В. Я. Миллер, В. А. Корчагин, В. Г. Толоконников. – М.: Стройиздат, 1965. – 279 с.: рис. – Библиогр.: с. 275–276.

32. Можаренко Н. М. Параметры промышленной безопасности работы доменных печей [Текст] / Н. М. Можаренко, Л. Г. Тубольцев, Г. Н. Голубых // Труды / Ин-т черн. металлург. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 14: Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – С.290–310. – Библиогр.: с. 413.

33. Правила безопасности в доменном производстве [Текст]: ПБ 11-542-03: утв. Госгортехнадзором России 24.04.03: обязат. для всех м-в, ведомств, предприятий и орг., независимо от их орг.-правовой формы и формы собственности. – М.: ПИО ОБТ, 2003. – 42 с. – (Безопасность труда России).

34. Правила безпеки у доменному виробництві (ДНАОП 1.210-1.02-97) [Текст]: НПАОП 27.1-1.02-97. – [Чинний від 1997-05-19]. – К.: Охорона праці, 1997. – 61 с.: іл. (Нормативний акт з охорони праці).

35. Сорокин Л. А. Работа конструкций доменных печей [Текст]: монография / Л. А. Сорокин. – М.: Металлургия, 1976. – 351 с. – Библиогр.: с. 347–351.

36. Стальные конструкции [Текст]: СНиП II-23-81*. – Введ. 1982-08-14. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 94 с. – (Нормы проектирования. Строительные нормы и правила).

37. Тубольцев Л. Г. Анализ риска аварий и определение возможного материального ущерба на металлургическом предприятии [Текст] /Л. Г. Тубольцев, Н. И. Падун, Г. Н. Голубых // Труды / Ин-т

черн. металлург. – Днепропетровск, 2006. – Вып. 12: Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – С. 407-420. – Библиогр.: с. 420.

38. Тубольцев Л. Г. Определение и использование производственных показателей в управлении промышленной безопасностью [Текст] / Л. Г. Тубольцев, Н. И. Падун, Г. Н. Голубых, Н. М. Можаренко, А. С. Колесникова // Труды / Ин-т черн. металлург. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 11.: Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – С. 344–357. – Библиогр.: с. 357.

39. Шапиро Г. А. Действительная работа стальных конструкций промышленных цехов Текст]: монография / Г. А. Шапиро. – М.; Л.: Госстройиздат, 1952. – 288 с. – Библиогр.: с. 285.

40. Техническая диагностика и предупреждение аварийных ситуаций конструкций зданий и сооружений [Текст]: коллект. монография / [А. В. Шимановский, В. Н. Гордеев, В. П. Королев и др].; общ. ред. А. В. Шимановский. – К.: Сталь, 2008. – 462 с.: рис., табл. – Библиогр.: с. 452–457.

41. Шульман З. А. Автоматизированная система технической диагностики кожуха доменной печи [Текст] / З. А. Шульман, А. Е. Любин, И. З. Шульман, Е. С. Иосилевич // Будівельні металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку: V Міжнар. наук.-тех. конф., 19–22 вер. 2006 р.: тези доп. / Укр. наук.-дослід. та проект. ін-т стал. констр. ім. В. М. Шимановського – К., 2006. – С. 177–181.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

ГЛАВА 1 Конструктивные формы кожухов доменной печи и воздухонагревателя 9

§ 1.1. Кожух доменной печи 9

§ 1.2. Кожух воздухонагревателя 15

ГЛАВА 2 Назначение и роль кожухов доменных печей и воздухонагревателей 20

§ 2.1. Кожух доменной печи 20

§ 2.2. Кожух воздухонагревателя 23

ГЛАВА 3 Нагрузки и воздействия на кожухи 25

§ 3.1. Кожух доменной печи 25

§ 3.2. Кожух воздухонагревателя 29

ГЛАВА 4 Особенности условий эксплуатации 32

§ 4.1. Доменная печь 32

§ 4.2. Воздухонагреватели 54

ГЛАВА 5 Критерии обеспечения прочности и надежности кожухов доменных печей и воздухонагревателей 62

§ 5.1. Основные принципы обеспечения прочности и надежности кожухов 62

§ 5.2. Взаимосвязь напряженно-деформированного состояния кожухов с параметрами влияния 68

§ 5.2.1. Параметры влияния технологического процесса 69

§ 5.2.2. Параметры влияния конструктивной формы 74

§ 5.2.3. Параметры влияния технического состояния 76

§ 5.3. Анализ материалов экспериментальных

исследований кожухов доменных печей и воздухонагревателей 79

§ 5.3.1. Кожухи доменных печей 79

§ 5.3.2. Кожухи воздухонагревателей 81

ГЛАВА 6 Пороговые значения компонентов напряженно-деформированного состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей 83

§ 6.1. Основные положения по определению пороговых значений 83

§ 6.2. Значение пороговых напряжений по критерию прочности материала кожуха при вводе в эксплуатацию после строительства или после капитального ремонта I разряда 88

§ 6.3. Значение пороговых напряжений по критерию прочности материала кожуха в период задувки печи после ее капитального ремонта без выпуска чугуна из ямы разгара лещади 90

§ 6.4. Значения пороговых величин радиальных деформаций 93

§ 6.5. Значения пороговых величин температуры поверхности кожухов 94

ГЛАВА 7 Особенности организации экспериментального контроля напряженно-деформированного состояния кожухов доменных печей и воздухонагревателей 95

§ 7.1. Основные положения контроля 95

§ 7.2. Методы и средства контроля 101

ГЛАВА 8 Исследование напряженно-деформированного состояния кожуха воздухонагревателя 111

§ 8.1. Основные принципы дислокации средств измерений 111

§ 8.2. Анализ напряженно-деформированного состояния кожуха 112
§ 8.3. Исследование работы узла опирания кожуха воздухонагревателя на фундамент 139
§ 8.4. Исследование работы узла сопряжения высоко- и низкотемпературной зон кожуха воздухонагревателя 174

ГЛАВА 9 Исследование напряженно-деформированного состояния кожуха доменной печи 180

§ 9.1. Основные принципы дислокации средств измерений 180
§ 9.2. Анализ напряженно-деформированного состояния кожуха доменной печи при вводе ее в эксплуатацию после строительства или после капитального ремонта I разряда 183
§ 9.3. Анализ напряженно-деформированного состояния кожуха доменной печи в период задувки ее после капитального ремонта без предварительного выпуска чугуна из ямы разгара лещади 198

ГЛАВА 10 Дефекты и повреждения кожухов доменных печей и воздухонагревателей 213

§ 10.1. О причинах появления дефектов и повреждений 213
§ 10.2. Характеристика дефектов и повреждений кожухов доменных печей 219
§ 10.3. Характеристика дефектов и повреждений кожухов воздухонагревателей 225
§ 10.4. Рекомендации по устранению причин повреждения кожухов доменных печей и воздухонагревателей 230

§ 10.5. Рекомендации по ремонту дефектов и повреждений кожухов доменных печей и воздухонагревателей 234

ГЛАВА 11 Эксплуатация кожухов доменных печей и воздухонагревателей 238

§ 11.1. Основные принципы эксплуатации кожухов доменных печей и воздухонагревателей 238
§ 11.2. Диагностика технического состояния кожухов 240
§ 11.3. Рекомендации по организации контроля состояния конструкций кожухов доменных печей и воздухонагревателей 251

Приложение 1 254
Литература 258

Научное издание

Александр Ефимович Любин

КОЖУХИ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

ДЕЙСТВИТЕЛЬНАЯ РАБОТА ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Л93 Кожухи доменных печей и воздухонагревателей. Действительная работа. Промышленная безопасность. – К.: Изд-во «Сталь», 2011. – 268 с., рис. 106, табл. 28.

Технический редактор В. П. Гаврилова

Компьютерная верстка, техническое редактирование Н. А. Чабан

Подписано в печать 19.08.2011. Формат 60×84/16.

Бумага офсет. Гарнитура Times New Roman.

Печать офсет. Усл. печ. л. 15,63.

Тираж 500 экз. Заказ. № 0272.

ООО «Издательство «Сталь».

02660, ГСП-660, г. Киев, просп. Освободителей, 1,
тел./факс 516-45-02, тел. 516-55-92.