



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

**Институт новых материалов
и технологий**

К. Г. ЗЕМЛЯНОЙ

СЛУЖБА ОГНЕУПОРОВ

Учебно-методическое пособие

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

К. Г. Земляной

СЛУЖБА ОГНЕУПОРОВ

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов вуза, обучающихся
по направлениям подготовки
18.03.01, 18.04.01 — Химическая технология

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2018

УДК 666.76:669.1(075.8)

ББК 35.41я73+34.32я73

З-53

Рецензенты:

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории электрохимического материаловедения Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН *Э. Г. Вовкотруб*;

канд. техн. наук, завлабораторией испытаний и исследований огнеупорных и теплоизоляционных материалов ОАО «ВНИИМТ» *Л. В. Узберг*

Научный редактор — д-р техн. наук, проф. *И. Д. Кащеев*

Земляной, К. Г.

З-53 Служба огнеупоров : учеб.-метод. пособие / К. Г. Земляной. —

Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 172 с.

ISBN 978-5-7996-2398-2

В учебно-методическом пособии систематизированы общие сведения о классификации, конструкциях и элементах футеровки основных видов тепловых агрегатов черной металлургии и промышленности строительных материалов.

Рассмотрены действующие правила и технологии производства огнеупорных работ. Предложен алгоритм и правила разработки дизайна огнеупорной футеровки теплового агрегата под конкретные условия технологического процесса. Представлены методики оценки активности разрушающих факторов, действующих на огнеупорную футеровку, тепловой эффективности и раскладки огнеупорных изделий в рабочем слое футеровки. Приведены примеры расчетов и необходимые справочные данные.

Библиогр.: 49 назв. Табл. 8. Рис. 55. Прил. 2.

УДК 666.76:669.1(075.8)

ББК 35.41я73+34.32я73

ISBN 978-5-7996-2398-2

© Уральский федеральный университет, 2018

Предисловие

Целью изучения дисциплины «Служба огнеупоров» является формирование у студента профессиональных компетенций, позволяющих эффективно осуществлять профессиональную деятельность как в области производства и сбыта высокотемпературных конструкционных и теплоизоляционных материалов, так и в области их практического применения во всех отраслях промышленности.

В ходе освоения курса обучающийся должен приобрести навыки анализа условий эксплуатации выбранного теплового агрегата и его футеровки, теоретического и физико-химического выбора конструкционных и теплоизоляционных материалов, адекватных условиям эксплуатации, инженерного расчета конструкции футеровки теплового агрегата и ее технологических параметров — номенклатуры используемых материалов и изделий, веса, эффективной теплопроводности, штатных графиков разогрева и охлаждения футеровки.

Настоящее учебное пособие позволит закрепить и упорядочить знания и навыки, полученные при изучении базовых дисциплин, а также быстро и квалифицированно решать аналогичные задачи в выпускной квалификационной работе (см. приложение 2) и дальнейшей трудовой деятельности.

1. Тепловые агрегаты в промышленности

Тепловая энергия применяется практически во всех отраслях хозяйственной деятельности в самых разнообразных целях во множестве специальных сооружений, получивших общее название «тепловые устройства».

Согласно принятым в теплотехнике понятиям, наиболее часто встречающиеся промышленные тепловые устройства делятся на следующие характерные группы: тепловые генераторы, теплообменники, тепловые аппараты.

Тепловые генераторы представляют собой устройства, в которых основным теплотехническим процессом является процесс получения теплоты в результате превращения химической, электрической, солнечной, атомной и других видов энергий. Примерами тепловых генераторов являются конвертеры, индукционные и нагревательные электрические печи, различные топки, реакторы химической промышленности, отличающиеся тем, что в них генерация (превращение) теплоты органически сочетается с тем или иным технологическим процессом, а покрытие потребности в теплоте для осуществления технологического процесса может выполняться двумя принципиально различными путями: за счет теплоты, выделяющейся в самом материале, подвергающемся тепловой обработке, и за счет теплоты, поступающей извне.

Теплообменники представляют собой устройства, где происходит процесс теплопередачи от одного теплоносителя другому. Здесь мы имеем дело только с теплотой. Процесс получения теплоты из энергии другого вида практически отсутствует. К теплообменникам также относятся тепловые устройства, в которых кроме передачи теплоты материалу, подвергаемому тепловой обработке, совершается в определенной мере превращение переданной теплоты в тот или иной вид энергии для осуществления технологического процесса. Примерами теплообменников могут служить печи риформирования в химической

промышленности, регенераторы, рекуператоры, котлы-утилизаторы, экономайзеры. Теплообменники могут работать как самостоятельные устройства или представлять собой элемент более сложного теплового устройства, например конвективную поверхность парового котла или воздухонагреватель комплекса доменной печи.

Тепловые аппараты представляют собой устройства, в которых теплота получается из какого-либо вида энергии и передается материалу, подвергающемуся тепловой обработке, причем переданная теплота может быть полностью или частично опять превращена в другой вид энергии (например, химическую) при совершении того или иного технологического процесса. Примерами тепловых аппаратов являются разнообразные сушила, паровые котлы, нагревательные и плавильные печи, дистилляционные аппараты. В тепловых аппаратах процессы получения и использования теплоты нередко переплетаются. Однако основное назначение тепловых аппаратов заключается в целенаправленной передаче полученной теплоты, и именно этот процесс является для них определяющим.

В современной технике процессы получения, передачи и использования теплоты требуют соединить в единое целое десятки наименований оборудования, конструкций, материалов, приборов контроля и регулирования, трубопроводов подачи топлива, окислителя и эвакуации продуктов сгорания и многих других компонентов, т. е. сегрегировать их. Исходя из изложенного, сооружения, служащие для использования и передачи теплоты, принято называть *теплотехническими агрегатами*.

Понятие «промышленная печь» следует определять как теплотехнический агрегат, в котором происходит образование теплоты из того или другого вида энергии и передача ее материалу, подвергаемому тепловой обработке в тех или иных технологических целях. Определяющими теплотехническими процессами в печах являются процессы теплообмена.

Таким образом, современная промышленная печь представляет собой конструкцию, предназначенную для осуществления соответствующего высокотемпературного технологического процесса, основным структурным элементом которой является рабочее пространство, изолированное в тепло- и массообменных отношениях от окружающей среды, в котором формируется необходимое пространственно-временное температурное поле за счет рационального режима взаимодействия тепловой энергии с обрабатываемым материалом, а также

структуры, обеспечивающие контролируемые и управляемые процессы генерации тепловой энергии, движение твердых, жидких и газообразных сред, а кроме того, утилизацию энергетических и материальных отходов производственного процесса.

Современная печь — сложный агрегат, создание и успешная работа которого немислима без соответствующей расчетной базы и высокого уровня автоматизации технологических процессов. В настоящее время разработаны принципиально новые подходы к математическому моделированию их тепловой работы и созданию автоматизированных систем управления, благодаря чему технический уровень печей соответствует мировым стандартам.

Однако срок службы большинства печей определяется стойкостью их футеровки. Учитывая, что количество действующих печей различного назначения в России измеряется несколькими десятками тысяч, ясно, что даже незначительное увеличение их межремонтного срока, уменьшение материалоемкости, повышение энергоэффективности даст ощутимый экономический эффект. Следовательно, важнейшие направления развития печестроительного производства — совершенствование конструкций, технологии возведения и устройства футеровок, а также улучшение организации огнеупорных работ.

При определении конструкций элементов теплотехнических агрегатов, защищенных от высоких температур, шлаков или расплавов слоем из огнеупорных изделий или жаростойкого бетона, параллельно употребляют термины *огнеупорная кладка*, *футеровка* и *обмуровка*. Однако несмотря на то, что эти термины — синонимы, существуют следующие оттенки, определяющие отличие одного понятия от другого:

- огнеупорная кладка — система печного ограждения из отдельных (штучных) огнеупорных изделий;
- футеровка — защитная внутренняя облицовка тепловых агрегатов (металлургических, химических, энергетических) и их элементов (печей, топок, ковшей, боровов, труб и др.), а также химических аппаратов, травильных ванн, помольного оборудования и т. п. из всех видов материалов;
- обмуровка — система теплоизоляционного ограждения теплового агрегата с температурой эксплуатации не более 1000 °С, чаще применяемая при тепловой защите котлов и в ряде других случаев (например, обмуровка кессона мартеновской печи и т. п.).

1.1. Классификация промышленных печей

Промышленные печи можно классифицировать по различным признакам: назначению, характеру протекающих процессов, виду топлива, способу выделения тепла, устройству рабочего пространства, способу обслуживания, способу использования тепла отходящих газов и т. д. Наиболее просто для характеристики печей классифицировать их по четырем основным признакам.

По технологическому назначению

1. Плавильные печи, служащие для плавки материалов (металлов, минералов, стекла и т. д.). К ним относятся доменные и мартеновские печи, вагранки, печи для плавки цветных металлов, стекловаренные и др.

2. Нагревательные, служащие для нагрева материала перед обработкой давлением: прокаткой — печи прокатных цехов, ковкой или штамповкой — кузнечные печи.

3. Термические, служащие для нагрева материалов с целью их термической обработки — закалки, отпуска, отжига, нормализации и т. д. К ним относятся печи для термической обработки стали, чугуна, стекла и т. д.

4. Обжиговые, служащие для обжига материалов. К ним относятся печи для обжига керамики, извести, цементного клинкера, серного колчедана, углеродистых блоков и др.

5. Сушила, служащие для удаления из материала влаги или органических летучих компонентов, высушивания окрашенных изделий. Это сушила для сушки форм и стержней в литейных цехах, для сушки сырца в керамической промышленности, для сушки дерева и малярные сушила.

6. Печи для перегонки продуктов, служащие для получения из одного продукта другого путем его перегонки. К ним относятся печи нефтеперерабатывающих заводов, печи для получения искусственного жидкого топлива, коксовые батареи, ряд печей химической промышленности.

7. Печи химической промышленности, служащие для нагрева материалов с целью проведения химических процессов.

8. Парогенераторы.

По источнику тепловой энергии

1. Пламенные печи, в которых тепловая энергия получается путем сжигания топлива. В зависимости от вида топлива, на котором они работают, в свою очередь, подразделяются на печи, работающие на твердом, жидком и газообразном топливе.

2. Электрические, в которых нагрев происходит за счет электроэнергии. По виду использования электроэнергии различают электрические печи сопротивления, дуговые, индукционные, контактные, электронные, инфракрасного нагрева.

По конфигурации рабочего пространства

1. Камерные печи, в которых материал в процессе нагрева неподвижно лежит на поду. Температура рабочего пространства камерных печей во всех точках почти одинакова.

2. Проходные, в которых материал постепенно по мере нагрева продвигается от загрузочного конца к выгрузочному. Температура на всем протяжении рабочего пространства поддерживается примерно одинаковой.

3. Методические, в которых рабочее пространство вытянуто в длину. Нагрев материалов в них происходит по принципу противотока. Тепло в печь подается с одного конца, а материал, поступающий с противоположного торца, непрерывным потоком движется навстречу продуктам горения, отводимым у места загрузки материалов. При этом по мере продвижения по печи материал нагревается, а продукты горения, отдавая свое тепло материалу, охлаждаются.

4. С выдвижным подом, представляющие собой камерную печь, у которой для удобства загрузки и выгрузки материалов под выдвигается.

5. С вращающимся подом — кольцевые и карусельные, в которых нагреваемый материал неподвижно лежит на поду, а под, вращаясь, передвигает его по рабочему пространству.

6. Шахтные, рабочее пространство которых расположено вертикально. Материал загружается в них сверху, а удаляется снизу.

7. Барабанные вращающиеся, представляющие собой расположенный под небольшим углом вращающийся цилиндр. Материал в процессе нагрева в нем, непрерывно перемешиваясь, постепенно проходит от верхнего загрузочного конца к нижнему, где и выдается из печи.

8. Туннельные, с рабочим пространством в виде длинного канала; материал передвигается по печи на вагонетках.

9. Муфельные, в которых материал непосредственно не соприкасается с продуктами горения, а помещается в закрытую со всех сторон камеру-муфель. Муфель обогревается снаружи и передает тепло нагреваемому материалу.

10. Башенные, в которых металлическая лента, постепенно перемещаясь при помощи роликов в ряде вертикальных камер, проходит различные стадии термической обработки.

11. Нагревательные колодцы, служащие для нагрева крупногабаритных слитков перед прокаткой на блюмингах и слябингах.

12. Колодцы замедленного охлаждения заготовок, в которых происходит постепенное охлаждение металлических изделий.

13. Ваннные печи-электролизеры, служащие для получения ряда цветных металлов методом электролиза.

По способу использования тепла отходящих дымовых газов

1. Рекуперативные печи, в которых тепло отходящих газов используется для подогрева воздуха или воздуха и газа в рекуператорах.

2. Регенеративные, в которых для тех же целей вместо рекуператоров применяются регенераторы.

3. Печи без использования тепла отходящих газов.

Хотя тепло отходящих газов печей используется часто и для подогрева воды или получения пара в котлах-утилизаторах, но эти устройства находятся, как правило, вне печи, на конструкции самой печи не отражаются и поэтому ее не характеризуют.

В печах с механизированным передвижением материалов часто к характеристике печи добавляют метод передвижения материала, например термическая проходная конвейерная печь, нагревательная методическая газовая печь с шагающим подом и т. п.

1.2. Конструктивные элементы печей. Общие сведения

1.2.1. Фундаменты

Фундаментом называют подземную часть конструкций промышленных печей, предназначенную для равномерного распределения на грунт давления, возникающего от статических и динамических на-

грузок при их работе. Массив естественного грунта, на который опирается фундамент, называется основанием. Для небольших печей фундамент представляет собой простую бетонную плиту, уложенную на уплотненный слой щебня.

При проектировании фундаментов руководствуются следующими общими правилами: давление на грунт должно быть равномерным по подошве фундамента; каждый крупный элемент установки должен иметь самостоятельный фундамент; непосредственно примыкающие друг к другу фундаменты должны иметь одинаковую глубину заложения; глубина заложения должна быть выше уровня грунтовых вод.

В эксплуатации фундамент должен давать минимальную и равномерную осадку. Осадка фундамента не должна превышать 100 мм, а в современных печных комплексах ее оговаривают в пределах 20–30 мм. Неравномерность осадки не должна превышать 0,001 %, т. е. допустимый перекося — 1 мм на 1 метр длины фундамента.

Фундаменты печей сооружают самостоятельно и не связывают с фундаментами зданий и других сооружений. Горизонтальные размеры фундамента определяются допустимым давлением на грунт. Оно колеблется от 60 (для плотных грунтов) до 15 Н/см² (для песчаных и насыщенных влагой глинистых грунтов). Однако у большинства металлургических печей, за исключением шахтных и барабанных вращающихся, давление на грунт не превышает 10 Н/см². Поэтому горизонтальные размеры фундамента обычно выбираются по конструктивным соображениям, учитывающим габариты печи. Они должны быть больше кладки печи на величину, достаточную для размещения гнезд под стойки каркаса.

Геометрическая форма фундаментов может быть разной, поскольку она зависит от конструкции печи и ее размеров. Для небольших печей достаточно простой бетонной плиты, а для крупных сооружают сплошные, ленточные или столбовые фундаменты (рис. 1.1).

Печи с теплым подом, например отражательные, для которых нежелательно охлаждение подины воздухом, сооружают на сплошном фундаменте. Для печей, у которых желательно иметь «холодный» под, охлаждаемый воздухом и подвергающийся периодическим осмотрам, например для электроплавильных, можно использовать ленточный или столбовой фундаменты.

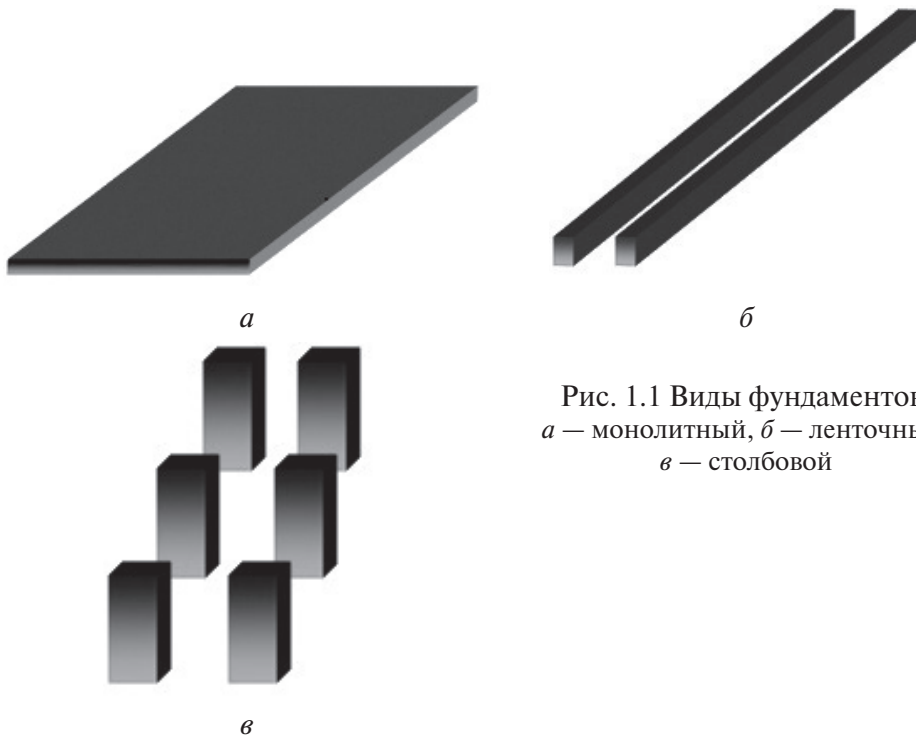


Рис. 1.1 Виды фундаментов:
 а — монолитный, б — ленточный,
 в — столбовой

Глубина заложения фундаментов зависит от свойств грунта, глубины промерзания почвы, уровня грунтовых вод и веса печи. При этом следует остерегаться возможного попадания в фундамент грунтовых вод, что может привести к взрыву. Под фундаментом обязательно должен быть уплотненный слой из щебня толщиной приблизительно 100 мм, непосредственно располагающийся на грунте. Толщина бетонной плиты для печи с площадью пода до 15 м² может быть 300–400 мм, а для печей с подом более 15 м² толщина плиты увеличивается до 500 мм. Бетон армируют стальными прутьями диаметром 12–16 мм. Глубину гнезд для стоек каркаса обычно принимают равной 200–300 мм.

Материалами для сооружения фундаментов печей могут служить бутовый камень, бетон, железобетон, строительный и огнеупорный кирпич. Поверх фундамента, как правило, выкладывается выстилка, играющая роль тепловой изоляции. Слой выстилки должен быть таким, чтобы максимальный нагрев фундамента не превышал 200 °С. В противном случае фундамент необходимо сооружать из жаростойкого бетона или огнеупорного кирпича.

1.2.2. Каркасы промышленных печей

Футеровку промышленных печей во избежание разрушения в процессе службы скрепляют металлическим каркасом. Каркас печи служит для восприятия давления кладки печи при ее тепловом расширении, для противодействия горизонтальному распору, создаваемому арочным сводом, и для закрепления на нем металлической гарнитуры, арматуры, механизмов и другого оборудования.

Листовая обшивка каркаса (кожух) предохраняет наружный слой кладки от механических повреждений и создает газонепроницаемость печи.

В каркасах стоечного типа с гибкими (подвижными) связями противоположные боковые и торцовые стойки связаны друг с другом болтовыми соединениями. При расширении кладки во время разогрева болты отпускают, а при охлаждении кладки — затягивают.

В каркасах жесткой рамной конструкции стойки скрепляются между собой жесткими связями, приваренными к ним, и при работе печи остаются в постоянном положении. Расширение кладки при этом направляется в сторону температурных швов и компенсируется ими.

Иногда устраивается комбинированное крепление: низ стоек закрепляется жестко, а верх — подвижно. Для установки стоек каркаса в фундаментах предусматривают гнезда, для увеличения прочности фундамент с наружной стороны в этих местах армируют.

Иногда применяют стоечные каркасы со сплошной листовой обшивкой. У вертикальных шахтных, барабанных вращающихся печей и сушил каркасы выполняют в виде сплошного кожуха из листовой стали. У печей с арочным сводом для восприятия горизонтального распора вдоль пят сводов кладут подпятовые балки, которые чаще всего изготавливают из швеллеров, а в некоторых высокотемпературных печах их делают водоохлаждаемыми из литой стали или сваренными из листовой стали.

Каждую колонну рассчитывают на полуторную нагрузку на случай, если выйдет из строя соседняя колонна.

Каркасы мартеновских, прокатных, кузнечных и других печей, имеющих распорные своды, рассчитывают с учетом распорных усилий, создаваемых сводом. Расчет распора свода ведут, исходя из самого тяжелого случая, когда свод под воздействием температурных расширений внутренних слоев начинает раскрываться.

1.2.3. Топливосжигающие устройства

В промышленных печах нагрев, обжиг, сушка или плавление материалов происходит в результате выделения энергии путем сжигания твердого, жидкого или газообразного топлива в специальных устройствах.

Топки для твердого топлива. Топка для твердого топлива представляет собой камеру, выложенную из огнеупорного кирпича и отделенную порогом от рабочего пространства печи. Топливо забрасывается в топку через *загрузочное (шуровочное) окно на колосниковую решетку*, а воздух для горения подается снизу под колосниковую решетку — *в зольник*.

В промышленных печах для сжигания угля чаще применяют топки с горизонтальной колосниковой решеткой, выкладываемой или из специальных чугунных колосников трапецеидального сечения, или из стальных брусков сечением $25 \times 25 \times 50$ мм, укладываемых на некотором расстоянии друг от друга.

Иногда вместо брусков применяют чугунные плиты с продольными или конусными отверстиями.

Колосниковая решетка служит для поддержания слоя топлива при горении и равномерного распределения воздуха по всему слою топлива. Зола сгоревшего топлива проваливается в зольник и выгребается оттуда через зольниковое окно. Как *загрузочное*, так и *зольниковое* окна закрываются во время работы печи дверками. Продукты горения затем идут в рабочее пространство печи.

Очень часто в зольник подается только часть воздуха, необходимого для горения топлива. При этом процесс горения заканчивается на решетке не полностью (углерод превращается в окись углерода) и продукты горения, получающиеся при этом, содержат много окиси углерода и водорода, которые дожигаются в рабочем пространстве печи при поступлении дополнительного воздуха, подводимого в верхнюю часть топки.

Это делается для того, чтобы по возможности перенести горение топлива в рабочее пространство печи с целью получить в нем более высокую температуру при одновременном снижении температуры в топке. Воздух, подводимый под колосники, называют *первичным*, а добавочный воздух — *вторичным*. Такие топки называют *полугазовыми*.

Горелочные устройства для жидкого и газообразного топлива. Процесс сжигания топлива можно условно разделить на три основных стадии: смешение топлива с воздухом для горения, подогрев топливовоздуш-

ной смеси до температуры воспламенения и собственно процесс сжигания. Процесс сжигания, т. е. реакция окисления компонентов топлива кислородом воздуха, протекает практически мгновенно. Первые же две стадии требуют значительно большего времени. По этой причине организация смешения определяет весь процесс сжигания, характеристики факела, а следовательно, распределение температур в рабочем пространстве печи и соответствие его технологическим требованиям к агрегату.

В зависимости от технологических особенностей и с использованием классификационных признаков горелочные устройства можно разделить на несколько типов: диффузионные горелки без предварительного смешения, горелки с улучшенным смешением, горелки с регулируемым смешением и горелки с полным предварительным смешением.

К диффузионным горелкам относятся устройства, предназначенные для подачи в топочный объем только газообразного топлива. Подача воздуха осуществляется либо за счет свободной конвекции, либо за счет разрежения в рабочем пространстве агрегата. Причем подсос воздуха происходит, как правило, не через горелочный туннель, а через технологические люки, разгрузочные отверстия или неплотные сочленения элементов печного оборудования.

По такому принципу работают торцевые диффузионные горелки вращающихся трубчатых печей. Горелки устанавливаются на торцевых стенках разгрузочных или загрузочных головок, и через них подается только газ либо мазут и распылитель. Основной поток воздуха подсасывается в печь через разгрузочную течку или неплотности между вращающимся барабаном печи и головкой. Подсасываемый холодный воздух в основном сосредоточен в нижней части печи. Это создает сложность для организованного смешения газа и воздуха.

В горелках без предварительного смешения топливо и воздух подаются непосредственно в горелки. Но в самом устройстве потоки подаваемых сред не контактируют, а только приобретают необходимые скорости и направления истечения в рабочий объем агрегата. Смешение потоков и горение смеси происходит в рабочем объеме по ходу движения струй.

Горелки с улучшенным смешением позволяют почти полностью провести смешение в пределах горелки. В результате этого горение на-

чинает развиваться уже в горелочном туннеле, а в рабочем пространстве или топке оно лишь завершается.

Горелки с регулируемым смещением позволяют за счет подвижных или сменных элементов изменять характеристики факела в зависимости от требований технологического процесса в печи.

В горелках с полным предварительным смешением топливо смешивается с воздухом либо в выносном специальном смесителе, либо непосредственно внутри горелочного устройства. Полное сгорание газа происходит в пределах горелочного туннеля. В рабочее пространство поступают только продукты сгорания.

Большое разнообразие печных агрегатов и их технологических режимов требует индивидуального подхода к выбору горелочных устройств. Выбор горелок следует производить с учетом максимального удовлетворения требований технологии и общих требований к устройствам для сжигания топлива. Поэтому ошибочны высказываемые иногда мнения об универсальности какого-либо одного типа горелок и абсолютном превосходстве этого типа над остальными. Не существует «хороших» или «плохих» типов горелок, а есть только подходящие или неподходящие для данных конкретных условий.

Форсунки для сжигания жидкого топлива. Форсунки можно разбить на три типа:

- высокого давления, в которых распыление мазута производится паром или сжатым (компрессорным) воздухом;
- низкого давления, распыление в которых производится воздухом, подаваемым от вентилятора;
- механические.

Наиболее распространенными форсунками высокого давления являются форсунки конструкции Шухова и Карабина (рис. 1.2, 1.3); низкого давления — конструкции Карабина и Стальпроекта (рис. 1.4 и 1.5).

В механических форсунках распыление происходит вследствие удара тонкой струи жидкого топлива, выходящего с большой скоростью из отверстия форсунки, об атмосферу, находящуюся перед отверстием форсунки. Давление жидкого топлива в механических форсунках составляет 8–10 ат и более. Воздух для горения жидкого топлива в форсунках высокого давления и механических частично засасывается струей распыленного мазута из окружающего форсунку пространства, остальной воздух подают вентилятором.

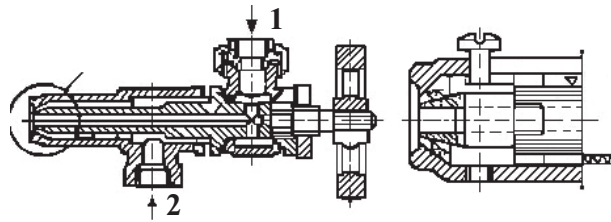


Рис. 1.2. Форсунка высокого давления конструкции Шухова:
1 — подача мазута; 2 — подача воздуха

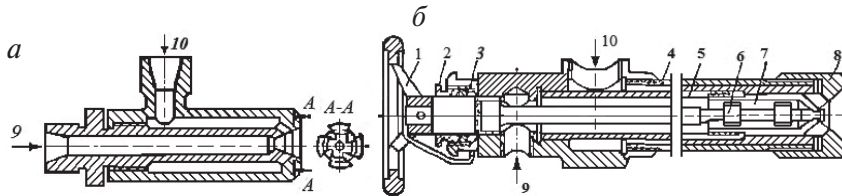


Рис. 1.3. Короткопламенная турбулентная форсунка высокого давления конструкции Карабина: *a* — ФК-I; *б* — ФК-II:
1 — маховик; 2 — нажимная гайка; 3 — сальниковая набивка; 4 — труба наружная для распылителя; 5 — труба внутренняя для мазута; 6 — игла; 7 — сопло внутреннее; 8 — сопло наружное; 9 — подача мазута; 10 — подача воздуха

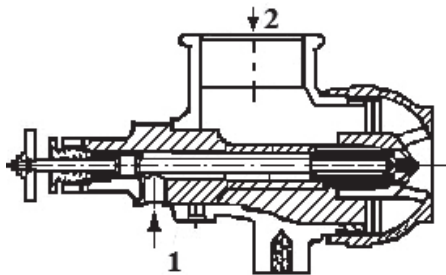


Рис. 1.4. Форсунка низкого давления конструкции Карабина

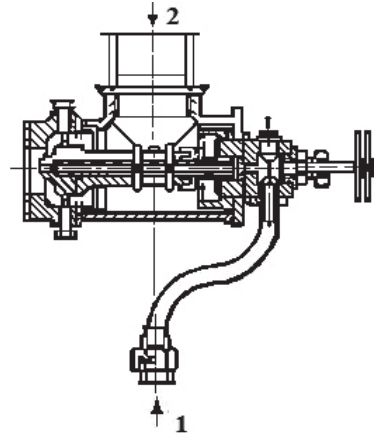


Рис. 1.5 Форсунка низкого давления конструкции Стальпроекта

Для качественного распыления мазута его подогревают в специальных подогревателях (бойлерах с внутренними паровыми змеевиками), а трассу мазутопроводов изолируют совместно с паровым спутником. Температура подогрева мазута не должна превышать 90 °С.

Для установки всей аппаратуры используются фитинги. При монтаже мазуто- и воздухопроводов необходимо контролировать доступность всей аппаратуры и возможность ее легкой замены.

Форсунки высокого давления и механические имеют длинный факел и применяются обычно в больших плавильных и обжиговых печах. Форсунки низкого давления имеют производительность меньше и факел значительно короче, чем форсунки высокого давления, и применяются для нагревательных печей малого и среднего размера, термических печей и сушил.

Горелки для сжигания газообразного топлива. Принципиально газовые горелки можно разбить на две основные группы: горелки с принудительной подачей газа и воздуха и инжекционные, в которых газ (реже воздух) подается под большим давлением и, выходя из сопла с большой скоростью, подсасывает — инжектирует — нужное для горения количество воздуха (или, соответственно, газа).

В горелках с принудительной подачей газ и воздух подаются под давлением 75—150 мм вод. ст. Воздух обычно подается под несколько бóльшим давлением. В горелке низкого давления, показанной на рис. 1.6, газ и воздух, выходя со значительной скоростью (порядка 15—30 м/с) из отверстий на конце горелки, перемешиваются в чугунной форкамере. Окончательное смешение газа и воздуха заканчивается в горелочном туннеле.

В турбулентных (завихряющих) горелках (рис. 1.7) газ и воздух смешиваются в самой горелке.

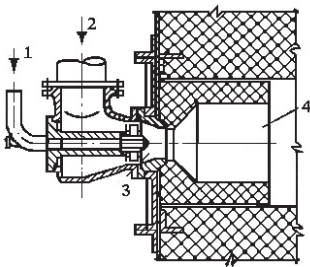


Рис. 1.6. Горелка низкого давления:

1 — газ; 2 — воздух; 3 — форкамера;
4 — горелочный туннель

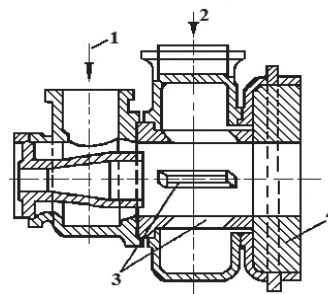


Рис. 1.7. Турбулентная горелка:

1 — газ; 2 — воздух; 3 — щелевидные отверстия для прохода воздуха,
4 — завихритель

Для лучшего перемешивания воздух входит в камеру смешения через ряд продолговатых отверстий перпендикулярно движению газа, что обеспечивает хорошее завихрение воздуха.

К горелкам с принудительной подачей газа и воздуха относятся и керамические горелки, например головки мартеновских и горелки стекловаренных печей. В инжекционных горелках (рис. 1.8) газ подается под давлением 1200–1500 мм вод. ст. и за счет своей энергии обеспечивает необходимый подсос (инжекцию) воздуха.

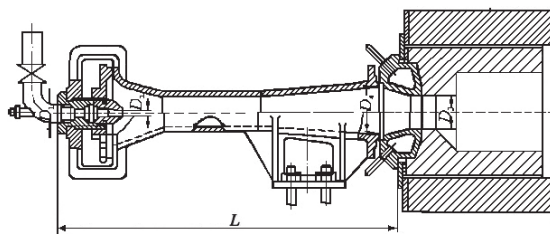


Рис. 1.8. Инжекционная горелка

Горелки монтируют, как правило, на горелочной плите с присоединением газопровода и воздухопровода. Горелки можно устанавливать как на торцевых, так и на боковых стенах печей, а также на своде. Особое внимание должно быть обращено на плотность примыкания горелочной плиты к каркасу, качество кладки в местах горелок, правильную заделку носика горелки в горелочный камень с соблюдением соосности горелки и горелочного камня, на плотность стыков газопровода и горелки.

1.3. Огнеупорные футеровочные работы

Нормативные документы на проведение футеровочных работ

ВСН 315–80	Инструкция по проектированию футеровок тепловых агрегатов нефтеперерабатывающей промышленности из легкого жаростойкого бетона и теплоизоляционных материалов
ВСН 367–76	Инструкция по кладке и футеровке промышленных печей
ВСН 412–80	Инструкция по выполнению футеровок тепловых агрегатов методом торкретирования
ВСН 429–81	Инструкция по проектированию футеровок промышленных печей из огнеупорных волокнистых материалов

СНиП 2.03.04–84	Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур
СНиП III-24–75	Промышленные печи и кирпичные трубы

1.3.1. Основные правила огнеупорной кладки

Кирпичная кладка — это конструкция, состоящая из уложенных в определенном порядке кирпичей (керамических изделий сложной формы), скрепленных между собой огнеупорным раствором (мертелем), сухой просыпкой или без скрепляющего вещества — кладка всухую, в том числе с использованием шлифования поверхностей изделий. Кладка воспринимает собственную силу тяжести и силу тяжести других конструкций, опирающихся на нее вместе с приложенными к ним нагрузками, а также выполняет теплоограждающие, теплоизоляционные функции, противостоит воздействию разрушающих факторов рабочего пространства печи (расплава, печных газов, пылей, высокой температуры и перепадов температур и т. п.).

Кладка состоит из отдельных рядов. В зависимости от положения кирпича в кладке различают ряды ложковые и тычковые (рис. 1.9). Если ребро кирпича направлено вдоль стены, то ряд называют ложковым, если же ребро кирпича направлено поперек стены, то ряд называют тычковым.

Швом в кирпичной кладке называют место примыкания одного кирпича к другому. Для скрепления кирпичей, придания кладке устойчивости, прочности и газонепроницаемости швы заполняют огнеупорным раствором, который является самым слабым местом футеровки. Прочность и газонепроницаемость огнеупорной кладки достигаются за счет спекания самого раствора и его спекания с огнеупорными изделиями или же обеспечением минимального зазора между изделиями за счет качества прилегающих поверхностей изделий.

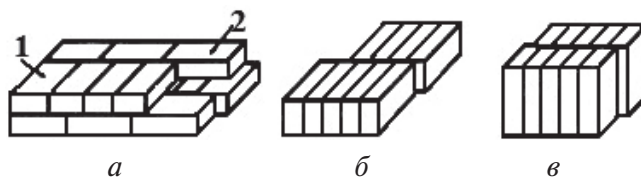


Рис. 1.9. Виды кладки:

a — на плашку: 1 — тычковый ряд, 2 — ложковый ряд;
б — на ребро; *в* — на торец

В зависимости от толщины швов различают следующие категории кладки: вне категории — наиболее тщательная, со швом менее 0,5 мм; I категория — до 1 мм; II категория — до 2 мм; III категория — 3 мм; IV категория — более 3 мм.

По положению в пространстве швы разделяют на *горизонтальные* и *вертикальные*. Вертикальные швы, в свою очередь, разделяются по отношению к продольной оси выкладываемого конструктивного элемента печи, например стены, на *продольные* и *поперечные*.

Вертикальные швы закругленной или кольцевой кладки бывают *радиальные*, т. е. направленные по радиусу, и *кольцевые*. Для предупреждения расслоения кладки и повышения ее газонепроницаемости вертикальные швы перевязывают. Горизонтальные же швы, как правило, не перевязывают, так как под действием силы тяжести вышележащей кладки они хорошо уплотняются. Кроме того, кладка по горизонтальным швам не расслаивается.

Под *перевязкой швов* кладки понимают пересечение вертикальных швов нижележащего ряда кирпичами вышележащего ряда и поперечных вертикальных швов любого ряда — соседними (по толщине кладки) кирпичами того же ряда. На рис. 1.10, *а* показано расслоение неперевязанной кладки кирпичного столбика, на рис. 1.10, *б* — плотная кладка, перевязанная за счет изменения положения кирпичей четного ряда относительно кирпичей нечетного ряда.

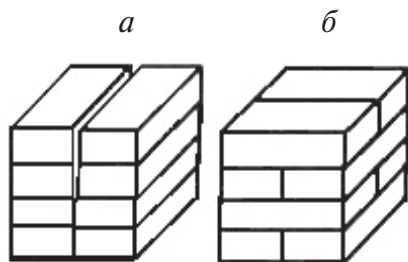


Рис. 1.10. Кладка столбиков без перевязки (*а*) и в перевязку (*б*)

В закругленных стенах правила перевязки радиальных швов точно такие же, как и поперечных швов, а правила перевязки кольцевых швов — как продольных швов в прямолинейных стенах.

При этом перевязывают и вертикальные поперечные швы за счет укладки в начало тычкового ряда двух четвертных или полуторных изделий.

Проемы в стенах. Проемы в стенах перекрывают плоскими или цилиндрическими арками либо напуском кирпичей.

Напуск делают при пролете проема до 450 мм; пролеты менее 210 мм перекрывают напуском одного кирпича; проемы с большим пролетом — напуском из двух кирпичей (рис. 1.11, а). Если проем перекрывают не одним рядом кладки, а несколькими, то в каждом ряду кирпичи напускают до тех пор, пока не перекроется весь проем (рис. 1.11, б).

Проемы с вертикальными гранями выполняют так же, как торцы стен, т. е. с применением трехчетвертных или полуторных изделий.

Круглые проемы малого диаметра перекрывают с помощью шаблона, к которому притесывают примыкающие кирпичи (рис. 1.11, в). При больших диаметрах проемов применяют арочное перекрытие сверху, а внизу притесывают кирпичи, примыкающие к шаблону или к обратной арке (рис. 1.11, г).

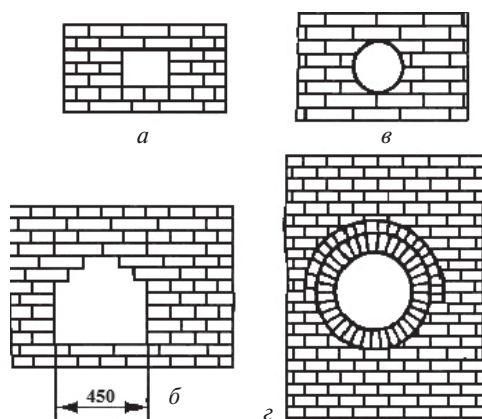


Рис. 1.11. Устройство проемов в стенах:

а — напуском кирпичей; б — напуском ступенями; в — натесом по шаблону;
г — кольцевой полуциркульной аркой

1.3.2. Кладка арок и сводов

Кладка арок. Арки различают по величине отношения стрелы подъема к пролету. Стрелой подъема (подъемом) называют расстояние между прямой линией, соединяющей концы пят в точках опоры арки, и низом замкового (центрального) изделия. Пролетом называют расстояние между пятами. Если отношение подъема к пролету равно $\frac{1}{2}$, такая арка называется полуциркульной, центральный угол при этом

равен 180° . Лучковые арки имеют отношение подъема к пролету менее $1/2$, как правило, центральный угол для лучковых арок может быть $38-120^\circ$.

Плоские арки укладывают по принципу лучковых. Название плоских они получили потому, что нижнюю линию арки выполняют не по образующей, а по прямой линии. Плоские арки устраивают при необходимости ограничения пространства проема. Применение того или иного вида арок диктуется условиями их работы. Если на арку воздействуют значительные нагрузки, то их устраивают полуциркульными, если нагрузки незначительные, то лучковыми.

Чтобы арка была прочной, ее расклинивают замковым изделием, обязательно нечетным, располагаемым по оси симметрии арки (рис. 1.12).

Число замковых изделий зависит от размера пролета. При пролете до 3 м забивают один замок; при пролете более 3 м — три и более замков (число замков должно быть обязательно нечетным), располагаемых на расстоянии не более 1,5 м один от другого и симметрично относительно стрелы подъема. Боковые и центральные замки забивают одновременно.

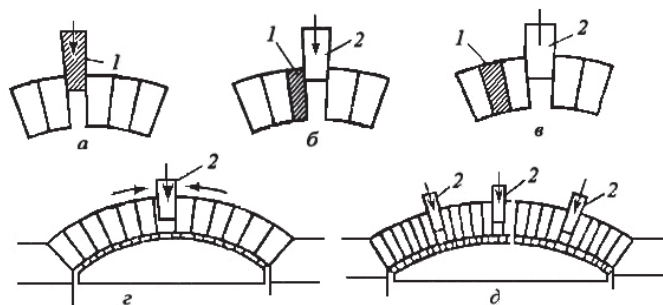


Рис. 1.12. Правила установки и забивки замков:
а, б — неправильно; *в* — правильно; *г* — малый пролет;
д — пролет шириной более 3 м:
1 — тесаные изделия, *2* — замок

Кладку арок ведут, как правило, в перевязку. При толщине оката в полкирпича перевязку осуществляют половинками, при толщине оката в кирпич — полуторными изделиями. Арки можно выкладывать и кольцами. При кладке арок в несколько окатов между окатами устраивают подстилающий слой из густого пластичного раствора, выполняющего в некоторой степени роль температурного шва. Чтобы арка вписалась

в прямолинейную кладку стены, по ней делают натес, т. е. кладку стены, примыкающую к арке сверху и выполненную из отесанных кирпичей, которые укладывают на плашку, на ребро и на торец (рис. 1.13).

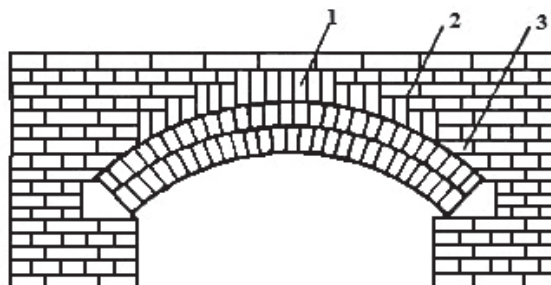


Рис. 1.13. Натес по арке:

1 — на торец, 2 — на ребро, 3 — на плашку

Кладка сводов. Сводом называют конструктивный элемент, ограничивающий сверху рабочее пространство печи или ее вспомогательного устройства. В теплотехнических агрегатах делают своды лучковые, полуциркульные и подвесные. Первые два типа сводов называют арочными. К их кладке разрешается приступать лишь после того, как гибкие связи каркаса затянуты и пяты свода установлены в проектное положение и закреплены.

Существуют два способа кладки сводов — кольцами и в перевязку. В своде, выполненном кольцами, каждое изделие зажато двумя соседями. При разгаре свода, т. е. при уменьшении его толщины в результате оплавления или отколов, достаточно одному изделию провиснуть и упасть, чтобы упало еще несколько или все кольцо, и свод тогда необходимо ремонтировать. В своде, выполненном в перевязку, каждое изделие зажато четырьмя соседними. И если одно из этих четырех соседних изделий в результате разгара ослабнет, провиснет и упадет, то оставшиеся будут удерживаться давлением на них еще трех соседних. Но если условия для разгара свода не будут устранены, то изделия выпадут на большом участке и потребуются остановить печь для ремонта. Для восстановления же одного выпавшего кольца свода не требуется много времени и не приходится останавливать печь. Для этих целей достаточно прекратить подачу топлива в рабочее пространство печи. Поэтому печи, где возможны прогары свода, целесообразнее выкладывать кольцами.

При кладке кольцами каждое кольцо, точнее, части кольца выкладывают от подпьютовых балок к пучку (верхней части свода), а следующие кольца — от поперечной оси симметрии к торцам.

Одновременно ведут кладку трех-четырёх колец с каждой стороны. Толщину швов обеспечивают предварительной подборкой и навёрстованием изделий насухо.

Второй способ заключается в том, что свод отрывают от неподвижной опалубки, дополнительно усиливая тяги. Этот способ применяют лишь в некоторых типах печей, в частности на стекловаренных печах большого пролета. Завинчивать гайки тяг надо одновременно с обеих сторон. Убедившись в том, что свод поднялся и отстал от опалубки не менее чем на 2 см, опалубку разбирают и удаляют из печи.

Подвесные своды (рис. 1.14). Такие своды проектируют для теплотехнических агрегатов с пролетом более 3 м. Их выкладывают из фасонных огнеупорных изделий плоской или рифленой формы, подвешиваемых к каркасу с помощью балок и подвесок из жароупорной стали.

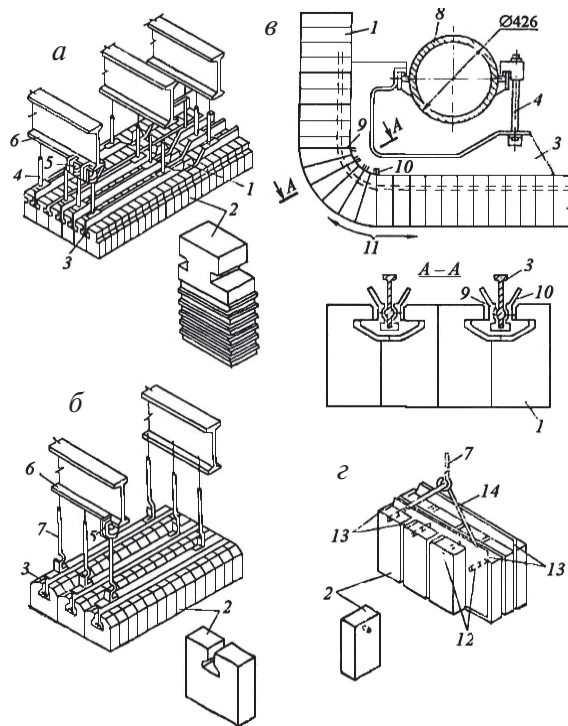


Рис. 1.14. Подвесные своды:

а — из рифленого кирпича; *б* — из гладкого кирпича; *в* — набор криволинейной части; *г* — магнетитохромитовый: 1 — вкладыш; 2 — кирпич; 3 — жароупорные балочки; 4 — болт; 5 — скоба; 6 — сводовая балка; 7 — тяга; 8 — водоохлаждаемая балка; 9 — приливы; 10 — литая деталь; 11 — направление набора свода; 12 — стальной стержень; 13 — стальная прокладка; 14 — подвески

Изделия подвешивают секциями. Для нагревательных печей и котлов наиболее распространены подвесные своды из диначовых, алюмосиликатных или периклазохромитовых изделий — гладких и рифленых. Сводь из рифленых изделий более стойки, так как треснувшие во время эксплуатации изделия держатся своим рифлением за соседние изделия, а также более газоплотны. Быстрота сборки подвесных сводов зависит от качества изготовления и монтажа деталей свода.

До начала подвески свода стены печи доводят до уровня нижней плоскости свода. Дальнейшая кладка стен производится после наборки свода. Между кладкой стен и свода по всему периметру оставляют зазор, заполняемый компенсирующим раствором. Подвесные своды набирают рядами по ширине печи, начиная от продольной ее оси в обе стороны. В местах изгиба подвесного свода, в криволинейных подвесных балочках, изделия закрепляют за приливы, расположенные выше нижнего ребра балочки, с помощью литых деталей. Для этого в клиновых изделиях, укладываемых в месте изгиба, предусмотрены пазы. Криволинейный участок свода начинают набирать с нижней горизонтальной части. После окончания ее кладки набирают сначала клиновые изделия, а затем — изделия вертикальной части участка. Наклонные участки свода набирают, начиная с самой низкой части участка. Свод из гладких изделий кладут на полугустом растворе, а из рифленых — насухо и сверху покрывают уплотнительной обмазкой.

Закругленные стены. При кладке округленных кольцевых стен в перевязку шов выполняют так же, как и при кладке прямых стен, с той лишь разницей, что перевязка вертикальных радиальных швов достигается смещением кирпичей вышележащего ряда относительно ниже лежащего.

Проемы в сводах. Прямоугольные проемы в сводах обрамляют двумя кирпичами (рис. 1.15, а), если ширина их не превышает 210 мм.

Пяты для этих кирпичей вытесывают в кольцах, примыкающих к проему в своде. Если ширина проема больше 210 мм, его перекрывают арками (рис. 1.15, б). Пяты для них затесывают в примыкающих (неразрезанных проемом) кольцах. В арках же затесывают пяты для разрезанных проемов колец.

Круглые отверстия в сводах обрамляют кольцевыми арками (рис. 1.15, в), для которых по шаблону вытесывают пяты. Если толщина кирпича при притеске уменьшается более чем наполовину, кладку на плашку в этих местах заменяют кладкой на ребро.

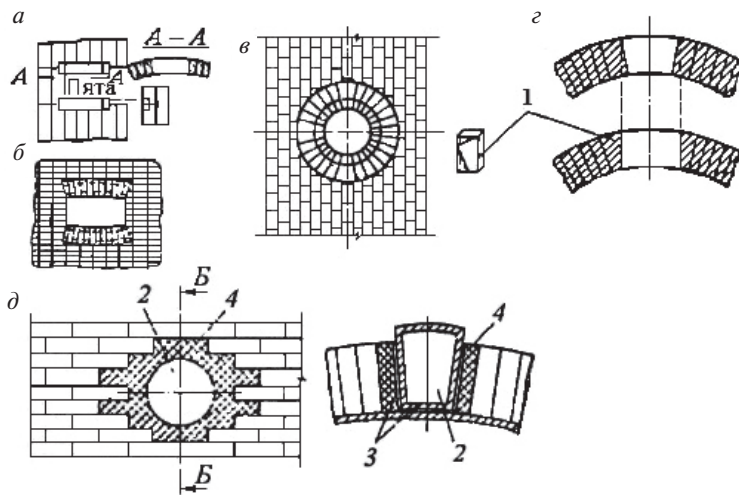


Рис. 1.15. Выполнение отверстий в сводах:

- a* — прямоугольных; *б* — арочных; *в* — крутых; *з* — с вертикальными стенками;
д — из жаростойкого бетона:
 1 — вытезка из кирпича фасонного клина; 2 — конический вкладыш;
 3 — прокладка из рубероида; 4 — жаростойкий бетон

Небольшие круглые отверстия выполняют с помощью шаблона, зазор вокруг которого заливают жаростойкой бетонной смесью. Шаблон делают на конус, чтобы легче было вынуть из уложенной смеси, а чтобы бетонная масса не прилипала к нему, шаблон смазывают минеральным маслом либо обертывают толем или пергамином.

1.3.3. Кладка выстилок, подин и откосов

Подготовка основания под выстилки и подины. До начала кладки выстилки необходимо убедиться в том, что основание для нее подготовлено правильно, т. е. что оно выполнено на проектной отметке и не имеет впадин и выпуклостей. В противном случае поверхность основания выравнивают огнеупорными или строительными материалами.

Кладка выстилки (подины). Кладку выстилки начинают по оси симметрии и ведут в обе стороны к краям. Выполняют кладку так, чтобы ряды были строго прямолинейны.

Кладку обычно ведут параллельными рядами с перевязкой вертикальных поперечных швов. При многослойных выстилках и подинах (рис. 1.16, *a*) для перевязки продольных вертикальных швов по высоте направления в каждом последующем слое их смешают по отношению к предыдущему на $45-90^\circ$.

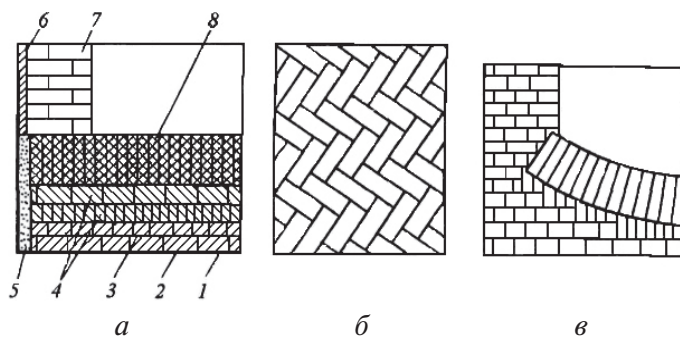


Рис. 1.16. Кладка подин:

а — многослойная подина: 1 — кожух, 2 — легковесный кирпич на ребро, 3 — огнеупорный кирпич на плашку, 4 — огнеупорный кирпич на ребро, 5 — температурный шов, 6 — асбест листовой, 7 — стена, 8 — огнеупорный кирпич на торец; *б* — «в елочку», *в* — обратным сводом

Горизонтальные швы между слоями не перевязывают. Направление продольных швов верхнего ряда выстилки или подины надо выбирать с таким расчетом, чтобы оно было перпендикулярно движению металла, шлака или газов в процессе эксплуатации печи.

В том случае, когда выстилка имеет уклон, нижний ряд выполняют ступенчатым под заданным углом наклона. Уступы формируют набивной огнеупорной массой. Поверхность наклонного ряда проверяют на прямолинейность и отсутствие впадин и выпуклостей рейкой длиной 2–3 м.

В проектах иногда предусматривается выкладка верхнего ряда «в елочку» (рис. 1.16, б). Такая кладка более прочная, но и более трудоемкая. Начинают кладку по оси симметрии выстилки и ведут по шнуру в обе стороны к краям. Углы краев заполняют кирпичами, обрезанными до нужных размеров.

Сферические подины, представляющие собой обратный купол, или обратный свод (рис. 1.16, в), выкладывают по вытесанному по шаблону подстилающему слою. Правильность натеса сферической поверхности проверяют шаблоном или подвижным радиусом. Подстилающие ряды с вытесанной сферической поверхностью часто заменяют слоем жаростойкого бетона, что значительно упрощает выполнение сферы.

Кладка откосов. Откосы выкладывают на плашку тычковыми рядами.

Ложковые ряды применяют только для перевязки вертикальных продольных швов. Уклон откоса создается за счет уступов в каждом ряду кладки по принципу убегающей штрабы.

При кладке откосов необходимо следить за горизонтальностью рядов, перевязкой швов и соблюдением проектной толщины шва. Приемы кладки откосов распространяются и на кладку наклонных стен.

1.3.4. Футеровка цилиндрических трубопроводов

Футеровку цилиндрических газо- и воздухопроводов осуществляют на растворе в перевязку. Футеровка может быть одно- и многослойной. Отдельные слои футеровки не перевязывают между собой. Толщину слоев футеровки при диаметре газо- или воздухопровода до 2,5 м обычно делают в полкирпича, при диаметре более 2,5 м — в один кирпич. Для футеровки применяют клиновые изделия, ребровые тупые и острые, а также торцовые тупые, острые и прямые. Число их зависит от диаметра газовоздухопровода.

Вид изделий для футеровки определяется условиями службы. Она может быть из легковесных огнеупорных изделий и огнеупорных изделий в сочетании с легковесными или выполненной из неформованных материалов — торкретт массы, бетона. Металлическую поверхность газо- и воздухопроводов изолируют асбестовым или каолиновым картоном. При невысоких температурах картон не укладывают. Футеровку ведут участками, ограниченными отрезными температурными швами одновременно в нескольких местах.

1.3.5. Расчет радиальной кладки из огнеупорных изделий

При строительстве и ремонте тепловых агрегатов часто встречается радиальная кладка (конвертеры, ковши, электродуговые и вращающиеся печи, арочные свода и кладки проемов и т. п.). Для максимально плотной укладки изделий при этом типе кладки разработана номенклатура «прямых» и «клиновых» огнеупорных изделий, подбором соотношений которых можно сформировать любой радиус радиальной кладки. Клиновые огнеупорные изделия могут быть с торцевым и ребровым клином (рис. 1.17) с центральным углом соответственно 2,5 и 5°; 5 и 10°.

Правильный расчет соотношения клиновых и прямых изделий позволяет оптимально организовать плотную футеровку и избежать излишнюю теску (резку) изделий.

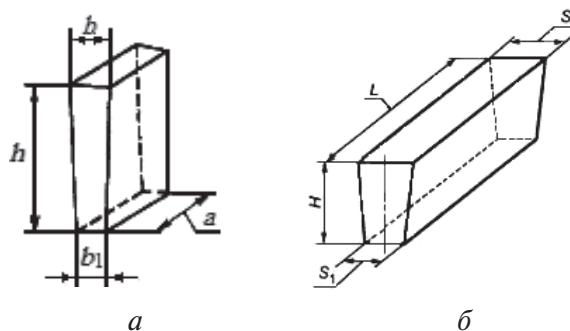


Рис. 1.17. Виды клиновых изделий:

a — торцевой клин: *b* — толстый торец (65 мм), *b*₁ — узкий торец (55 или 45 мм);
б — ребровой клин: *s* — толстое ребро (65 мм), *s*₁ — узкое ребро (55 или 45 мм)

1.3.5.1. Основные формулы для расчета радиальной кладки

Исходными данными для расчета радиальной кладки служат геометрические размеры футеровки (рис. 1.17).

Радиус определяется по формуле

$$R = \frac{a_1 c}{a_1 - a}, \quad (1.1)$$

$$R - c = \frac{ac}{a_1 - a}, \quad (1.2)$$

где *R* — наружный радиус кольцевой (арочной) кладки, мм; (*R* — *c*) — внутренний радиус кольцевой (арочной) кладки, мм; *a*₁ — большая толщина изделия, мм; *a* — меньшая толщина изделия, мм; *c* — толщина слоя футеровки, мм.

Размеры *a*₁ и *a* включают в себя также толщину шва между изделиями, который определяется категоричностью кладки согласно СНиП III–24–75. Количество клиновых изделий может быть подсчитано по формуле

$$K = \frac{2\pi R\Theta}{360a_1}.$$

Подставляя значение *R* из уравнения (1.1), получаем:

$$K = \frac{\pi\Theta c}{180(a_1 - a)}, \quad (1.3)$$

где *K* — количество клиновых изделий в кольце, шт; Θ — центральный угол, град.

В некоторых случаях количество клиновых изделий в одном кольце K может выражаться не в целых числах; при округлении величины K до целого радиус футеровки можно рассчитать по формуле

$$R = \frac{Ka_1}{2\pi}, \quad (1.4)$$

где R — наружный радиус кладки, мм; K — количество клиновых изделий на одно кольцо, шт; a_1 — большая толщина клинового изделия вместе с толщиной шва, мм.

Пусть свод I (рис. 1.18) с радиусом R и центральным углом Θ полностью состоит из клиновых изделий.

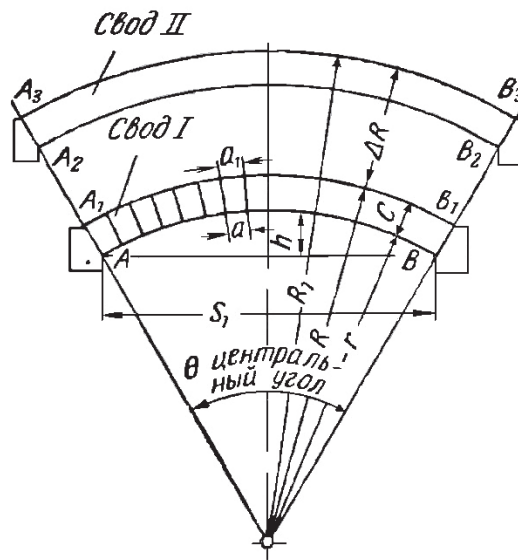


Рис. 1.18. Схема кладки свода из клиновых и прямых огнеупорных изделий

Тогда дуга $A_1 B_1$ равна

$$\cup A_1 B_1 = \frac{2\pi R \Theta}{360}. \quad (1.5)$$

Допустим, что для увеличения радиуса к клиновым изделиям добавили n прямых изделий толщиной a_n каждое. Тогда новая дуга $A_3 B_3$ (свод II) будет больше дуги $A_1 B_1$ на величину na_n и будет равна

$$\cup A_3 B_3 = \frac{2\pi(R + \Delta R)\Theta}{360}. \quad (1.6)$$

Разница между длиной дуги $A_3 B_3$ и $A_1 B_1$

$$na_n = \frac{\pi\Theta\Delta R}{180}, \quad (1.7)$$

где n — количество прямых изделий, шт; a_n — толщина прямого изделия, мм (при расчетах к a_n необходимо добавлять толщину шва, принятую согласно категоричности проектируемой кладки); Θ — величина центрального угла, град; ΔR — увеличение радиуса при добавлении n прямых изделий.

Увеличение радиуса при добавлении n прямых изделий составит

$$\Delta R = \frac{180na_n}{\pi\Theta}. \quad (1.8)$$

Для частного случая, когда к клиновым изделиям добавляются лишь одно прямое изделие, формула (1.8) примет вид

$$(\Delta R)_1 = \frac{180a_n}{\pi\Theta}, \quad (1.9)$$

где $(\Delta R)_1$ — увеличение радиуса, получающееся при добавлении одного прямого изделия, мм.

Количество прямых изделий может быть определено по формуле

$$n = \frac{\pi\Theta\Delta R}{180a_n}, \quad (1.10)$$

где n — количество прямых изделий, шт; Θ — центральный угол, град; ΔR — увеличение радиуса, образующееся при добавлении прямых изделий к клиновым, мм; a_n — толщина прямого изделия вместе с толщиной шва, мм.

Формула (1.10) может быть представлена и в ином виде:

$$n = \Delta R: \frac{180a_n}{\pi\Theta}. \quad (1.11)$$

Учитывая, что

$$(\Delta R)_1 = \frac{180a_n}{\pi\Theta},$$

получим

$$n = \frac{\Delta R}{(\Delta R)_1}, \quad (1.12)$$

где $(\Delta R)_1$ — увеличение радиуса, получающееся при добавлении одного прямого изделия.

1.3.5.2. Кладка из изделий различных марок

Пусть изображенная на рис. 1.19 арка I полностью состоит из острых клиновых изделий, имеющих толщину толстого конца a_1 и тонкого a_2 , а арка III полностью выложена из тупых клиновых изделий с размером толстого конца a_1 и тонкого a_3 .

Количество изделий в арке I обозначим через K .

Для увеличения радиуса арки (кольца) до величины R_2 к изделиям арки I добавим n острых клиновых изделий, которые в данном случае как бы заменяют прямые изделия. При этом дуга $A_2 B_2$ будет в месте швов иметь просветы, как указано на левом участке арки II.

Общее количество изделий в арке II будет равно

$$K + n = \frac{\pi \Theta c}{180(a_1 - a_2)} + \frac{\pi \Theta (R_2 - R_1)}{180 a_1} = \frac{\pi \Theta}{180} \left(\frac{c}{a_1 - a_2} + \frac{R_2 - R_1}{a_1} \right). \quad (1.13)$$

Общая протяженность просветов на всей длине арки составит

$$a_1 n - a_2 n = n(a_1 - a_2).$$

Для уплотнения арки (кольца) и заполнения просветов часть острых клиновых изделий необходимо заменить тупыми, имеющими меньший центральный угол.

Для заполнения всех просветов потребуется $\frac{n(a_1 - a_2)}{a_3 - a_2}$ тупых кли-

новых изделий.

Обозначим через K_1 количество тупых клиновых изделий в арке II и через K_2 — количество острых клиновых изделий, получим

$$K_1 = \frac{\pi \Theta (R_2 - R_1)(a_1 - a_2)}{180 a_1 (a_3 - a_2)}, \quad (1.14)$$

$$K_2 = \frac{\pi \Theta}{180} \left(\frac{c}{a_1 - a_2} + \frac{R_2 - R_1}{a_1} \right) - K_1, \quad (1.15)$$

где K_1 — количество тупых клиновых изделий, шт; K_2 — количество острых клиновых изделий, шт; Θ — центральный угол арки, град; R_1 — наружный радиус арки, выложенный только из тупых клиновых изделий, мм; R_2 — наружный радиус арки, выложенный из острых клино-

вых изделий, мм; a_1 — большая толщина острого и тупого клинового изделия вместе с толщиной шва, мм; a_2 — меньшая толщина острого клинового изделия, мм; a_3 — меньшая толщина тупого клинового изделия, мм.

1.3.6. Монолитные футеровки

Монолитные ограждения выполняют из огнеупорных бетонов или набивных масс. По сравнению с огнеупорной кладкой монолитные ограждения имеют несомненные преимущества. Их применение позволяет индустриализировать изготовление, сократить трудозатраты в 3–4 раза, сроки строительства — в 2–4 и стоимость конструкции в 1,5–2 раза. Они дают возможность выполнять изделия любых размеров и формы, хорошо сочетаются с принудительно охлаждаемыми металлическими поверхностями, облегчают проведение горячих ремонтов. Монолитные ограждения во многих случаях имеют более высокую стойкость и длительность межремонтной кампании, чем огнеупорная кладка. Монолитные ограждения используются все шире, дают значительный технико-экономический эффект и имеют большие перспективы.

1.3.6.1. Торкретирование

Торкретирование — безопалубочный метод нанесения бетонных футеровок под давлением. Находит все более широкое применение при ремонте и монтаже футеровки теплотехнических агрегатов. Торкрет-бетонные футеровки обладают высокой механической прочностью и низкой газо- и воздухопроницаемостью, могут наноситься на металлическую поверхность и на огнеупорную кладку. Существуют два способа торкретирования: мокрый и факельный. В первом случае сухая бетонная смесь предварительно увлажняется в смесителе и под давлением подается к соплу в виде раствора. Факельным способом, при котором сухую бетонную смесь с химическими или органическими связующими подают под давлением в горящий факел, пользуются при горячих и профилактических ремонтах, которые проводят без охлаждения теплотехнического агрегата.

Торкрет-бетонные футеровки наносят с помощью торкрет-машин периодического и непрерывного действия. Торкретируемая поверхность должна быть очищена от отслаивающейся оплавленной корки, окалины, масла и грязи. Проще всего это выполняется с помощью пескоструйного аппарата металлическим песком крупностью

2–3 мм. Наносят торкрет-бетонную смесь участками (картами) размером 1×1 м вращательными круговыми движениями сопла, которое должно находиться на расстоянии 0,7–1,2 м от торкретируемой поверхности, перпендикулярно ей. Для контроля толщины слоя к кожуху приваривают дистанционную арматуру из скоб и маячных колец или штыри (рис. 1.19).

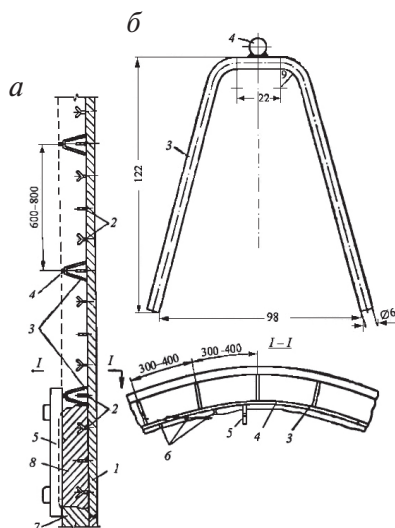


Рис. 1.19. Устройство маяков для торкретирования:

- a* — установка шаблона по маякам; *b* — маячная скоба и кольцо:
 1 — кожух; 2 — арматурные стержни; 3 — маячные скобы 06 мм;
 4 — маячные кольца 08 мм; 5 — шаблон; 6 — пазы от шаблона;
 7 — ранее нанесенный торкрет; 8 — вновь нанесенный торкрет-слой

Торкретированием часто пользуются при восстановлении футеровки теплотехнических агрегатов.

Факельное торкретирование применяют для ремонта конвертеров, электропечей, мартеновских и других плавильных высокотемпературных печей. Чтобы избежать расслоения пульпы и возникновения пробок, торкрет-массы для мокрого торкретирования состоят из мелких, не более 2 мм, зерен. Они обладают хорошей адгезией, и налипание при мокром торкретировании осуществляется почти равномерно. Кислые торкрет-футеровки выполняют на полимерных фосфатных связках, обладающих повышенной стойкостью при воздействии высоких температур и способствующих быстрому затвердеванию и упрочнению нанесенного слоя.

1.3.6.2. Укладка огнеупорных набивных масс

Набивные массы применяют для забивки зазоров между кладкой и кожухами, кладкой и холодильниками, для набивки подин, а также для замены кладки сложной конфигурации монолитной конструкцией. В качестве вяжущего в этих массах используют коагуляционные, химические и органические связки.

Набивные массы на химических связующих укладывают на очищенную от пыли и мусора поверхность тонкими слоями толщиной в уплотненном состоянии не более 60 мм. Уплотняют слой пневмотрамбовками. При малых объемах работы допускается использовать ручные трамбовки. Укладывают массу сразу не на всю площадь, подлежащую покрытию, а полосами шириной 0,7–0,8 м.

Плотность трамбования считается достаточной, если при сильном нажатии рукой стальной стержень входит в утрамбованную массу на глубину не более 5 мм. Одна укладываемая полоса должна примыкать к другой ступенями или по наклонной плоскости. Перед укладкой каждого последующего слоя поверхность предыдущего слоя слегка разрыхляют для лучшего сцепления слоев.

Набивные массы разнообразных составов используют для устройства подин нагревательных и электропечей, днищ конвертеров, сводов электропечей, футеровки ковшей, элементов доменных печей, желобов и т. п.

Пластические набивные массы поставляют готовыми к употреблению в герметической упаковке из термоусадочной полиэтиленовой пленки в виде брикетов массой до 50 кг. Брикет массы состоит из нескольких слоев толщиной 50–60 мм каждый, что обеспечивает удобство при ее укладке и трамбовании. Пластические массы делятся на воздушнотвердеющие, приобретающие определенную механическую прочность через несколько суток после вскрытия упаковки; и термотвердеющие, набирающие прочность лишь при их нагревании до высоких температур.

При работе с пластическими набивными массами, готовыми к употреблению, нужно руководствоваться следующим.

1. В пластические массы при изготовлении добавляют воду для придания им максимальной пластичности. Поэтому при хранении в течение продолжительного времени (4–6 мес.) или при нарушении условий хранения влажность снижается, что влечет за собой потерю пластичности и возможную непригодность масс для использования. Перед началом работы массу нужно проверять на пластичность, дела-

ется это так: если, взятая в ладонь, она хорошо скатывается в шарик, то пластичность сохранена и ее можно укладывать.

2. Пласты массы укладывают в стены или подину толщиной не более двух слоев без зазоров по всей рабочей поверхности, после чего проводят тщательное трамбование. Целью трамбования является плотное сцепление всех слоев массы, что не может быть достигнуто при толщине свыше двух пластин, когда удары трамбовки не доходят до нижнего слоя.

3. При неплотном же прилегании пластов одного к другому они расслаиваются, что приводит к ослаблению конструкции.

4. Неравномерность набивки массы при эксплуатации дает многочисленные волосяные трещины, возникающие от неравномерных внутренних напряжений, что также нежелательно и влияет на срок службы.

5. В случае необходимости перерыва в укладке массы на срок свыше 8 ч для предотвращения обезвоживания трамбуемую поверхность покрывают влажной мешковиной. При незначительном перерыве поверхность ранее уложенной массы перед продолжением работы взрыхляют.

6. Необходимо тщательно крепить анкера и качественно трамбовать массу в местах примыкания. Надежно скрепленные с кожухом печи или специальной арматурой керамические анкера обеспечивают прочную связь с уложенной массой. В случае слабого крепления анкеров в процессе эксплуатации легко может возникнуть выпучивание футеровки, приводящее к ее разрушению. При недостаточном сцеплении анкеров с пластической массой по их периметру образуются зазоры, через которые горячие газы могут проникнуть к кожуху.

7. При трамбовании необходимо следить, чтобы на поверхности не образовались глубокие впадины.

8. Для обеспечения выхода пара при разогреве футеровки, смягчения ее усадки и температурного расширения сразу же после укладки в массу металлическим стержнем диаметром 4–5 мм прокалывают вентиляционные отверстия на глубину не менее половины толщины футеровки, шаг 150–250 мм. Кроме того, обычно нарезают русты глубиной до 50 мм квадратами со стороной 1000–1500 мм.

9. При выполнении различных отверстий (рис. 1.20) необходимо применять шаблоны из дерева или металла, обладающих достаточной прочностью. Шаблоны целесообразно оставлять на своем месте

до начала разогрева печи, поскольку они предотвращают возникновение усадочных трещин и просадку верхних слоев.

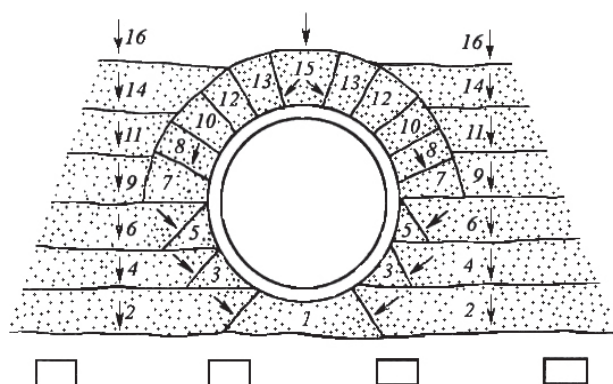


Рис. 1.20. Набивка вокруг отверстия (цифрами показана очередность работ)

1.3.6.3. Укладка жаростойких и огнеупорных бетонов

Сухие бетонные смеси поставляются на рабочую площадку в герметичной упаковке. До начала бетонирования очищают и увлажняют поверхности, на которые будет уложен бетон. Ограждающими вертикальными поверхностями могут служить металлический кожух, кирпичная стенка, стенка опалубки. Ограждения должны быть прочными, плотными и неподвижными, чтобы давление несхватившегося и незатвердевшего бетона не вызвало их смещения и изменения размеров бетонированной конструкции.

Шаг перестановки внутренних вибраторов при малом наконечнике — 25–30 см; у вибробулавы — 40–60 см. Извлекать их следует медленно, иначе на поверхности бетона образуются лунки. Вибрирование в одном месте продолжается обычно до 1 мин, когда прекратится оседание смеси, выделение из нее пузырьков воздуха. Запрещается делать перерывы в бетонировании конструкции.

В железобетонных конструкциях в опалубку устанавливают арматуру в соответствии с проектом по заранее разработанной схеме, предусматривающей такую последовательность работы, при которой уже установленные элементы не мешают установке последующих. Для предохранения от смещения при укладке бетона арматура должна быть прочно закреплена. Закладные детали крепят либо к арматуре, либо к щитам опалубки. Проектные расстояния между стержнями арма-

туры и особенно толщина защитного слоя бетона должны быть точно выдержаны.

В период твердения бетона на гидравлических вяжущих его оберегают от потери влаги (укрывают мешковиной, соломенными матами или другими материалами, а в жаркое время года поливают водой) и обеспечивают температуру твердения в интервале 20–35 °С в течение 3 суток с момента затворения бетона. Опалубку несущих монолитных конструкций из бетона и железобетона можно снимать: для бетонов на высокоглиноземистом и глиноземистом цементах через сутки; для бетонов на периклазовом цементе и жидком стекле — через 3 суток, а для бетонов на портландцементе — через 7 суток после окончания бетонирования; при этом прочность бетона должна быть не менее 70 % от проектной.

1.3.6.4. Нанесение защитной обмазки

Защитные, или огнеупорные, обмазки наносят на внутреннюю поверхность рабочего пространства печи, камер и каналов после просушки кладки. Подлежащую защите поверхность очищают металлическими щетками от подтеков раствора и обдувают сжатым воздухом. Если обмазку наносят на кладку ранее работавшей печи, предварительно отбивают налипший слой шлака, а также отстающие слои старой обмазки. После этого с помощью кисти поверхность кладки увлажняют водой, в нее добавляют ту же клеящую добавку, которую применяют при приготовлении обмазки. Это необходимо для того, чтобы сухой и пористый кирпич не всасывал влагу из нанесенной обмазки и не высушивал ее. Чистую воду для увлажнения применять нельзя, так как в этом случае уменьшается содержание клеящей добавки в обмазке, что отрицательно влияет на сцепление ее с защищаемой поверхностью.

На подготовленную поверхность обмазку наносят широкой плоской кистью или мастерком и затирками ровными слоями за два или три раза. Толщина слоя не должна превышать 1–3 мм, общая толщина нанесенной обмазки должна составлять 5–10 мм. При сушке нанесенной обмазки нужно избегать быстрого нагрева, так как она может растрескаться.

Уплотнительные обмазки наносят на наружные поверхности печной кладки для повышения ее газонепроницаемости. Такая обмазка должна прочно сцепляться с поверхностью кладки и на ее поверхности не должно быть усадочных трещин.

Для уменьшения усадки зерновой состав обмазки подбирают так, чтобы была обеспечена максимальная водоудерживающая способность. Это необходимо для того, чтобы при минимальном содержании влаги обеспечить максимальную подвижность раствора. Минимальное содержание влаги уменьшает усадочные явления, так как чем меньше воды в растворе, тем меньше усадочных трещин в результате ее испарения.

Перед нанесением обмазки поверхность кладки очищают металлическими щетками от наплывов раствора и обдувают сжатым воздухом от пыли, так как пылевая прослойка изолирует поверхность кладки от обмазки, препятствуя их сцеплению. Швы кладки промазывают той же обмазкой, но более густой консистенции. Обмазку наносят на теплую поверхность кладки в период разогрева печи при вводе ее в эксплуатацию. Температура поверхности не должна превышать 70 °С.

1.3.6.5. Технология монтажа изделий из волокнистых материалов

Монтаж изделий из волокнистых материалов ввиду их малой плотности и прочности имеет ряд особенностей, что создает дополнительные сложности. Желательно вести монтаж футеровок на горизонтальные, наклонные или вертикальные поверхности элементов теплотехнических агрегатов, по возможности исключив их нанесение на потолочные и поверхности с обратным уклоном.

Учитывая, что футеровки из волокнистых изделий не обеспечивают герметичности, их, как правило, наносят на металлические листовые конструкции, обладающие жесткостью, позволяющей в процессе монтажа придать им удобное положение для ведения работ.

В большинстве случаев волокнистые футеровки монтируют из нескольких слоев рулонных изделий и плит, собранных в определенной последовательности в пакет и зафиксированных в этом положении при помощи анкерных креплений.

В зависимости от применяемых футеровочных изделий и температур в рабочем пространстве используют различные типы анкерных креплений: металлические, керамические и комбинированные.

Наиболее удобными являются металлические анкерные крепления (рис. 1.21, *a*). Анкер, состоящий из проката, катанки или полосы 2, приваривается к кожуху каркаса 1 и прижимается шайбой 3, закрепляя футеровку. Для изготовления анкерных креплений используют различ-

ные марки жаростойких сталей и сплавов в зависимости от температуры в рабочем пространстве теплотехнического агрегата.

Наиболее простым креплением является анкер с шайбой (рис. 1.21, б), в которой пробито или просверлено отверстие диаметром немного превышающим диаметр анкера. Набранную футеровку 4, 5 прижимают надетой на анкер шайбой, которую затем приваривают ручной дуговой сваркой.

Наибольшую точность установки футеровки необходимой плотности при любой конструкции обеспечивает крепление (рис. 1.21, в), при котором шайба навинчивается на анкер. Однако это анкерное крепление наиболее трудоемкое в изготовлении и, следовательно, наиболее дорогостоящее, что определяет его ограниченное применение.

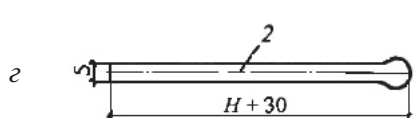
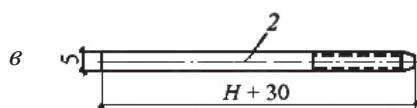
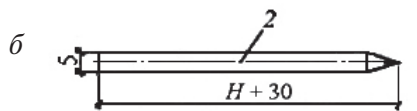
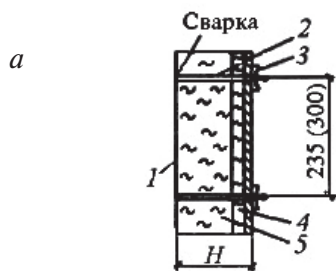
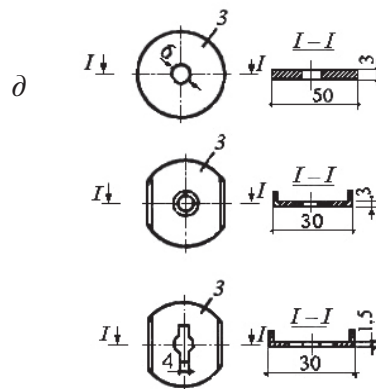


Рис. 1.21. Схема установки и различные виды анкеров:
 а — схема анкерного крепления;
 б — анкер с привариваемой шайбой;
 в — с винтовой шайбой;
 г — с поворотной шайбой;
 д — с многопозиционной шайбой:
 1 — кожух; 2 — анкер; 3 — шайба;
 4, 5 — слои волокнистой футеровки



Анкерное крепление с поворотной шайбой (рис. 1.21, г) обычно используют для крепления футеровок с применением в наружном (рабочем) слое огнеупорного войлока или другого аналогичного рулонного материала. При этой конструкции футеровку фиксируют поворотом шайбы после того, как она надета на анкер с расплюсненным концом, препятствующим обратному ходу шайбы. Хорошие деформации

тивные свойства войлока позволяют при этой конструкции крепления компенсировать возможные отклонения от проектной толщины при наборе наружных изоляционных слоев, в которых часто используют полужесткие минераловатные изделия, обладающие определенной прочностью.

Первой технологической операцией при монтаже футеровки из волокнистых изделий является разбивка на кожухе печи положения анкерных креплений. Обычно ее выполняют с применением специально изготовленных шаблонов, на которых имеются фиксированные положения анкеров, но возможна разбивка с помощью шнура, осевой проволоки, метра или рулетки.

При монтаже футеровки с рабочим слоем из плит точность разбивки мест установки анкеров в значительной степени определяет общую трудоемкость, так как при их несовпадении требуется резка плит, что увеличивает расход и несет значительные убытки.

При рабочих слоях из рулонных материалов ошибки в разбивке влекут за собой меньше неприятностей, ибо их можно исправить, изменяя в определенных пределах величину нахлеста, без увеличения трудозатрат, но это вызывает излишний расход изделий.

Учитывая, что обычно разбивку проводят сразу на значительных площадях, для указания положения анкеров применяют кернение, являющееся гарантией того, что в дальнейшем при сварочных работах результаты этой операции не исказятся.

Металлические анкеры варят ручной дуговой сваркой и при помощи сварочного пистолета. Приварка металлических анкеров при помощи пистолета в несколько раз производительнее и надежнее.

Металлические анкерные крепления наряду с хорошей монтажной технологичностью обеспечивают надежное закрепление футеровки как в обычных условиях, так и при вибрации, ударных и других нагрузках. Однако применение металла допускается до температур 1150 °С даже при использовании нихрома. Обычно хромоникелевые стали обеспечивают надежную службу при нагреве до 1000 °С. В значительном числе нагревательных печей рабочие температуры достигают 1200–1300 °С, и даже при температурах до 1000 °С возможны временные повышения на 100–150 °С. Поэтому возникает необходимость защищать металл креплений от непосредственного воздействия газовой среды или применять конструкции, при которых металлические анкеры располагались бы в зоне с температурами не более 1000 °С.

Наиболее простым решением в первом случае является заглубление анкерного крепления внутрь рабочего слоя футеровки, с тем чтобы установкой пробки, заделкой раствором или высокотемпературным волокном изолировать его от рабочего пространства (рис. 1.22).

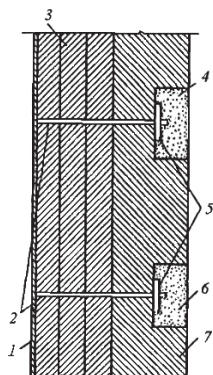


Рис 1.22. Изоляция металлического анкера от непосредственного воздействия факела:

1 — кожух; 2 — стержень анкера; 3 — изоляционные изделия; 4 — гнездо; 5 — шайба; 6 — огнеупорный материал; 7 — плита рабочего слоя

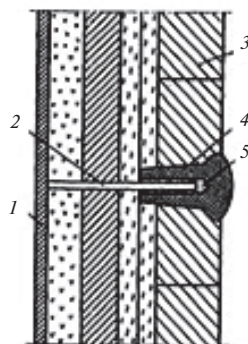


Рис. 1.23. Защита

металлического анкера керамической насадкой:

1 — кожух; 2 — металлический анкер; 3 — футеровка; 4 — керамическая насадка; 5 — огнеупорная масса

Для защиты металлического анкера используют керамическую насадку, которую надевают на металлический анкер с целью его защиты от непосредственного воздействия горячей газовой среды (рис. 1.23).

Такие насадки применяют при футеровках из рулонных материалов, которые крепятся выступающими частями насадки — плечиками. Центральную полую часть насадки забивают огнеупорной массой или волокном.

Технологические операции, рассмотренные выше, легко проводятся на горизонтальных, наклонных и вертикальных поверхностях и значительно усложняются на обратных уклонах, сводах и потолках, так как требуют промежуточного закрепления отдельных слоев футеровок в процессе монтажа. Наиболее удобным и надежным является способ промежуточного закрепления при помощи специальных шайб (рис. 1.24) диаметром 40–50 мм из металла толщиной 0,2–0,3 мм, в которых выполнены фигурные отверстия для прохода анкера в круговые выпуклые пояски для придания им жесткости.

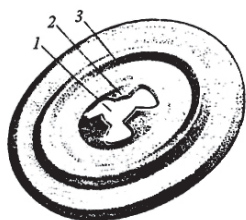


Рис. 1.24. Прижимная шайба:
1 — отверстие для прохода анкера;
2 — держатель; 3 — пояс жесткости

Надев шайбу на анкер, доводят ее до нужного положения, где она и остается, надежно удерживая прижатые ею слои материала.

Относительно новым решением для организации теплоизоляционной волокнистой футеровки является технология применения Z-блоков (рис. 1.25), укомплектованных центральным или боковым креплением.

Модульные блоки могут быть установлены в футеровку «линейным порядком» — рядами с использованием прокладочной полосы между каждым новым рядом (рис. 1.26).

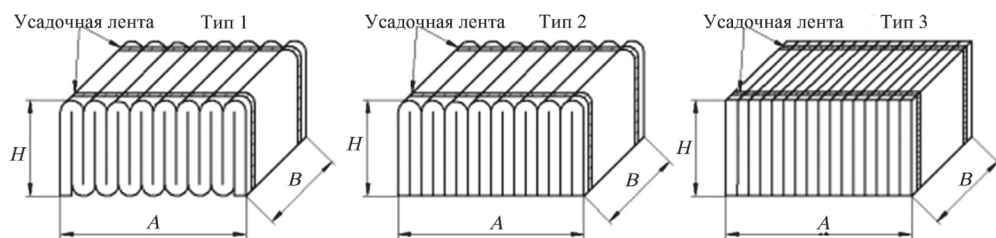


Рис. 1.25. Конструкция Z-блоков

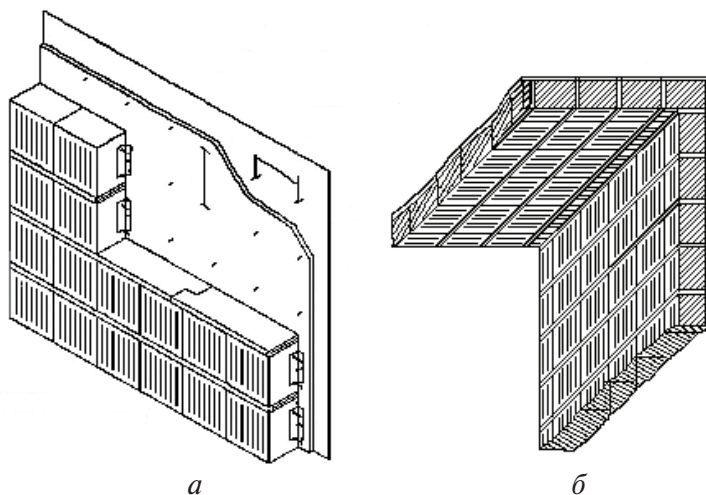


Рис. 1.26. Варианты конструкций теплоизоляционных футеровок с использованием Z-блоков

Перед установкой модулей необходимо зачистить места установки креплений и/или наварить шпильки. При использовании анкерного крепления под установку на шпильки возможно применять подложку из керамического одеяла и/или алюминиевую фольгу для отражающей изоляции и/или пароизоляции. Необходимость использования и выбор подложки зависит от каждого конкретного случая и технологических особенностей каждого конкретного теплового агрегата.

После того как приварены шпильки и уложена подложка, можно устанавливать модульные блоки.

Для того чтобы зафутеровать участки в зоне расположения горелок или проемов дверей, модуль легко подрезать до нужной формы. Подрезать модуль лучше меньше, чем требуется (10–15 мм), и при установке дополнительно сжать модуль. Это обеспечит необходимую плотность блоков для компенсации температурной усадки.

Устройство футеровки из различных огнеупорных волокнистых материалов отличается простотой и не требует специальных навыков. Освоение незначительного количества рабочих приемов позволяет успешно выполнять волокнистые футеровки, что является их существенным технологическим преимуществом. Малая масса волокнистых материалов позволяет свести к минимуму транспортные операции и исключить применение тяжелых монтажных механизмов. Хорошая деформативная способность этих материалов позволяет широко применить в практике печестроения метод домонтажной футеровки — более удобный и экономичный. Значительно повышается ремонтоспособность теплотехнических агрегатов с волокнистой футеровкой. Эти футеровки обеспечивают крайне малую инерционность и, значит, возможность реализации заданного температурного режима, значительную экономию топлива и ряд других преимуществ. К недостаткам их следует отнести малую прочность, невозможность применения при наличии жидкой фазы и незначительные (не выше 1200 °С) температуры службы.

1.4. Технология выполнения многослойных футеровок

Для того чтобы в максимальной степени использовать преимущества волокнистых материалов и исключить их отрицательные свойства, в теплотехническом строительстве применяют комбинированные мно-

гослойные футеровки, в которых рабочий слой чаще всего выполняют из плотных огнеупорных изделий, огнеупорного бетона или торкретбетона, а внутренние изоляционные слои — из различных теплоизоляционных или волокнистых материалов и изделий. Такие футеровки выдерживают значительные механические нагрузки, успешно противостоят эрозионным воздействиям газовых потоков, допускают наличие в рабочем пространстве жидкой фазы, могут служить при температурах, значительно превышающих 1000 °С, и сохраняют при всех этих условиях отличные теплоудерживающие способности, значительно снижают нагрузки на каркас ввиду относительно малой массы, обладают достаточно высокой деформативностью, транспортабельностью и ремонтоспособностью.

Таким образом, ограждения в общем случае имеют определенную конструктивную структуру и по способу изготовления и специфике конструкции могут быть классифицированы на три основных типа (рис. 1.27).

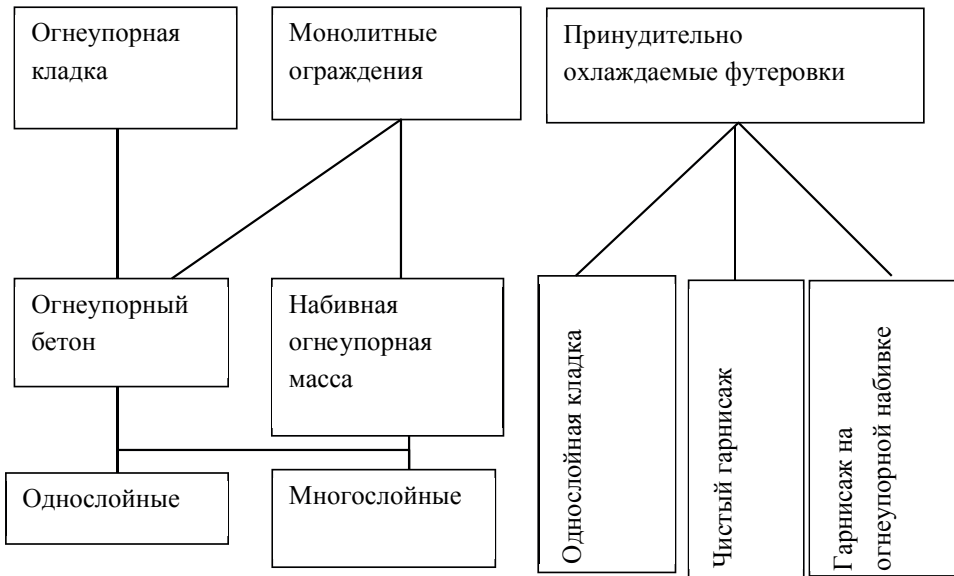


Рис. 1.27. Классификация печных ограждений

В многослойной кирпичной кладке (рис. 1.28) функции слоев разделены: огнеупор противостоит разрушающим воздействиям при высоких температурах, огнеупорное защитное покрытие увеличивает

стойкость огнеупора, легковес и эффективная тепловая изоляция снижают тепловой поток через ограждение, уплотняющий слой его герметизирует.

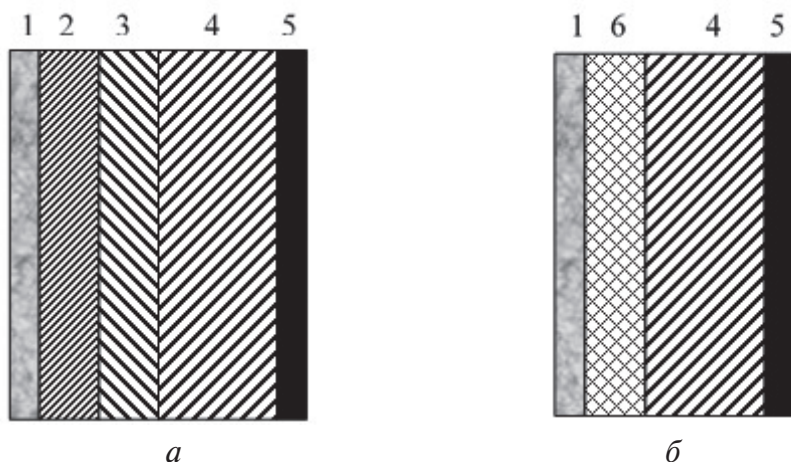


Рис. 1.28. Схема многослойного ограждения с использованием обычной тепловой изоляции (а) и волокнистого огнеупорного материала (б): 1 — металлическая обшивка (уплотняющий слой); 2 — теплоизоляционный слой; 3 — легковес; 4 — огнеупор; 5 — защитный слой; б — волокнистый огнеупорный материал

Огнеупорное покрытие наносится в виде пластичного слоя толщиной 5–15 мм или плазменным напылением частиц слоем толщиной 0,1–0,5 мм из тугоплавких шлакоустойчивых материалов для увеличения стойкости футеровки. Состав огнеупорного покрытия включает чистые оксиды (ZrO_2 , ThO_2 , Al_2O_3 , Cr_2O_3), карбиды (TiC , WC , V_4C), бориды (CrB_2 , ZrB_3) или другие дорогие и дефицитные чистые соединения. Защитное покрытие могут наносить и на легковесную футеровку. Применение огнеупорного покрытия целесообразно, если его шлакоустойчивость на порядок выше, чем у защищаемого огнеупора.

Многослойная кладка по сравнению с однослойной имеет ряд преимуществ. Она менее массивна, имеет меньшую толщину. В результате ее выполнения уменьшается расход огнеупорного материала; снижаются теплоаккумулирующая способность и потери теплоты через ограждение; выравниваются температуры и уменьшаются термические напряжения в слое огнеупора. Это более экономичное и эффективное решение, чем однослойное ограждение.

При выполнении многослойной кладки отдельные слои по толщине стены перевязываются между собой для повышения устойчивости конструкции. При этом огнеупорный кирпич выпускается в слой легковеса, а последний — в слой тепловой изоляции. Для увеличения прочности и газоплотности стен вертикальные швы выполняются вразбежку — со смещением на $1/2$ – $1/4$ кирпича.

Принудительно охлаждаемые ограждения

Для принудительно охлаждаемых футеровок характерно не только отсутствие тепловой изоляции, но и организация наружного охлаждения с целью замедления износа и увеличения длительности межремонтной кампании при форсировке технологического процесса в рабочей камере (рис. 1.29). Использование принудительно охлаждаемой футеровки влечет за собой увеличение тепловых потерь через охлаждаемые стены, поэтому оно должно быть согласовано с условиями работы установки. Однако в местах наибольшего износа кладки промышленных печей всегда целесообразна установка принудительно охлаждаемых элементов.

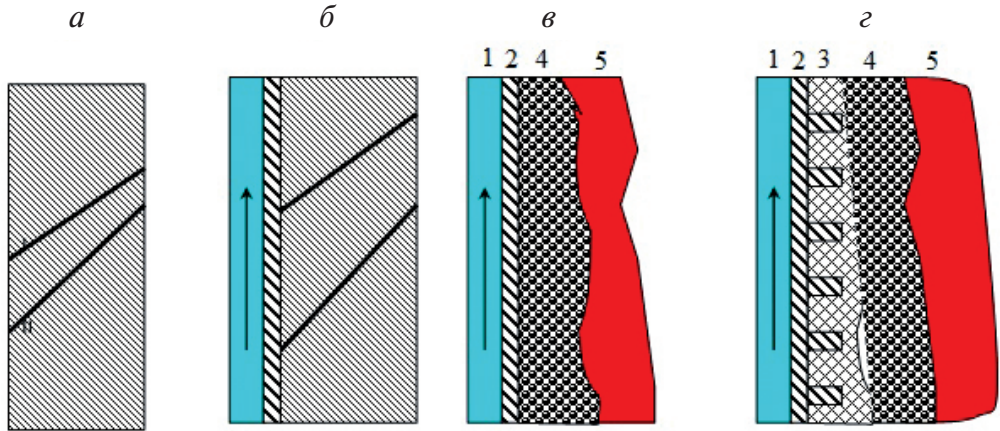


Рис. 1.29. Схемы принудительно охлаждаемой футеровки:

- а, б* — однослойная огнеупорная кладка, охлаждаемая соответственно вентиляторным воздухом и воздухом в металлическом кессоне;
в — чисто гарнисажная кладка, *г* — гарнисажная на огнеупорной набивке:
1 — поток охлаждающей жидкости; *2* — охлаждаемая металлическая стенка;
3 — огнеупорная набивка по шипам; *4* — слой застывшего расплава (гарнисаж); *5* — жидкий расплав

Наружное охлаждение может осуществляться воздушными струями, водой или пароводяной смесью, расплавленными солями, металлами или др. Плотность теплового потока при этом может возрастать до 40–200 кВт/м², однако благодаря форсировке рабочего процесса доля потерь теплоты через ограждения в тепловом балансе оказывается вполне приемлемой (10–15 %).

Принудительное охлаждение однослойной кладки приводит к снижению температуры огнеупора со стороны печного пространства, в результате чего замедляется износ кладки. Такая футеровка применяется при умеренных температурах технологического процесса.

Охлаждение производится струями воздуха или водой. Охлаждение воздухом осуществить наиболее просто, но при этом требуется значительный расход электроэнергии на привод дутьевых устройств. Охлаждение с помощью прикладных металлических коробчатых кессонов с водой более экономично, но появление в процессе эксплуатации зазоров между холодной металлической стенкой и огнеупорной кладкой значительно снижает эффективность охлаждения.

Наиболее эффективно применение испарительного охлаждения, обеспечивающего умеренный расход воды и электроэнергии на ее подачу, а также открывающего возможность утилизации теплоты. Срок службы системы охлаждения в режиме кипения зависит от жесткости применяемой воды, вызывающей образование накипи на поверхности охлаждения. Слой накипи уменьшает поперечное сечение канала для протекания воды и увеличивает тепловое сопротивление стенки кристаллизатора вследствие низкой своей теплопроводности — 0,3–5 Вт/(м·К) в зависимости от минералогического состава.

В случае работы кладки в контакте с расплавленным материалом возникают два характерных слоя (рис. 1.30) — застывшего гарнисажа и движущегося расплава. При этом образуется чисто гарнисажная футеровка. Ограждение выполняется в виде сварной конструкции — кессонов или трубчатых элементов с водяным или испарительным охлаждением.

Такая футеровка абсолютно шлакоустойчива, поскольку химический состав гарнисажа идентичен составу перерабатываемого материала. Однако в процессе работы зачастую происходит отслоение отдельных участков с резкими тепловыми ударами (до 1 МВт/м²) на них. Таким образом, надежность работы чисто гарнисажной футеровки из-за отсутствия прочного сцепления гарнисажа с холодной металличе-

ской стенкой невелика. Такая футеровка применяется в шахтных плавильных печах, чугуноплавильных вагранках.

Надежная и длительная работа футеровки будет обеспечена при наварке на стальную стенку шипов, выполняющих роль арматуры. Гарнисаж образуется не на стенке, а на огнеупорной набивке толщиной до 30 мм, что обеспечивает хороший механический и тепловой контакт с охлаждаемой металлической стенкой. Такая футеровка обладает малой тепловой инерцией, дешева и наиболее эффективна для современных высокофорсированных камер.

Все известные конструкции охлаждаемых элементов кладки печей можно разделить на две группы: трубчатые и коробчатые. Трубчатые конструкции обладают рядом преимуществ, главное из которых заключается в том, что в трубах можно обеспечить скорость движения воды, достаточную, чтобы исключить ее кипение и выпадение солей на обогреваемой поверхности. Вместе с тем трубчатые конструкции требуют особого внимания к качеству используемых материалов (прежде всего труб) и высокой квалификации персонала, занятого их изготовлением.

Основными преимуществами коробчатой конструкции являются надежность в эксплуатации и возможность использования сравнительно малого количества дефицитных материалов. Недостатком является то, что скорость движения воды существенно ниже, чем в трубчатых конструкциях. Однако при скоростях движения воды до 0,2 м/с снимаемый с охлаждаемых поверхностей тепловой поток значителен и достигает 60–90 кВт/м². Лишь при значительных тепловых нагрузках (900–1000 кВт/м²) в элементах коробчатой конструкции могут наблюдаться случаи локального кипения жидкости, приводящие к резкому снижению коэффициента теплоотдачи от стенки к воде и быстрому прогару охлаждаемого элемента.

На практике установлены критические значения тепловых потоков, при которых возможен прогар кессонированных элементов, что недопустимо по условиям взрывобезопасности. Математическая обработка экспериментальных данных позволила представить зависимости критических значений тепловых потоков от скорости движения химически неочищенной воды соответственно для медных и стальных кессонов:

$$q = 1,84W^{0,54}, \quad (1.16)$$

$$q = 1,041W^{0,373}, \quad (1.17)$$

где q — критическое значение теплового потока, МВт/м^2 , W — скорость движения воды, м/с .

Наиболее надежными конструкциями кессонов являются медные толстостенные прессованные трубы квадратного или прямоугольного профиля. Медные элементы вследствие высокой теплопроводности не только обеспечивают интенсивное охлаждение поверхности, контактирующей с расплавом в стационарных условиях, но и компенсируют кратковременные тепловые удары, обеспечивая быстрое распределение теплоты по кессону.

Чем более массивен элемент, тем выше указанный эффект, а чем чаще поставлены кессоны, тем надежнее они защищают футеровку печи. Однако при этом возрастают потери теплоты с охлаждением, что особенно неблагоприятно сказывается на технико-экономических показателях небольших печей. Количественное сопоставление характеристик ограждений различного типа приведено в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Расчетные характеристики ограждений различных типов

Показатель	Однослойная огнеупорная кладка	Трехслойная кладка	Гарнисажная с огнеупорной набивкой
Толщина слоев, мм	696	232 + 70 + 90	30
Масса ограждения, кг/м^2	1295	505	64,8
Стоимость материала ограждений, у. е./ м^2	52	25,2	7,8
Длительность разогрева до стационарного состояния, ч	192	34	1,8
Теплопоглощение за время разогрева, МДж/м^2	2517	839	232
Плотность теплового потока в окружающую среду, кВт/м^2	2,2	1,1	78
Градиент температуры в слое огнеупора, $^{\circ}\text{C/м}$	1645	733	22 000

При выборе типа футеровки и подборе огнеупоров для промышленных печей необходимо соблюдать принципы согласованной стойкости и обеспечения равномерного износа рабочей поверхности каждой части футеровки. Суть этих принципов заключается в следующем. Разные конструктивные части футеровки работают в различных условиях. Поэтому следует принимать такие технические решения, которые бы обеспечивали одинаковый износ узлов и частей футеровки к моменту начала ремонта. В наиболее изнашиваемых областях необходима установка более стойких огнеупоров, увеличение толщины футеровки или, наоборот, снижение локальной теплоизоляции и применение принудительно охлаждаемых элементов.

Как показывают оптимизационные расчеты и опыт работы, интенсивность наружного охлаждения печного ограждения должна быть тем больше, чем дороже материал, применяемый для изготовления огнеупорного слоя, выше интенсивность технологического процесса и дешевле применяемый энергоисточник. Иными словами, высокофорсированную рабочую камеру из дорогих огнеупоров необходимо не теплоизолировать, а охлаждать принудительно с наружной стороны.

При прочих равных условиях интенсивность наружного охлаждения ниже для высокотемпературных технологических процессов, так как у них меньше доля использования теплоты в рабочей камере и дороже теряемая в окружающую среду теплота. При этом низкокачественные огнеупоры целесообразно лучше теплоизолировать.

2. Футеровка основных промышленных тепловых агрегатов

2.1. Комплекс доменной печи

Общие сведения об устройстве доменной печи

Доменная печь относится к шахтным печам и служит для выплавки чугуна из железных руд.

Комплекс доменной печи состоит из блока воздухонагревателей, системы трубопроводов горячего дутья и удаления продуктов сгорания, пылеуловителя, бора, дымовой трубы, собственно доменной печи, литейного двора, парка чугуновозных ковшей.

Принцип работы доменной печи следующий (рис. 2.1).

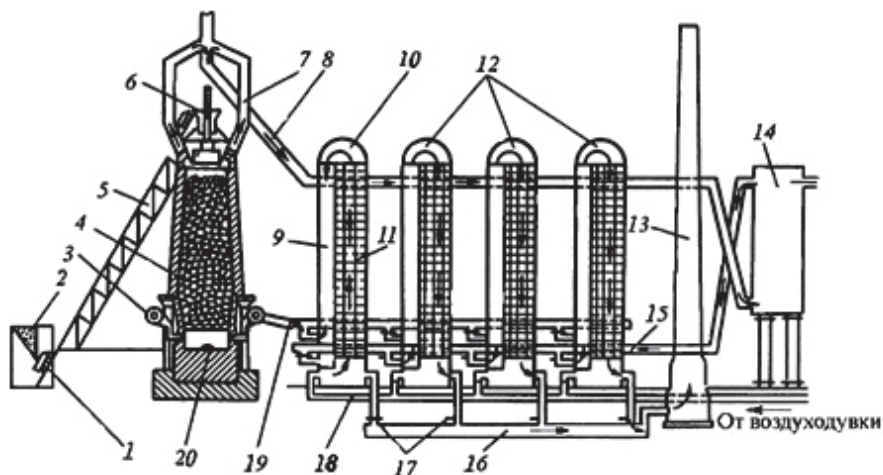


Рис. 2.1. Схема работы доменной печи:

1 — скип; 2 — бункер; 3, 19 — кольцевой и прямой воздухопроводы горячего дутья; 4 — доменная печь; 5 — наклонный мост; 6 — приемная воронка; 7 — газоотводы; 8, 15 — газопроводы; 9 — камера горения; 10, 12 — воздухонагреватели; 11 — насадка; 13 — дымовая труба; 14 — пылеуловитель; 16, 18 — боров; 17 — дымовые клапаны; 15 — воздухопровод холодного дутья; 20 — чугунная лётка (стрелками показано направление движения газов и воздуха)

Исходные материалы (кокс, руда, известь, служащая плавнем для пустой породы), называемые шихтой, загружают в печь сверху через колошник. Опускаясь вниз навстречу поднимающимся продуктам горения, они постепенно высушиваются и нагреваются. Воздух для горения подается в фурменную зону, где сгорает кокс. Продукты горения, поднимаясь вверх, раскаляют слои кокса и руды; при этом углерод кокса вступает в реакцию с оксидами железа и восстанавливает их.

Печь условно разделяют на четыре технологические зоны, не имеющие постоянных и резко очерченных границ. Разделение обусловлено процессами, протекающими в доменной печи. В верхней части расположена зона подготовительных процессов. Следующая (сверху вниз) — зона непрямого восстановления железа из оксидов оксидом углерода. Еще ниже — зона прямого восстановления железа углеродом и, наконец, последняя зона — плавления.

В нижней части печи, чуть выше конического углубления для застойного слоя чугуна, защищающего кладку от воздействия движущихся струй чугуна и шлака, расположено отверстие для выпуска чугуна — чугунная лётка. Во время работы отверстие лётки забито легочной массой. Для того чтобы выпустить чугун из горна, лётку разбуривают. В конце выпуска через эту же лётку удаляют остатки шлака. Сейчас в доменных печах устраивают 2–4 чугунные лётки.

Доменная печь имеет четыре воздухонагревателя. В воздухонагревателе нагревается воздух. Доменный газ и воздух вводятся в нижнюю часть шахты (или камеры) горения. Продукты горения поднимаются к куполу, где процессы горения газа заканчиваются, затем продукты горения опускаются вниз через насадку с закрытыми каналами, попадают в поднасадочное пространство и через дымовые клапаны выходят в боров, далее — в дымовую трубу.

Процесс нагревания происходит в течение 3–4 ч. Затем воздухонагреватель отключается от газопровода и борова, и в поднасадочное пространство впускается холодный воздух. Поднимаясь через нагретую насадку, воздух нагревается. Дойдя до подкупольного пространства, он опускается в камеру горения и через штуцер горячего дутья поступает в прямой, а затем кольцевой воздухопроводы горячего дутья и через фурменные рукава, сопла и воздушные фурмы — в доменную печь.

Пока в одном воздухонагревателе нагревается воздух, в остальных горит газ. Если у доменной печи три воздухонагревателя, то в двух происходит горение газа, а в одном — нагрев воздуха. В этом случае период работы воздухонагревателя на газе в два раза дольше, чем на воздухе. Если воздухонагревателей четыре, на газе работают три, и период ра-

боты их на газе в три раза дольше, чем на воздухе. По истечении времени работы воздухонагревателя на воздухе его переключают на газ. Для работы на воздухе подключают следующий воздухонагреватель, который отработал полное время на газе.

Колошниковый (доменный) газ удаляется из верхней части доменной печи (из купола) через четыре газоотвода. Через подсвечники и свечи, а затем через газопроводы он поступает в пылеуловитель. Из пылеуловителей газ по газопроводам чистого газа поступает на тонкую очистку в электрофильтры или в аппараты мокрой очистки — дезинтеграторы.

Футеровка элементов комплекса доменной печи

Конструктивные элементы доменной печи, выполняемые из огнеупоров, показаны на рис. 2.2.

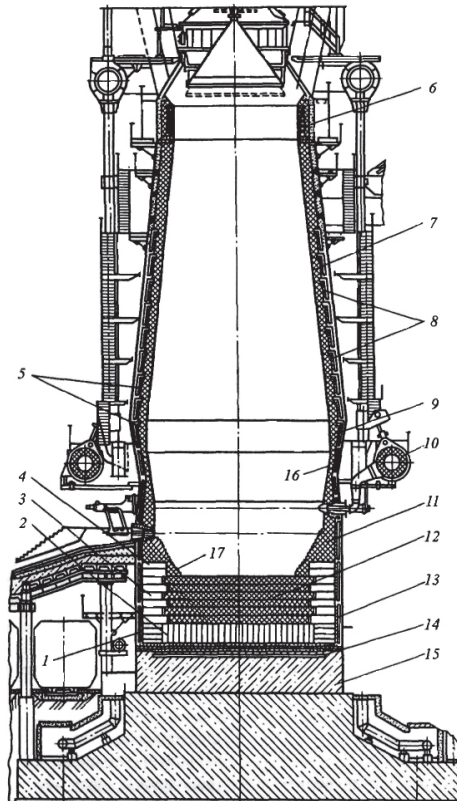


Рис. 2.2. Доменная печь:

- 1 — изолирующая масса лещади; 2–4, 12 — многослойная футеровка лещади; 5 — теплоизоляция шахты; 6 — колошник; 7 — шахта; 8, 13 — периферийные холодильники; 9 — распар; 10 — кольцевой воздухопровод; 11 — горн; 14 — подлещадные холодильники; 15 — пень; 16 — заплечики; 17 — защитный слой

В различных частях печи воздействие на огнеупорную кладку неодинаково, поэтому материал футеровки и конструкцию отдельных частей печи необходимо выбирать с учетом этих воздействий.

Тепловые воздействия, давление печных газов, шихты и жидких продуктов плавки увеличивается от верхних зон печи к нижним. При повышении температуры также увеличивается химическое воздействие на футеровку со стороны сырьевых материалов, печной атмосферы и расплавов. Большое значение для службы огнеупорной футеровки доменной печи имеет гарнисаж, намораживающийся на рабочий слой футеровки в фурменной зоне и горне, наличие которого дает возможность уменьшить толщину футеровки. Одним из приемов повышения стойкости футеровки горна и фурменной зоны служит организация искусственного гарнисажа — керамического стакана — из огнеупорных плотных муллитокорундовых изделий на керамической связке. Керамический стакан формируется в один слой изделий поверх основной графитовой или карбидкремниевой футеровки рабочего слоя.

Кладка лещади постоянно находится под действием жидкого чугуна и шлака: испытывает гидростатическое давление, химическое воздействие, пропитку компонентами расплавов по пористой структуре и швам между изделиями, температурные напряжения. Кроме того, под действием градиента температуры происходит химоллиз собственно огнеупорных материалов, обеспечивая образование зональности структуры огнеупоров.

Футеровка нижней части горна — металлоприемника — также испытывает воздействие со стороны расплавленного чугуна и шлака, но в меньшей степени, так как чугун оказывает меньшее гидростатическое давление на кольцевую футеровку металлоприемника. Защитой от химического воздействия расплавов в горне служит организация гарнисажа с помощью принудительного охлаждения. С точки зрения химического состава доменные шлаки можно отнести к нейтральным, с соотношением основных оксидов к кислым в пределах 0,9–1,3.

В верхней части горна — фурменной зоне — гидростатическое давление чугуна и жидкого шлака невелико, однако в этой зоне развиваются самые высокие температуры, воздействующие на огнеупорную футеровку. Кроме того, на футеровку воздействуют печные газы при продувке печи, возможен заброс шлака и попадание на футеровку воды из систем охлаждения горелочных фурм.

В заплечиках, расположенных в непосредственной близости от очагов сгорания топлива, развиваются высокие температуры. Рудная часть шихты здесь находится в жидком состоянии и, стекая в виде капель и струек чугуна и шлака между кусками кокса, частично попадает на футеровку. Кроме того, футеровка омывается печными газами, испытывая термические напряжения, химическое воздействие газов, жидкого чугуна и шлака.

Нижняя часть шахты, так же как и заплечики, подвержена наибольшему износу, определяя сроки службы всей доменной печи. Основными причинами износа футеровки нижней части шахты являются сильные тепловые напряжения, интенсивное химическое воздействие со стороны образующегося шлака, паров щелочей и цветных металлов, монооксида углерода, колебаний высоких температур, способствующие возникновению термических ударов, абразивный износ со стороны опускающейся шихты.

В верхней части шахты, наоборот, тепловое напряжение невелико, химическое воздействие со стороны шлака и печных газов отсутствует, но есть химический износ за счет восстанавливающего воздействия сажистого углерода, образующегося на контактной поверхности футеровки по реакции Бэла; абразивное воздействие шихты и газопылевого потока более значительно.

Футеровка колошника разрушается в основном от ударного воздействия со стороны падающей с засыпного устройства кусковой шихты.

В зависимости от характера условий эксплуатации футеровки в различных частях печи вытекают требования к огнеупорным материалам и изделиям, по соответствию к которым и происходит выбор. Прежде всего, это огнеупорность не менее 1650–1700 °С. Особенно это важно для материалов для горна и фурменной зоны. Огнеупорные изделия должны обладать высокой механической прочностью при температурах эксплуатации (высокой температурой начала размягчения); не должны химически взаимодействовать и пропитываться расплавами шлака и чугуна; противостоять абразивному воздействию; для исключения воздействия сажистого углерода иметь низкую открытую пористость, газопроницаемость и минимальное содержание оксидов железа и марганца. Очень важным требованием является точность размеров огнеупорных изделий, что обеспечивает минимальную толщину шва между изделиями.

Горн печи снизу ограничивается лещадью. Она служит днищем металлореципиента и выполняет функции подины плавильной печи.

Для футеровки лещади и горна применяют углеродистые и плотные муллитокорундовые на керамической связке огнеупорные изделия. Применяют два типа кладки — цельноуглеродистую и комбинированную (сочетание углеродистых и муллитокорундовых изделий).

Преимущества углеродистых изделий заключаются в их высокой огнеупорности в восстановительной или инертной среде, увеличении прочности с ростом температуры, высокой термостойкости и объемо-постоянстве в широком диапазоне температур, химической инертности к расплавам доменного процесса. В России подавляющее число доменных печей проектируется с комбинированной лещадью. В этом случае нижнюю часть лещади, а также периферийную часть, представляющую собой кольцевую стену, выкладывают из графитированных и углеродистых блоков. Среднюю часть выполняют из муллитокорундовых изделий. Графитированные и углеродистые блоки обладают высокой теплопроводностью. Назначение их — интенсивно отводить теплоту от кирпичной части лещади к холодильникам: вниз к горизонтальным холодильникам воздушного охлаждения и в горизонтальном направлении — к периферийным вертикальным холодильникам водяного охлаждения.

Муллитокорундовая часть лещади примыкает к кольцевой стене из радиально расположенных углеродистых блоков через шов толщиной 40–50 мм, забиваемый углеродистой массой. Чтобы шов не был сквозным, сверху донизу его перевязывают, применяя для кладки кольцевой стены блоки различной длины. Между углеродистыми блоками и периферийными холодильниками устраивают зазор шириной 75–150 мм, также заполняемый углеродистой массой.

С целью улучшения свойств и обеспечения максимальной стойкости футеровки лещади и горна применяют микро- и супермикропористые углеродистые блоки, причем ближе к холодильникам — графитированные, в рабочем слое — углеродистые. Блоки подвергают механической обработке шлифованием с точностью ± 1 мм (для углеродистых) и $\pm 0,5$ мм (для графитированных).

В отечественной практике эксплуатации доменных печей имеется опыт (ОАО НЛМК) использования вместо углеродистых блоков на периферийной части лещади мелкоштучных углеродистых огнеупоров теплопроводностью в 2 раза большей, чем у блоков. Комбинированную кладку центральной части лещади производят из плотных большемерных муллитовых блоков, отличающихся высокой прочностью

и точностью размеров. Изделия поставляются шлифованными и рас-
сортированными по рядам.

Металлоприемник горна работает в таких же условиях, как лещадь. Кладку металлоприемника возводят из муллитокорундовых изделий с содержанием глинозема не менее 62 % либо из графитированных изделий в виде крупных блоков, но иногда и в виде нормальных изделий.

Отверстие в горне для лётки обрамляют стальной рамой, которая внутри футеруется муллитокорундовым кирпичом или бетоном таким образом, что остается сквозной канал шириной 200–300 мм и высотой 400–500 мм, забиваемый лёточной массой.

Компенсационные зазоры между холодильниками и углеродистой или муллитокорундовой футеровкой доменной печи, а также зазоры между углеродными блоками и между углеродными и муллитовыми блоками горна и лещади заполняют набивной углеродистой массой.

В настоящее время на смену горяченабивным приходят холодно-набивные массы, обладающие высокими компенсационными свойствами, а также высокой теплопроводностью — до 10 и более против 2–3 Вт/(м·К) для горяченабивных масс, что обеспечивает необходимую и стабильную компенсацию расширения кладки в пределах допустимых напряжений.

Фурменная зона футеруется либо микро- и супермикропористыми углеродистыми или графитированными блоками, либо карбидкремниевыми изделиями на нитридной или оксинитридной связке. Последние существенно дороже, но эффективно противостоят окислительному воздействию воды и водяного пара в случае аварии на водоохлаждаемых фурмах.

Запечки футеруются либо особоплотными шамотными или муллитокремнеземистыми изделиями, либо карбидкремниевыми изделиями на нитридной или оксинитридной связке. Футеровка запечиков подвергается интенсивному износу и быстро разгорается. На месте кладки вследствие интенсивного охлаждения на внутренней поверхности футеровки образуется значительный слой гарнисажа, который и становится рабочим слоем футеровки запечиков. В целях повышения устойчивости гарнисажа для охлаждения запечиков применяют вертикальные или горизонтальные медные холодильники.

Распар состоит из двух частей: охлаждаемой (нижней) и неохлаждаемой (верхней) и футеруется либо особоплотными шамотными или муллитокремнеземистыми изделиями, либо карбидкремниевыми из-

делями на нитридной или оксинитридной связке. Возможно использование алюмосиликатных низкоцементных бетонов для футеровки распара и шахты, что позволяет производить горячие ремонты футеровки методом инъектирования бетона через специально организованные отверстия.

Рабочим слоем футеровки в охлаждаемой части распара служит гарнисаж, который имеет слоистую структуру и содержит кокс, шлак, железистый расплав, известняк и спеки этих материалов.

Шахта футеруется аналогично распару. Вариантом футеровки шахты являются плиты из шаровидного чугуна с вплавленными в него карбидкремниевыми изделиями, обладающими высокой абразивной стойкостью, теплопроводностью и стойкостью к восстановительному воздействию сажистого углерода.

Кладку *колошника* в пределах футеровочных плит выполняют из шамотных плотных и уплотненных изделий марок ШПД-39 и ШУД-37 с содержанием Al_2O_3 39 и 37 % соответственно. Обращенную внутрь поверхность кладки защищают чугунными кольцами.

Газоотводы и свечи работают в условиях, близких по истирающему воздействию пыли и температуры к условиям работы верхней части шахты. Для кладки этих элементов применяют шамотный кирпич.

Пылеуловители и наклонные газопроводы работают в условиях постоянных невысоких температур (400 °С). Основное требование к материалу футеровки — хорошее сопротивление истирающему воздействию колошниковой пыли. Этим условиям отвечает шамотный или высокоглиноземистый кирпич или бетон.

Воздухонагреватели

Воздухонагреватели разделяются на воздухонагреватели с внутренней камерой горения, с наружной (выносной) камерой горения и бесшахтные (без камеры горения). По рабочей температуре воздухонагреватели делятся на низкотемпературные (температура дутья 800–900 °С) и высокотемпературные (1100–1250 °С, в современных воздухонагревателях 1300–1350 °С). Современный воздухонагреватель — это высокотемпературный агрегат с выносной камерой горения с температурой под куполом до 1550 °С, обеспечивающей температуру дутья 1200–1350 °С. Основные требования к огнеупорам для воздухонагревателей: высокая механическая прочность, постоянство объема, повышенная температура начала деформации под нагрузкой и устойчивость к крипу.

В зависимости от температуры воздухонагреватель по высоте разделяется на три зоны: высокотемпературную с интервалом 1100–1550 °С, среднетемпературную (900–1100 °С) и низкотемпературную — не выше 900 °С.

Для высокотемпературных зон (купола, верхних рядов насадки, стен и камеры горения) применяют малоразрыхляющиеся динасовые изделия, изготовленные с использованием 100 % кварцита (без боя) и не менее 2 % железистого минерализатора, повышенного давления прессования и обжига при высокой температуре. Применение малоразрыхляющегося динаса обеспечивает стабильную работу воздухонагревателей при температуре дутья 1250–1350 °С. Для футеровки высокотемпературных зон применяют также муллитокорундовые огнеупоры с 72 % Al_2O_3 . Для среднетемпературных зон применяют шамотные огнеупоры с меньшим содержанием Al_2O_3 (42 и 37 %), для низкотемпературных зон — шамотные огнеупоры с 37 и 28 % Al_2O_3 .

Для изоляции рабочего слоя футеровки применяют шамотные легковесные изделия кажущейся плотностью 1,3 и 1,0 г/см³, динасовые легковесные изделия кажущейся плотностью 1,2 г/см³ и муллитокремнеземистые волокнистые материалы. В качестве заполнителя компенсационного зазора применяют муллитокремнеземистые волокнистые изделия марки МКРП-340, другие волокнистые материалы до температур не выше 1150 °С, а также асбестовермикулитовые плиты до температур 600 °С.

Более современная конструкция бесшахтного воздухонагревателя — воздухонагреватель Калугина с форкамерой наверху купола.

Диаметр основного купола близок к диаметру купола воздухонагревателей с камерой горения, что обеспечивает независимую опору его кладки на кожух. В таком воздухонагревателе отсутствуют удар факела в кладку и ее местный нагрев, что облегчает условия службы футеровки. Футеровку купола выполняют из динасовых или шамотно-кордиеритовых огнеупоров.

Система выпускных желобов доменной печи обычно включает главный желоб и разливочные желоба, при этом в главном желобе происходит отделение чугуна от увлекаемого вместе с ним шлака, в связи с чем он находится в наиболее тяжелых условиях.

Огнеупоры в футеровке главных желобов подвергаются воздействию высокой температуры и ее колебаний, ударному воздействию струи чугуна, истирающему и коррозионному воздействию чугуна и шлака,

причем шлак разрушает футеровку интенсивнее чугуна. Огнеупоры для желобов должны быть шлако- и металлоустойчивы.

Главный желоб обычно футеруют в два слоя. Арматурный слой выполняют из высокоглиноземистых изделий или бетонов, а рабочий — из низкоцементных бетонов в системе $Al_2O_3-SiC-C$. Чугоновозные ковши футеруются кварцевыми наливными массами на связки из жидкого стекла.

2.2. Плавильные печи металлургии

В металлургии для производства металлов и сплавов используют печи разнообразных конструкций. Однако основной частью любого плавильного агрегата является огнеупорная футеровка, поэтому продолжительность работы установки в целом во многом определяется устойчивостью футеровки к химическому воздействию шлаков, металлов, плавильной пыли и механическим нагрузкам в условиях высоких температур. Исходя из этого, в пособии будут рассмотрены лишь основные представители этой группы печей.

2.2.1. Мартеновские печи

Мартеновская печь служит для выплавки стали из чугуна и стального лома (скрапа). Сущность получения стали заключается в удалении из чугуна части углерода и вредных примесей.

Различают два способа получения стали в мартеновских печах: скрап-процесс и рудный процесс. При скрап-процессе плавка ведется на твердой шихте, состоящей главным образом из 60–80 % стального лома и 15–40 % чугуна. Скрап-процесс применяют на заводах, не имеющих доменного производства. Там, где есть доменные печи, сталь получают рудным способом, при котором в мартеновскую печь заливают жидкий чугун. В этом случае шихта состоит из 80–90 % чугуна и 20–10 % железной руды и скрапа.

Мартеновские печи представляют собой ваннные регенеративные печи, отапливающиеся природным газом, мазутом или смешанным коксодоменным газом.

Основные элементы — рабочее пространство с ванной, в которой происходит плавление стали; головки печи, расположенные по торцам

рабочего пространства и служащие попеременно для подачи топлива и воздуха в рабочее пространство и отвода из него продуктов горения; вертикальные каналы, по которым попеременно с одной стороны подается к головкам воздух от регенераторов, а с противоположной стороны уходят продукты горения; регенераторы для подогрева газа и воздуха; шлаковики, расположенные между вертикальными каналами и регенераторами и служащие для осаждения капель шлака, уносимых отходящими из рабочего пространства газами; система боровов и газовых каналов, по которым отводятся из регенераторов продукты горения и подается в регенераторы воздух, и дымовая труба для отвода продуктов горения.

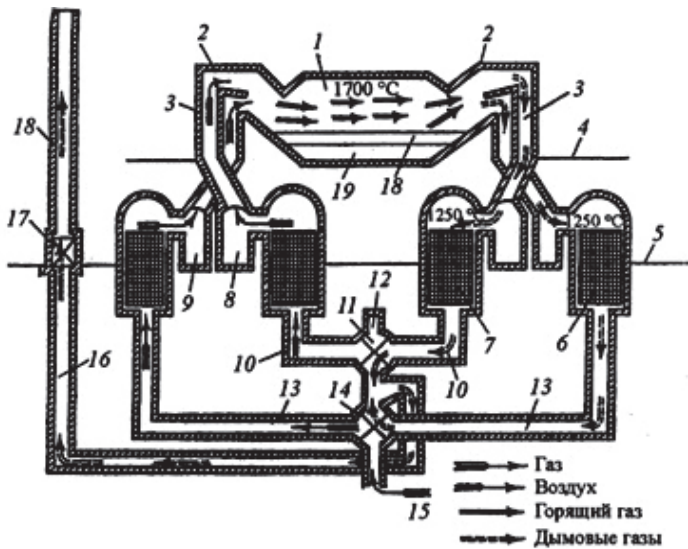


Рис. 2.3. Мартеновская печь, отапливаемая природным или коксодоменным газом:

- 1 — рабочее пространство; 2 — головки; 3 — вертикальные газозвушные каналы; 4 — уровень рабочей площадки; 5 — уровень пола цеха; 6 — газовый регенератор; 7 — воздушный регенератор; 8 — воздушный шлаковик; 9 — газовый шлаковик; 10 — воздушный канал; 11 — воздушный клапан; 12 — подача воздуха; 13 — газовый канал; 14 — газовый клапан; 15 — подача газа; 16 — дымоход (боров); 17 — котел-утилизатор; 18 — дымовая труба

Так как температура продуктов горения, уходящих из регенератора, еще достаточно высока (600–800 °C), то для использования их тепла в мартеновских цехах между печью и дымовой трубой устанавливают котел-утилизатор.

Рабочее пространство, головки и вертикальные каналы называют *верхним строением печи*, а шлаковики и регенераторы, расположенные под рабочей площадкой, — *нижним*.

Мартеновские печи разделяются на кислые с футеровкой из кислых материалов (динаса, кварцевых масс) и основные — с футеровкой из основных материалов (периклаза, периклазохромида, периклазо-доломита). Наиболее распространены основные печи.

В настоящее время в связи с широким распространением кислородно-конвертерного способа выплавки стали строительство мартеновских печей не производится. Однако парк действующих печей практически на всех металлургических предприятиях постоянно обновляется.

Условия службы огнеупоров

Подины печей подвергаются воздействию температуры до 1690 °С, в процессе службы подина испытывает ферростатическое давление металла; механическое воздействие шихты при ее завалке; движение потоков стали; химическое воздействие шлаков и металла; резкие колебания температуры и воздействие переменной окислительно-восстановительной среды в процессе плавки до 1690 °С со шлаком. Химико-минералогический состав верхнего слоя подины в процессе эксплуатации меняется при взаимодействии с металлом и оксидами железа, кальция, кремния, разжижающими добавками — CaF_2 и др. Постепенно верхний слой подины приближается по своему составу и состоянию к шлаку и постоянно смывается. Периодически через 30–50 плавков подину ремонтируют — «подваривают» металлургическими порошками.

Поэтому огнеупоры, применяемые для подин, должны обладать следующими свойствами: высокой огнеупорностью и температурой начала размягчения под нагрузкой; термостойкостью; механической прочностью; износостойкостью; способностью противостоять коррозионному и эрозионному воздействию металла и шлака; устойчивостью к переменной окислительно-восстановительной среде.

Стены и откосы ванны работают в таких же условиях, как и подины, и поэтому их выкладывают из того же материала, что и подину.

Свод рабочего пространства подвергается воздействию температуры более 1700 °С, резким температурным колебаниям, химическому воздействию брызг шлака и пыли, истирающему воздействию шихтовой пыли, неравномерному нагреву по толще кирпича.

В этих условиях нужен кирпич со следующими свойствами: высокой огнеупорностью и температурой начала размягчения, высокой термостойкостью, шлакоустойчивостью и износостойкостью, незначительной теплопроводностью при высокой огнеупорности и повышенной теплопроводностью при пониженной огнеупорности. Он не должен подвергаться дополнительной усадке при нагревании. Форма кирпича должна быть правильной, а грани — ровными. В таких же условиях эксплуатируются головки печи, опорные арки вертикальных каналов, облицовка стен шлаковиков и кладка стен каналов и головок.

Регенераторы и шлаковики подвергаются воздействию температуры в верхней части регенераторов 1300–1400 °С; резким изменением температуры нижней части регенераторов, когда при перекидке клапанов взамен уходящих горячих продуктов горения на кладку начинают действовать холодный воздух и газ; химическому воздействию вносимых продуктами горения частиц шлака и пыли. Для этих условий необходим кирпич, обладающий следующими свойствами: высокой огнеупорностью и температурой начала размягчения под нагрузкой, высокой термостойкостью, теплоемкостью и шлакоустойчивостью.

В нижнем строении мартеновских печей наиболее ответственными элементами являются насадки регенераторов, которые служат для подогрева воздуха и газа. Насадки играют важную роль в аккумуляции тепла. Эксплуатируются они в условиях воздействия высоких температур и химической агрессии со стороны плавильной пыли и печных газов. В остальных элементах нижней части нет высокой температуры, но воздействуют на кладку резкие температурные колебания.

2.2.2. Электросталеплавильные печи

Из разнообразных по принципу работы плавильных агрегатов, использующих в качестве источника тепла для плавки металла электрический ток (печи сопротивления, индукционные, дуговые), наиболее широкое распространение получили установки дугового нагрева, которые подразделяются на дуговые печи переменного тока, дуговые печи постоянного тока и плазменно-дуговые печи.

Конструктивно дуговые сталеплавильные печи (ДСП) на постоянном токе незначительно отличаются от обычной трехфазной.

Наиболее широкое распространение в электросталеплавильном и ферросплавном производстве нашли дуговые печи переменного тока.

Различают ДСП с выпуском стали через желоб, сифон и дно. В последнем случае сталь может выпускаться в центре подины либо в специальном выпуске — *эркере*.

По вместимости различают мало- (0,5–20 т), средне- (25–50 т) и крупнотоннажные (>100 т) печи.

По характеру горения электрической дуги печи делят на три группы: с зависимой, с закрытой и независимой дугой.

В печах первой группы электрическая дуга горит между одним или несколькими электродами и нагреваемым металлом; во второй — под слоем твердой шихты или пенистого шлака, при этом часть тока может протекать между электродами через шихту, а при погружаемости электродов в шлак — через расплав. В печах третьей группы дуга горит, как правило, между двумя электродами.

Условно объем дуговой печи делят на три части: ванну, свободное и подсводовое пространство (рис. 2.4).

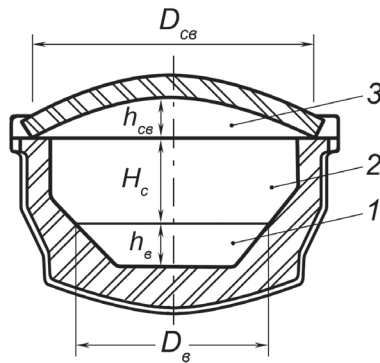


Рис. 2.4. Схема рабочего пространства дуговой печи:
1 — ванна; 2 — свободное пространство; 3 — подсводовое пространство

Геометрическая форма ванны принята такой, чтобы свести к минимуму тепловые потери и максимально обеспечить протекание физико-химических реакций между металлом и шлаком. Потери тепла ванной зависят в основном от теплопроводности и пропорциональны поверхности ванны, поэтому форму ванны делают сферической с целью минимизации потерь тепла.

В форме ванны важным является соотношение между глубиной h_B и диаметром зеркала ванны D_B (рис. 2.4). Диаметр зеркала определяет и диаметр свободного пространства. Высоту H_C находят, исходя

из необходимости разместить в этом объеме (включая и ванну) всю твердую шихту и обеспечить минимум потерь тепла через стенки печи. Наибольшее распространение получили ДСП, у которых соотношение H_c/D_B равно 0,4–0,5, причем чем больше вместимость печи, тем меньше это соотношение.

Условия службы огнеупоров

В ДСП различают следующие элементы огнеупорной кладки: подина и откосы, стены, свод и сталевыпускные устройства.

Для выполнения футеровки применяют различные огнеупорные материалы. В зависимости от технологии выплавки стали футеровку печей выполняют из кислых (динас) или основных материалов (периклазовые, периклазохромитовые и др.).

Классификация по футеровке позволяет их разделить на следующие типы: классический вариант, когда стены, подина и свод выполняются из огнеупорных материалов и изделий, печи с водоохлаждаемыми элементами взамен огнеупорной футеровки.

Подина и откосы. Подина и откосы непосредственно контактируют с металлом и шлаком, наибольшее воздействие на футеровку подины и откосов оказывают FeO и кремнезем шлака. Во время плавления и в окислительный период футеровка подины насыщается закисью железа. В восстановительный период окислы железа переходят в обратном направлении — из футеровки подины и откосов в металл и шлак. Восстановительная среда после выпуска плавки снова меняется и становится окислительной. При сливе и после слива металла футеровка подины непосредственно контактирует со шлаком и насыщается им. В значительно большей степени, чем подина, воздействию шлаков при высоких температурах подвержена футеровка откосов, поэтому откосы являются наиболее слабым участком футеровки электропечей. Исходя из назначения и условий работы футеровки подины и откосов, к ней можно предъявить ряд требований. Рабочий слой подины, непосредственно контактирующий с металлом и шлаком, должен обладать высокой огнеупорностью, термостойкостью, противостоять химическому и механическому воздействию металла и шлака. Подина в целом должна быть достаточно механически прочной, чтобы воспринимать механические удары при загрузке шихты, и обладать большим тепловым сопротивлением.

Стены. Температурные условия работы внутренней поверхности стен особенно тяжелы, так как в отдельные периоды плавки темпера-

тура некоторых участков стен может превысить огнеупорность материала, а при открывании рабочего пространства и загрузке шихты стены быстро охлаждаются. Скорость изменения температуры внутренней поверхности стен может достигать, как уже отмечалось, $10\,000\text{ }^\circ\text{C/ч}$, что создает значительные термические напряжения в футеровке. В связи с этим рабочий слой футеровки должен быть выполнен так, чтобы обладать высокой огнеупорностью и термостойкостью, низким коэффициентом теплового расширения и высоким коэффициентом теплопроводности, а для получения большого теплового сопротивления футеровка стен печи должна быть хорошо теплоизолированной с внешней стороны.

Свод. Свод является наименее долговечной частью футеровки дуговых печей. Как и футеровка стен, свод испытывает значительные температурные колебания. По ходу плавки свод может прямо воспринимать излучение выдуваемых из-под электродов дуг, а также поглощать отражаемое шлаком и футеровкой печи излучение. Свод постоянно испытывает сжимающую нагрузку от распора, что снижает температуру начала его деформации. Выбивающиеся из печи раскаленные газы содержат много пыли, которая оседает на своде и при высокой температуре может вызвать его химическое разрушение. Исходя из особенностей службы огнеупоров в сводах дуговых печей, к ним можно предъявить ряд особых требований. Эти огнеупоры должны характеризоваться высокой огнеупорностью, термостойкостью, химической стойкостью по отношению к плавильной пыли, большим тепловым и электрическим сопротивлением.

2.2.3. Ферросплавные печи

Ферросплавы по технологическому признаку подразделяют на печные, выплавляемые в восстановительных и рафинировочных электродуговых печах, и внепечные, выплавляемые алюмотермическим способом.

По методу ведения плавки производство ферросплавов в электропечах может быть непрерывным и периодическим. При непрерывном производстве шихтовые материалы загружают в печь по мере опускания уровня шихты, а продукты плавки (металл и шлак) выпускают из печи по мере их накопления на подине. При периодическом производстве печи работают аналогично электросталеплавильным. Ферросплавные материалы в зависимости от их состава подразделяют

на кремнистые, марганцевые, хромистые и т. п. Служба огнеупоров в печах, выплавляющих эти сплавы, определяется составом сплава и технологией его выплавки. Поэтому стойкость футеровки колеблется от одной плавки при алюминотермическом процессе до 10 лет при плавке кремнистых сплавов в печах с углеродистой футеровкой.

Выбор огнеупорных материалов для футеровки печей определяется технологией плавки, составами шлака и сплава. Футеровка подины ферросплавных печей имеет значительную толщину, что обеспечивает достаточную тепловую инерцию. Общим для всех печей является и то, что рабочим слоем футеровки печи является гарнисаж.

2.2.4. Сталеплавильный конвертер

Конвертерный способ производства стали заключается в продувке жидкого чугуна кислородом. Различают конвертеры с верхним (LD), нижним (ОВМ) и комбинированным (ТВМ, LBE и др.) дутьем.

Конвертер представляет собой большую стальную реторту, футерованную огнеупорными изделиями. Форма корпуса обычно грушевидная, симметричная. Корпус кислородного конвертера состоит из днища, нижнего усеченного конуса, цилиндрической части и конической горловины. У основания верхней конической части кожуха конвертера расположено сталевыпускное отверстие. В России наибольшее распространение получили конвертеры с верхним дутьем (рис. 2.5).

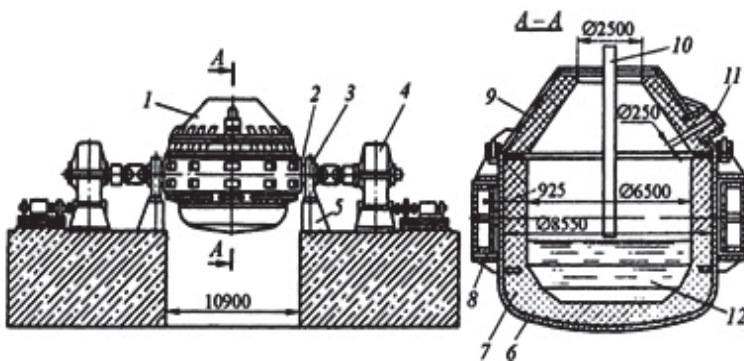


Рис. 2.5. Кислородный конвертер:

1 — конвертер, 2 — цапфа, 3 — подшипник, 4 — привод, 5 — колонна, 6 — кожух, 7 — футеровка, 8 — кольцо, 9 — горловина, 10 — водоохлаждаемая кислородная фурма, 11 — лётка, 12 — жидкий металл

Конструкция конвертеров и условия службы огнеупоров

Днища кислородных конвертеров на большинстве предприятий отъемные, что облегчает и ускоряет ремонт футеровки, однако создает угрозу проникновения металла во время плавки. Имеются также вставные и неотъемные днища. В соответствии с профилем конвертера его футеровку подразделяют на следующие основные части: днище (неотъемное, отъемное и вставное), цилиндрическую часть и горловину. Кладка этих частей имеет некоторые особенности как вследствие своего расположения, так и условий службы.

Огнеупоры в кислородных конвертерах подвергаются воздействию основных шлаков и шлакообразующих материалов (раскислителей), окислительно-восстановительной печной атмосферы в различные периоды плавки, металла при температуре ~ 1700 °С и выше и интенсивному абразивному и эрозионному воздействию вследствие турбулентной циркуляции металла и шлака при продувке кислородом, инертными газами и десульфурации.

Износ огнеупорной кладки конвертера происходит по следующим причинам: оплавление огнеупоров в результате реакций со шлаком и раскислителями (флюорит, алюминий); зонообразование вследствие пропитки футеровки компонентами шлака и образование трещин вследствие разного химического состава зон и перепада температур; разрушение структуры огнеупоров вследствие изменения объема кристаллической решетки оксидов переменной степени валентности при изменении парциального давления кислорода в различные периоды плавки; механический износ под действием ударных, истирающих и вибрационных воздействий от загружаемого материала и вращения конвертера. Влияние упомянутых причин на разрушение огнеупорных материалов различных частей конвертера неодинаково.

Огнеупорные материалы, из которых делают футеровку горловины, должны хорошо противостоять резким температурным колебаниям, возникающим в процессе работы конвертера, выдерживать удары и сотрясения при загрузке и при удалении с поверхности огнеупорной кладки настывшей металла и шлака, обладать плохой смачиваемостью жидким металлом и шлаками.

Футеровка рабочего пространства со стороны загрузки (помимо повреждений, возникающих в процессе продувки) испытывает сильные механические удары и сотрясения при загрузке конвертера. В ней возникают перепады температур при загрузке в конвертер шихты. Поэ-

тому футеровку этой части огнеупорной кладки следует выполнять из огнеупоров, обладающих высокой прочностью при нагреве, не подверженных образованию трещин, обладающих высокой термостойкостью, металло- и шлакоустойчивостью.

Футеровка рабочего пространства конвертера на уровне жидкого шлака должна обладать высокой устойчивостью к эрозионному и коррозионному воздействию расплавов металла и шлака.

2.3. Миксеры

Чтобы обеспечить нормальное течение конвертерного процесса, необходимо поддерживать постоянный состав и температуру жидкого чугуна. Для этой цели служат миксеры. Они представляют собой сварной стальной бочкообразный корпус, футерованный огнеупорными изделиями.

Миксер оборудован приводным механизмом, с помощью которого он поворачивается вокруг горизонтальной оси. Чугун из ковшей заливают в миксер через верхнее заливное отверстие — горловину, а выпускают через сливной носок, наклоня бочку. Чтобы чугун не остывал, в миксерах установлены горелки: одна у сливного носка и две — по торцам.

Огнеупорная кладка ванны миксера работает в условиях высоких температур (1300–1400 °С), химического воздействия расплавленного металла и шлака и нагрузки на кладку от массы металла и шлака. В целом вся футеровка испытывает переменные статические нагрузки, когда миксер поворачивают.

Чугуновозные ковши миксерного типа

Чугуновозные ковши миксерного типа (передвижные миксеры) имеют вместимость 150, 420 и 600 т. В настоящее время в миксерных ковшах чугун не только перевозят из доменного производства в сталеплавильное, но и проводят в них предварительную обработку чугуна (десульфурацию, дефосфорацию и обескремнивание), что предъявляет дополнительные требования к огнеупорам для футеровки миксерных ковшей, так как стойкость огнеупоров при этом снижается.

Футеровка ковшей миксерного типа подвергается воздействию циклических колебаний температуры (1000–1500 °С) и шлака переменной основности (0,4–1,0). Ее стойкость зависит также от массы металла,

длительности пребывания металла в ковше (длительности и расстояния транспортировки), проведения в ковше предварительной обработки металла.

2.4. Сталеразливочные ковши

Металлургическими агрегатами, осуществляющими транспортировку и распределение металла, выплавленного в мартеновской или электродуговой печи, конвертере, являются сталеразливочные ковши (рис. 2.6). В настоящее время функции стальковшей дополнены процессами внепечной обработки стали: рафинирование стали, вакуумная дегазация, доводка стали до марки, сопровождающиеся донной продувкой и активным перемешиванием стали в ковше. Кроме того, внепечная обработка потребовала повысить температуру выдачи стали из плавильного агрегата до 1750–1770 °С.

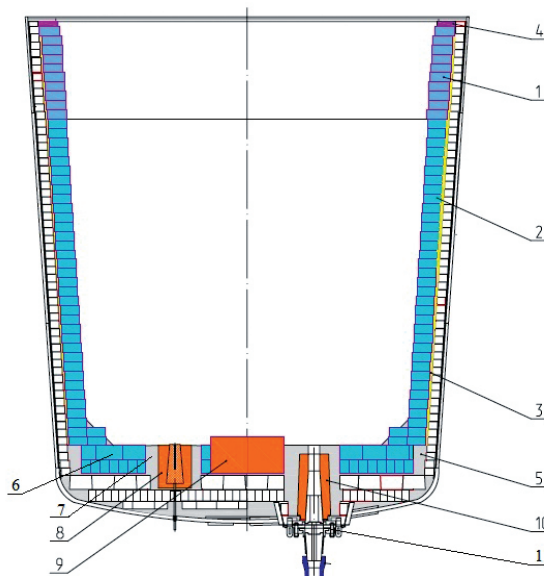


Рис. 2.6. Схема футеровки сталеразливочного ковша:
рабочий слой футеровки:

- 1 — шлаковый пояс; 2 — уровень стали; 3 — буферная засыпка;
- 4 — обороточная масса; 5 — набивная масса; 6 — дно ковша; 7 — набивная масса;
- 8 — продувочный узел с гнездовым блоком; 9 — бойная плита;
- 10 — разливочный блок; 11 — шиберный затвор

В соответствии с условиями службы ковша футеровка должна иметь температуру начала деформации не менее 1750 °С; выдерживать перепады температур при заливке стали в ковш, обработке и выдаче стали из ковша; противостоять коррозионному и эрозионному разрушению жидкими металлом и шлаком, а также шлакообразующими компонентами; обладать небольшой теплопроводностью, теплоемкостью и усадкой при температурах службы; в процессе внепечной обработки не взаимодействовать с вводимыми в металл реагентами, выдерживать воздействие переменных газовых сред и не пропитываться расплавами в условиях промышленного вакуума.

2.5. Нагревательные печи

Для нагрева металла под прокатку и ковку, при термообработке металла (закалке, отпуске, модифицировании поверхности проката и готовых изделий) применяются разнообразные нагревательные печи. Они могут быть проходными (для непрерывной обработки металла) и периодическими, камерными. По способу движения металла проходные печи подразделяются на методические (толкательные и с шагающими балками) — рис. 2.7, роликовые и кольцевые — рис. 2.8.

Методические печи являются печами непрерывного действия с постоянным во времени и переменным по длине печи температурным режимом. Наиболее распространен трехзонный режим нагрева металла, при котором он проходит три теплотехнических зоны: методическую (подогрева), сварочную (нагрева) и томильную (выравнивания температур). В зависимости от назначения и нагреваемого металла температура в нагревательных печах может достигать 1450–1470 °С. Основное влияние на конструкцию и характер работы нагревательных печей оказывает способ транспортирования металла в рабочем пространстве печи. В зависимости от размера (толщины или диаметра) нагреваемых заготовок или изделий нагрев может организовываться как по односторонней схеме (как правило, сверху), так и по двухсторонней (сверху и снизу). По расположению горелок различают торцевую, сводовую и боковую системы отопления, часто они могут совмещаться.

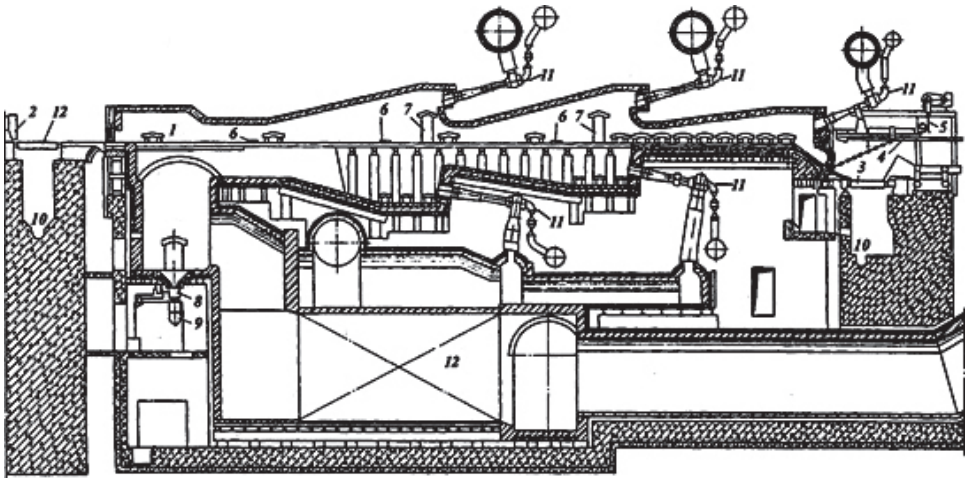


Рис. 2.7. Методическая толкательная печь с торцевой загрузкой и выдачей, с нижним обогревом, отапливаемая с помощью инъекционных горелок, установленных в пяти зонах отопления:

1 — рольганг загрузки; 2 — толкатель; 3 — рольганг выдачи; 4 — механизм для освобождения монолитного пода от заготовок; 5 — механизм открывания заслонки окна выдачи; 6 — отбойник; 7 — ложное окно; 8 — лётка для удаления шлака; 9 — желоб гидросмыва окалины; 10 — лоток для смыва окалины из-под рольганга; 11 — горелки; 12 — рекуператор

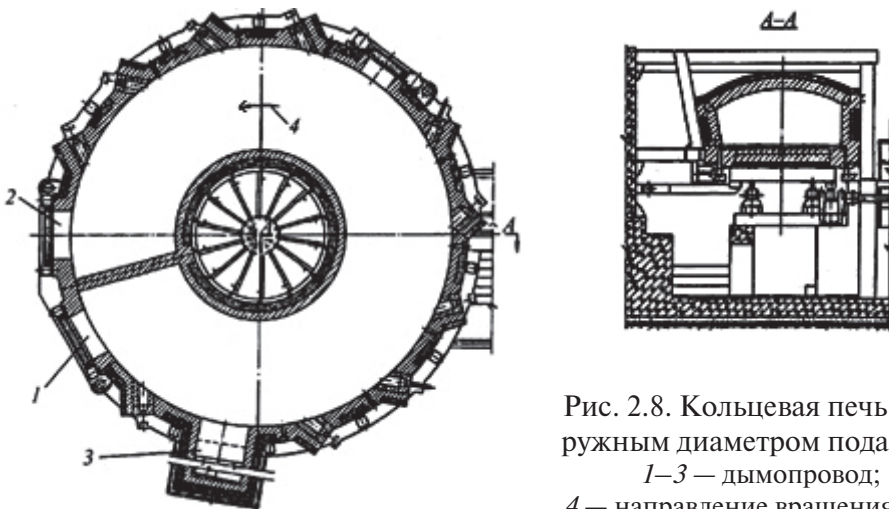


Рис. 2.8. Кольцевая печь с наружным диаметром пода 10 м:

1—3 — дымопровод;
4 — направление вращения пода

Условия службы огнеупоров в футеровках нагревательных печей

Нагревательные печи — печи открытого высокотемпературного нагрева, в которых металл довольно сильно окисляется, особенно в сварочной и томильной зонах. Образующаяся окалина частично осыпается на падину, а частично уносится потоками печных газов на свод и в систему дымоудаления. Причем температура в печи может быть близка к температуре плавления окислов, поэтому на поверхности футеровки (как на падине, так и на своде) возможно образование жидкого шлака. Осыпавшаяся окалина сплавляется в бугры и втирается в футеровку падины, мешая транспортировке заготовки. Поэтому падина в нагревательных печах испытывает ударные, сжимающие (давящие) и истирающие нагрузки при движении заготовки через печь; химические нагрузки от воздействия жидкой окислы и печной пыли, а также абразивные нагрузки со стороны запыленного газового потока. При движении заготовок по нагревательной печи возможно их боковое смещение и ударные нагрузки на футеровку боковых стен. Поэтому рабочий слой футеровки боковых стен должен обладать высокой механической прочностью. В тяжелых условиях работают своды нагревательных печей. Здесь наиболее высокие температуры, особенно в агрегатах со сводовым отоплением. На свод действует геометрический напор горячих продуктов сгорания, которые могут фильтроваться через неплотности свода, вызывая разогрев футеровки и конструкций крепления свода. На свод оказывается также химическое и абразивное воздействие со стороны газопылевого потока печных газов, вызывающих зонообразование в огнеупорах рабочего слоя. Наибольшее воздействие на стойкость футеровки свода нагревательных печей оказывают резкие перепады температуры при смене штатных режимов работы печей («рабочий ход», «холостой ход») и при внеплановых технологических остановках/запусках печей.

2.6. Термические печи

Почти ко всем печам для термообработки предъявляются требования по точности температуры нагрева металла от ± 20 °С и менее. В этих условиях на точность нагрева и расход энергоресурсов решающее вли-

яние оказывают тепловая инерция и теплоемкость футеровки теплового агрегата. Для различных видов термической обработки изделий штучного и мелкосерийного производства предназначены камерные печи колпаковые, с выкатным подом и другие, работающие в широком интервале температур.

Такие печи должны обеспечивать точность заданного теплового режима при минимальном расходе энергоресурсов. Поэтому в футеровке камерных печей широкое применение получили изделия из теплоизоляционных огнеупорных материалов, волокнистых и керамических легковесных, обладающих малой теплопроводностью, теплоемкостью и тепловой инерцией.

В практике современного печестроения такие футеровки монтируют или на предварительно смонтированные конструкции печи, или до их монтажа в проектное положение.

Таким образом, термические печи являются теплотехническими агрегатами периодического действия, на футеровку которых, кроме тепловых нагрузок, воздействуют и динамические, возникающие в периоды снятия и установки нагреваемых изделий в печь. Теплоизоляционные футеровки не боятся резких перепадов температур, позволяют нагревать и охлаждать футеровку с любой заданной скоростью.

2.7. Вращающиеся печи

Вращающиеся печи широко распространены на самых различных предприятиях во всех промышленно развитых странах мира.

Широкое технологическое применение этот вид оборудования получил в цветной металлургии.

В этой отрасли вращающиеся печи применяют для спекания бокситовой и нефелиновой пульп, прокаливания гидрата окиси алюминия, обжига цементного клинкера (при комплексной переработке нефелина на окись алюминия, цемент, соду, поташ), обжига бокситовой руды, выщелачивания спёка (трубчатый выщелачиватель), а также в качестве реакционных агрегатов в производстве фторида алюминия, криолита и для других целей.

В других отраслях промышленности (химия, черная металлургия, строительные и огнеупорные материалы и др.) вращающиеся печи —

один из основных видов печного оборудования в крупномасштабных производствах для термической обработки сыпучих, реже — кусковых материалов.

По энергетическому признаку трубчатые вращающиеся печи относятся к печам-теплообменникам с переменным по длине режимом тепловой работы. На участке, где происходит горение топлива и температура продуктов сгорания достигает 1550–1650 °С, осуществляется радиационный режим работы печи. По мере продвижения продуктов сгорания топлива по длине печи они охлаждаются до нескольких сот градусов и режим тепловой работы печи постепенно становится конвективным. Конкретное распределение по печи зон с конвективным и радиационным режимами работы зависит от вида и параметров технологического процесса.

Трубчатые вращающиеся печи, за исключением получивших небольшое распространение печей для сушки сульфидного сырья, работают в режиме противотока. Загружаемая в печь шихта может иметь различную степень влажности, вплоть до пульпы, содержащей до 40 % воды. Она подается в верхнюю (хвостовую) часть печи и медленно движется навстречу газам, образующимся в результате сгорания топлива в головной части агрегата. Из барабана перерабатываемые продукты в виде спека или раскаленного порошкообразного материала поступают в специальный холодильник, а газообразные продукты сжигания топлива вместе с технологическими газами направляются в систему пылегазоочистки. В зависимости от вида перерабатываемого материала для отопления трубчатых вращающихся печей могут быть использованы: природный газ, мазут и твердое топливо в виде коксовой мелочи или угольной пыли.

2.7.1. Общие конструктивные характеристики печей

Обычно вращающимися трубчатыми печами называют агрегаты непрерывного действия с рабочим пространством в виде полого цилиндра.

В конструктивном отношении вращающиеся печи отличаются в основном только размерами и устройством систем загрузки и выгрузки материалов. Общий вид трубчатой вращающейся печи показан на рис. 2.9. Ее основными элементами являются корпус (барабан), приводной механизм, опорные бандажи, а также загрузочная и разгрузочная камеры.

Корпус печи представляет собой сварную металлическую трубу диаметром до 5 м и длиной до 185 м, футерованную изнутри огнеупор-

ным кирпичом. Он опирается на специальные ролики, ширина пролета между которыми составляет для больших печей 26–28 м. Для перемещения материала корпус наклонен к горизонту под углом в 2,5–3°. Привод печи, с помощью которого она вращается со скоростью около 1 об/мин, состоит из электродвигателя, редуктора и зубчатой передачи.

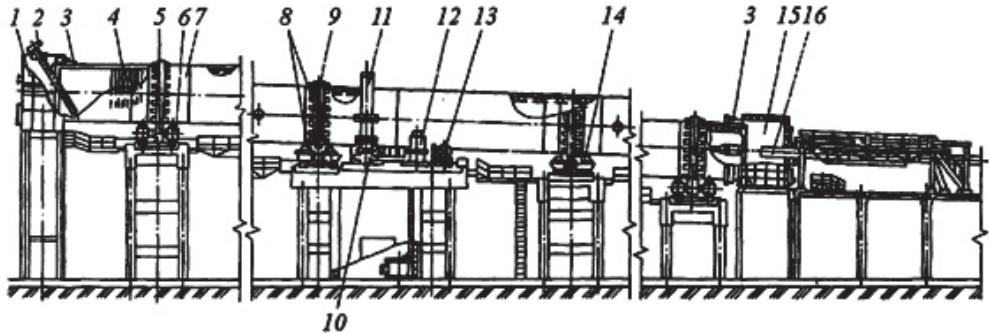


Рис. 2.9. Трубчатая вращающаяся печь:

- 1, 15 — верхняя и нижняя головки печи; 2 — загрузочное устройство;
 3 — уплотнение; 4 — цепная завеса; 5 — опорный ролик; 6 — подшипник;
 7 — барабан; 8 — упорный рочик; 9 — бандаж; 10–12 — редуктор; 13 — двигатель;
 14 — упорное устройство; 16 — форсунка

Опорные бандажи кольцевой формы воспринимают всю нагрузку от массы барабана, достигающую 70–80 т. Для больших печей применяют кованные бандажи прямоугольного сечения, которые надевают на корпус свободно, с небольшим зазором, учитывая последующее тепловое расширение барабана. Каждый бандаж опирается на два ролика, вращающиеся во время работы печи.

Верхний торец печи входит в загрузочную камеру. Сухую шихту загружают в печь с помощью шнекового питателя через патрубок, расположенный в загрузочной камере. Пульпа подается в печь через пульповую трубу ковшом-дозатором или с помощью специальной форсунки. Улавливаемая пыль возвращается в барабан печи, как и сухая шихта.

Нижний торец печи входит в разгрузочную камеру. Между ней и барабаном ставят специальное кольцевое уплотнение. В передней стенке камеры имеются отверстия для установки горелочных устройств. К ней также примыкает устье канала, по которому готовый продукт пересыпается в холодильник. Для предотвращения налипания влаж-

ной шихты на стенки барабана и настыеобразования в холодном конце печи устанавливают цепные завесы.

Несколько иную конструкцию представляет собой вращающаяся печь для обжига сыпучих материалов, например огнеупорных.

И в данном случае вращающаяся печь представляет собой длинный барабан, установленный с уклоном 3–5 % и вращающийся со скоростью 0,5–1,2 об/мин. В верхний холодный конец барабана, входящий в пылевую камеру, подается обжигаемый материал. Нижний горячий конец барабана входит в откатную головку, через которую в печь подается топливо. Обожженный материал через щели откатной головки поступает в холодильник. Холодильники печей для обжига огнеупорных материалов представляют собой металлический сварной барабан, опирающийся двумя бандажами на две пары опорных роликов. Привод холодильников самостоятельный; число оборотов холодильника больше, чем печи, и составляет от 3 до 6 в минуту. Холодильник чаще всего располагают под обжигательным барабаном с уклоном от 5 до 7°. Длина холодильника 15–25 м, отношение диаметра холодильника к диаметру печи 0,62–0,75. Воздух, проходя по холодильнику, охлаждает материал и нагретым поступает в зону горения в качестве вторичного.

В названии печи обычно отражено название реализуемого в ней технологического процесса. Так, например, различают вельц-печи, применяемые для вальцевания кеков цинкового производства, печи для спекания бокситов, кальцинации глинозема, обжига ртутьсодержащих материалов, а также печи для сушки различных промежуточных продуктов металлургического производства, печи для получения цементного клинкера.

2.7.2. Вращающиеся печи для получения цементного клинкера

Вращающаяся печь для обжига цементного клинкера представляет собой полуу, футерованную изнутри огнеупорным материалом трубу, установленную на опорах с уклоном в сторону разгрузки. Подвергающийся обжигу материал движется навстречу потоку газов, образующихся при сгорании топлива (пылеугольного, газа или мазута), подаваемого через горелки в разгрузочной части печи.

В зависимости от способа подготовки сырьевого материала для обжига (мокрый шлам или сухая сырьевая мука) различают два способа производства цемента — мокрый и сухой. В длинных вращающихся

ся печах мокрого способа производства, оснащенных внутripечными теплообменными устройствами, все процессы термoхимической обработки материала происходят от начала до конца — от подачи в печь исходного сырьевого шлама и его сушки до выхода из печи обожженного цементного клинкера. Для интенсификации процесса в подготовительных зонах печи устанавливают теплообменные устройства — цепные завесы, лопастные или ячеeйковые теплообменники.

Каждая из стадий превращения сырьевой смеси в цементный клинкер происходит на определенном отрезке по длине печи.

Таким образом, вращающуюся печь можно разделить на ряд технологических зон, каждая из которых характеризуется определенной температурой дымовых газов и зависящими от нее физико-химическими превращениями в сырьевой смеси, которые в совокупности и определяют выбор конструкции и материала футеровки той или иной зоны. Основные конструктивные характеристики вращающихся печей — диаметр и длина. Для печей по мокрому способу получения цемента отношение длины к среднему диаметру колеблется в пределах 27–41, по сухому способу — 15–17.

В коротких вращающихся печах сухого способа производства завершаются термoхимические процессы обжига клинкера — декарбонизация и клинкерообразование. Предварительная термическая подготовка сырьевой муки происходит в запечном циклонном или шахтно-циклонном теплообменнике, который может быть оснащен реактором — декарбонизатором. В ряде случаев в качестве запечного теплообменника используют конвейерный кальцинатор.

Температура материала, поступающего в печь, составляет 700–800 °С, температура отходящих газов в газоходе — 1050–1150 °С.

При скорости газов 15–20 м/с в циклонах и газоходах сырьевая смесь находится во взвешенном состоянии, чем обеспечивается большая поверхность теплообмена и высокая скорость ее нагрева.

В сравнении с мокрым способом сухой имеет ряд преимуществ: более низкий расход тепла на обжиг, высокая удельная производительность. Однако печи с циклонными теплообменниками более чувствительны к изменениям в режиме работы из-за колебаний в химическом составе сырья и топлива.

Футеровка в различных зонах вращающейся печи должна обладать рядом качеств, позволяющих успешно сопротивляться факторам ее износа.

В зоне испарения, находящейся в холодной части печи, футеровка подвергается действию жидкотекучего шлама, с одной стороны, и нагретых до высокой температуры (от 1000 °С в начале и до 200 °С в конце зоны) дымовых газов — с другой. Существенное влияние на ее стойкость оказывают и механические воздействия от ударов элементов цепных завес. Таким образом, футеровка зоны испарения должна обладать высокой плотностью, препятствующей проникновению влаги на кожух печи, достаточной огнеупорностью, а также солидной механической прочностью в сочетании с вязкостью, которая позволяла бы успешно противостоять воздействию постоянных ударных нагрузок.

В зоне подогрева и дегидратации футеровка подвергается воздействию газов при температурах 1000–1300 °С и сырьевой смеси с температурой до 600 °С. Потеря химически связанной воды приводит к тому, что глинистый компонент сырьевой смеси теряет связывающие свойства, пластичность и рассыпается в порошок. Таким образом, условия службы футеровки в этой зоне довольно благоприятные, так как отсутствуют резкие термические колебания и значительные механические нагрузки, а температура отходящих газов относительно невысока.

В зоне декарбонизации, где происходит процесс разложения известняка, требующий больших тепловых затрат, благодаря чему эта зона — наиболее напряженная в тепловом отношении часть печи, температура материала колеблется в пределах 800–1000 °С, а температура дымовых газов достигает более 1500 °С. Но так как шихтовые материалы в этой зоне не образуют ни четко выраженных кристаллов, ни жидкой фазы, условия службы футеровки довольно благоприятны, ибо, кроме высоких температурных воздействий, особых нагрузок она не испытывает.

В зоне экзотермических реакций при температурах печных газов около 1600 °С с большой скоростью протекает реакция взаимодействия между основными и кислотными окислами сырьевой смеси. В результате происходит резкое повышение температуры материала, примерно до 1300 °С, что создает довольно тяжелые температурные условия службы футеровки на этом участке печи, усугубляющиеся механическим воздействием на нее образовавшихся кристаллов.

На футеровку газоходов и циклонных теплообменников при сухом способе получения цементного клинкера по всему тракту существенное воздействие оказывает высокая абразивность (содержание пыли) печных газов и их высокая скорость, достигающая 15–20 м/с.

Температура отходящих газов составляет обычно 1050–1150 °С, а увеличение расхода топлива для интенсификации технологического процесса

зачастую приводит к частичному его сгоранию в газоходе первой ступени, результатом чего является размягчение и частичное спекание сырьевой смеси, сопровождающееся налипанием ее на стены и зависанием, следовательно, футеровка должна быть также устойчива к воздействию высоких температур и успешно сопротивляться химической агрессии.

На теплообменники, которые выполняются во вращающихся печах диаметрами до 5 м, работающих по мокрому способу получения цементного клинкера на участках зон дегидратации и декарбонизации, влияют: температурные нагрузки дымовых газов 1000–1200 °С в сочетании с высокими их скоростями и непрерывные ударные нагрузки пересыпающейся сырьевой смеси.

На футеровку колосниковых холодильников наиболее существенное влияние оказывают температурные воздействия от поступающего раскаленного цементного клинкера и вибрационные нагрузки, возникающие при движении колосников. Абразивные воздействия от частичек охлаждаемого клинкера незначительны из-за относительно небольших скоростей газовых потоков.

Таким образом, футеровка колосниковых холодильников должна успешно противостоять температурным и вибрационным нагрузкам и сохранять температуру подогреваемого (вторичного) воздуха, которая достигает 800 °С при двукратном его прососе через слой клинкера.

Аналогичные воздействия испытывает футеровка переходной вставки и шахты холодильника.

Футеровка пылевых камер испытывает действие относительно невысоких температур отходящих печных газов в сочетании с их высокой абразивностью. Кроме того, на нее влияют вибрационные нагрузки, которые в этом элементе хотя и невелики, но весьма опасны из-за довольно значительных габаритных размеров стен вертикальной части пылевой камеры.

2.8. Стекловаренные печи

2.8.1. Назначение и устройство

Печи для производства стекломассы называют стекловаренными. Различают горшковые, ваннные и электрические стекловаренные печи. Горшковые печи служат для изготовления оптического, светотехнического стекла и хрусталя, электрические печи — также для выпуска стекла специальных марок.

В наиболее распространенных ваннных печах непрерывного действия с шестью и девятью машинами вертикального вытягивания стекла получают листовое стекло.

Печь состоит из верхнего строения — ванны или рабочего пространства 1; горелок 9, каркаса 4 и нижнего строения — регенераторов 6; боровов внешних и внутренних 7 с шиберами и опорных столбов 8.

Рабочее пространство печи ограничено дном ванны, окружкой (боковыми стенами) и сводом, делится на варочную часть 1, где происходит загрузка шихты 17, плавка и осветление стекломассы, и студочную часть 15, где стекломасса подстывает перед поступлением на машины вертикального вытягивания 12.

Варочная часть 4 (рис. 2.10) отделяется от студочной низко опущенной плоской аркой — пережимом 2. Назначение ее — поддерживать в студочной части постоянные температурные условия, не допуская горячие газы из варочной части печи.

Дно студочной части выше дна варочной на толщину одного бруса. Студочная часть заканчивается в месте примыкания ее к перпендикулярно расположенному поперечному машинному каналу. Машинный канал состоит из проточного канала 17, соединяющегося со студочной частью и выработочными 11, 12, 15 каналами, из которых стекломасса поступает в машины вертикального вытягивания стекломассы.

2.8.2. Условия службы огнеупоров и требования к их качеству

Требования к материалам для футеровки стекловаренных печей определяются спецификой работы этих тепловых агрегатов, которая состоит:

- в непрерывном характере технологического процесса и требуемой продолжительности межремонтного периода 8–10 лет;
- температурных условиях эксплуатации огнеупоров в рабочем пространстве (1550–1620 °С) и варочном бассейне (1350–1550 °С);
- агрессивном воздействии щелочесодержащей газовой среды и стекломассы на огнеупорную футеровку, а также влиянии продуктов разрушения огнеупоров на качество стекломассы;
- необходимости минимизации тепловых потерь через футеровку, что обеспечит эффективное расходование энергоресурсов;
- необходимости подогрева воздуха, подаваемого на горение, до 1250–1350 °С и использовании насадок регенераторов в течение все кампании печи;

- снижении стоимости футеровки за счет рациональной раскладки огнеупоров, учитывающей неравномерный характер их износа в конструкции.

При эксплуатации в стекловаренных печах огнеупоры испытывают различные нагрузки. В стенах и сводах печей — сжатие, в стенах стекловаренных горшков — растяжение, в зубьях ванной печи — поперечный изгиб, в стенах ванной печи (при большой высоте кладки) и сводах — продольный изгиб, во вращающихся деталях питателей — кручение. Однако больше всего огнеупоры изнашиваются в бассейне печи от действия стекольной массы, в пламенном пространстве и регенераторах от конденсатов шихтной пыли и веществ, испаряющихся из шихты и с поверхности стекломассы. Наиболее агрессивное действие на огнеупоры оказывают шихта и стекломасса с повышенным содержанием щелочей, а также содержащая фтористые, свинцовые и бариевые соединения.

В наиболее тяжелых условиях работают огнеупоры варочной части печи. На них воздействует температура 1500–1600 °С, жидкие шлаки и потоки стекломассы с высокой химической активностью.

При этом существенное влияние на более интенсивное разъедание огнеупоров оказывает колебание уровня, вызывающее расширение участка с максимальной величиной разъедания, а также применение сульфата натрия для осветления стекломассы или для введения в стеклооксида натрия. Благодаря низкому поверхностному натяжению сульфат хорошо смачивает огнеупорный материал, легко проникает в его поры и активно диффундирует внутрь с разложением многих химических соединений. Структурные и текстурные особенности огнеупоров для футеровки ванны стекловаренной печи зачастую оказывают на их стойкость при эксплуатации большее влияние, чем химический состав.

Значительная коррозия огнеупоров наблюдается в горизонтальных швах. Чем они тоньше, тем меньше разрушение огнеупорной футеровки. Уменьшения толщины швов достигают за счет правильной геометрической формы изделий, их тщательной обработки и подгонки. Предельная толщина горизонтального шва составляет 0,5 мм. На некоторых ответственных участках бассейна печи огнеупорные изделия кладут насухо, пришлифовывая их друг к другу в процессе предварительной стендовой сборки.

В пламенном пространстве печи в большей степени разрушаются влеты горелок. Огнеупоры, работающие в таких условиях, должны пре-

жде всего обладать высокой стеклоустойчивостью, достаточной термостойкостью, выдерживать механические нагрузки при высоких температурах, а также резкие колебания температуры, сохранять постоянство объема, правильность формы и точность размеров.

Стеклоустойчивость или стойкость огнеупоров к коррозии — важнейшее свойство огнеупоров. Процесс коррозии огнеупорных материалов — сложное явление. Он состоит в том, что, во-первых, составляющие компоненты расплава стекла смачивают и пропитывают огнеупор по его поровой структуре, затем химически реагируют с материалом огнеупора, во-вторых, компоненты огнеупора физически растворяются в расплаве, сначала межзерновое вещество, что вызывает образование «свилей» в стекломассе, а затем — зерна, которые образуют в стекломассе такой порок, как «камень».

Особенно высокой стеклоустойчивостью и термической стойкостью должны обладать огнеупорные детали питателя машин вытягивания стекломассы (чаша, секция лотка, цилиндр, плунжер, очко), так как загрязнение стекломассы на заключительной стадии технологического процесса устранить в дальнейшем практически невозможно.

Таким образом, основными требованиями к огнеупорам для стекловаренных печей являются химический состав, обеспечивающий высокую химическую стойкость к стекольным расплавам (включающую плохую смачиваемость огнеупора расплавом и отсутствие химического взаимодействия между ними при рабочих температурах процесса); низкую открытую пористость; высокую механическую прочность и высокую стойкость к ползучести (крипу).

2.9. Коксовая батарея

Коксовая батарея, состоящая из серии коксовых печей, служит для переработки каменных углей и позволяет получить более двухсот наименований продуктов, основным из которых является кокс.

2.9.1. Устройство и принцип работы коксовых батарей

Современная коксовая батарея — сложный теплотехнический агрегат. Основной технологический процесс протекает в камерах коксования, где угольная шихта нагревается без доступа воздуха до 900—1050 °С. При этом происходит высокотемпературное разложение углей

с выделением газообразных продуктов и формированием твердого остатка — кокса.

Угольная шихта подается в камеру при помощи загрузочного вагона через люки загрузки. Являясь частью коксовой печи (рис. 2.11), камера коксования образуется двумя боковыми стенами из огнеупорного кирпича.

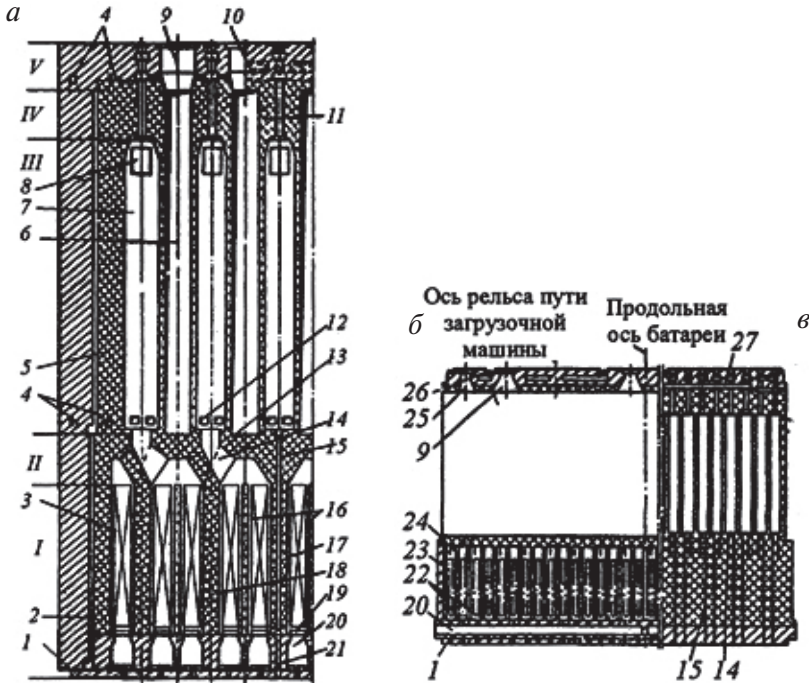


Рис. 2.11. Фрагмент коксовой батареи:

a — поперечный разрез; *б* — разрез по камере коксования;

в — разрез по обогревательному простенку;

I — первая зона (регенераторы); II — вторая зона (коксходы); III — третья зона (вертикалы); IV — четвертая зона (перекрытие вертикалов); V — пятая зона (перекрытие печей);

1 — выстилка; 2 — температурный шов у изоляционной стены; 3 — камера регенератора с насадкой; 4 — горизонтальные вентиляционные каналы;

5 — изоляционные стены; 6 — камера коксования; 7 — вертикал;

8 — перевальное окно; 9–10 — забутка; 11 — смотровая шахточка;

12 — окна рециркуляции; 13 — под камеры; 14 — косой ход;

15 — газоподводящий (дюзовый) канал; 16 — разделительная перегородка;

17 — насадка; 18 — стена регенератора (дюзовый простенок); 19 — колосниковая решетка; 20 — подовый канал; 21 — отверстие в выстилке; 22 — отверстие

в колосниковой решетке; 23 — зеркало; 24 — секционная перегородка;

25 — газовый люк; 26 — продольная анкерная стяжка; 27 — растопочный канал

Внутри этих стен устроены вертикальные обогревательные каналы — вертикалы. Стену с обогревательными каналами называют обогревательным простенком. Сверху камера коксования ограничена сводом, в котором имеется 3—4 загрузочных люка для засыпки в печь угольной шихты и 2 газовых люка для выхода из печи газов, образующихся при коксовании. Чтобы в камеру коксования не проникал воздух, загрузочные люки плотно закрывают чугунными крышками, а торцевые проемы камеры — футерованными шамотом дверьми специальной конструкции. Снизу камера коксования ограничена подом. Ширина камеры коксования переменная — она постепенно увеличивается в направлении выдачи кокса, чтобы уменьшить трение между коксовым пирогом и стенками камеры.

В основание каждого из вертикалов обогревательных простенков подводят воздух и отопительный газ — коксовый или доменный. Воздух и доменный газ предварительно подогревают в регенераторах. Камеры регенераторов размещают ниже камер коксования и заполняют насадкой. Предварительный подогрев воздуха и доменного газа до 900—1000 °С снижает расход газа на обогрев.

В нижней части вертикалов, работающих на восходящем потоке, отопительный газ и воздух смешиваются, газ загорается от нагретых стенок и образуется факел горения с температурой до 1500 °С. Выделяющееся при этом тепло передается угольной загрузке через стены камеры коксования. Продукты горения через вертикалы с нисходящим потоком газа, косые ходы, регенераторы и подовые каналы направляются в борова, а оттуда через дымовую трубу — в атмосферу.

Направление газового потока в каждом вертикале периодически изменяют. Соответственно меняется направление потока газов и в камерах регенераторов. При этом продукты горения, проходя из вертикалов через регенератор (нисходящий поток) по пути к дымовой трубе, нагревают насадку. После очередного переключения системы обогрева кантовки через камеры регенераторов с нагретой насадкой пропускают доменный газ, если он применяется для обогрева, и воздух (восходящий поток). В этот период нагретая насадка передает тепло воздуху или доменному газу.

Группировка коксовых печей в батарее вызвана необходимостью объединить системы подвода отопительных газов и отвода газов коксования, машины по обслуживанию загрузки и выдачи, борова и фундаменты. Кроме того, в батарее каждая пара соседних камер коксования

обогревается совместно, рационально расходуется тепло, огнеупорные и другие материалы.

Загрузочный вагон перемещается по рельсовым путям, уложенным по верху батареи. На нем имеется 3–4 бункера (соответственно числу загрузочных люков печи), вмещающих шихту в количестве, необходимом для загрузки одной камеры коксования. Шихту загружают в камеру коксования не до самого верха: под сводом остается свободное пространство для отвода образующегося газа через газовые люки, стояки и газосборники в систему газопроводов, транспортирующих коксовый газ на переработку.

Время коксования шихты в печи в зависимости от конструктивных особенностей камеры коксования и температуры обогрева составляет 14–17,5 ч.

По окончании коксования готовый кокс выдается из печи с помощью коксовыталкивателя, двересъемной машины с коксонаправляющей и вагона для перевозки раскаленного кокса. Коксовыталкиватель перемещается по рельсовым путям вдоль фронта печей. Эта сторона батареи называется машинной. Пути коксовыталкивателя укладывают на железобетонном основании. Двересъемная машина с коксонаправляющей передвигаются вдоль фронта печей с противоположной стороны коксовой батареи, называемой коксовой стороной.

Операции по выдаче кокса выполняют в следующем порядке. Сначала отводят двери, закрывающие печь с торцов. Для этого коксовыталкиватель и двересъемная машина имеют специальные двересъемные устройства. К торцевой стороне коксового пирога подводят штангу коксовыталкивателя. Головка штанги упирается в коксовый пирог и при движении штанги выталкивает его из печи, после чего двери закрываются и процесс повторяется.

2.9.2. Условия службы огнеупоров и требования к их качеству

В процессе эксплуатации кладка различных конструктивных элементов коксовой батареи подвергается разрушающему воздействию высоких температур, достигающих в отопительной системе 1410–1450 °С, а в устройствах для отвода продуктов сгорания — минимум 300 °С. Кроме того, кладка подвергается воздействию механических сжимающих нагрузок со стороны собственной массы футеровки и коксующегося угля и ударных нагрузок со стороны загружаемой шихты;

истиранию коксом при его выдаче; резким колебаниям температур при загрузке влажной угольной шихты и выгрузке готового кокса; восстановительному воздействию со стороны печной атмосферы и восстановительных газов (СО); разъедающему воздействию парогазовых продуктов коксования.

Таким образом, требованиями к огнеупорам для коксовых батарей следует признать:

- высокую механическую прочность и ударную вязкость;
- температуру эксплуатации (температуру начала деформации) не менее 1450 °С;
- высокую термическую стойкость при температурах выше 1000 °С;
- высокую плотность и малую открытую пористость;
- малое содержание оксидов переменной валентности, которые могут восстанавливаться в активной восстановительной среде с разрушением структуры огнеупора;
- высокую стойкость к ползучести (крипу).

3. Проектирование футеровки теплового агрегата

Проектирование футеровки теплового агрегата состоит из следующих этапов.

1. Описание технологического процесса производства материала в заданном тепловом агрегате:

- описание технологического процесса;
- описание конструкции теплового агрегата;
- анализ разрушающих факторов, действующих на футеровку;
- выбор материала для рабочего слоя футеровки;
- анализ термомеханических свойств выбранного огнеупорного материала.

2. Проектирование многослойной футеровки теплового агрегата:

- выбор материалов для арматурного и теплоизоляционных слоев футеровки;
- оценка эффективной теплопроводности футеровки;
- проверка правильности выбора материалов для арматурного и теплоизоляционных слоев футеровки.

3. Расчет раскладки и количества изделий для рабочего слоя футеровки.

4. Расчет допустимых скоростей нагрева футеровки.

3.1. Технологический процесс производства продукта

3.1.1. Технология работы агрегата

По данным, полученным на технологической практике, данным технического задания или технологического регламента, литературным данным необходимо описать процесс производства продукта (чугуна, стали; сплавов на основе меди, алюминия, титана; стекломассы; це-

ментного клинкера и т. п.). Полностью описываются процессы, происходящие в заданном тепловом агрегате (доменная печь, конвертер, дуговая печь, сталеразливочный ковш, отражательная печь, ванная печь, вращающаяся печь):

- цель обработки продукта в агрегате;
- стадии обработки и их задачи с указанием температуры, среды, используемых шихтовых и вспомогательных материалов, шлакового режима, реакций, происходящих в материале и шлаке в процессе обработки;
- факторы, воздействующие на футеровку на каждой стадии обработки.

Для полного понимания процесса рекомендуется создать технологическую схему производства продукта в заданном агрегате с указанием химических составов шлака/расплава на каждой стадии обработки, продуктов, выделяющихся в газовую, жидкую и твердую фазы, их количества.

3.1.2. Конструкция теплового агрегата

Необходимо описать конструкцию теплового агрегата и существующие типы конструкций его футеровок. Для принятия оптимального решения рекомендуется оценить достоинства и недостатки существующих типов футеровок, сравнить возможные механизмы износа, среднюю стойкость футеровки теплового агрегата.

3.1.3. Разрушающие факторы, действующие на футеровку

Проанализировать и выбрать основные разрушающие факторы в технологии по отношению к футеровке теплового агрегата (механический износ, химический износ, абразивный износ, резкие перепады температур, совместное действие нескольких факторов):

- высокая температура (принимаются, если нет других факторов; определить максимальную температуру);
- механические нагрузки (подины и стены нагревательных и термических тепловых агрегатов; оценить максимальные механические нагрузки и вид нагрузок — сжатие, изгиб, растяжение);
- перепады температур (футеровки или элементы футеровок, по режиму работы агрегата подвергающиеся резкопеременным тепловым нагрузкам; определить частоту, начальную и конечную температуры, скорость изменения температур);

- абразивные нагрузки (шахты вертикальных печей, газоходы, рекуператоры; оценить твердость абразивных частиц и интенсивность воздействия);
- химические нагрузки (плавильные агрегаты, футеровки, подвергающиеся воздействию расплавов, жидкой окалины, активной газовой фазы, печной пыли).

3.1.3.1. Оценка основности шлака

Для оценки активности (основности) шлака/расплава/пыли на каждой стадии процесса необходимо рассчитать его ионную долю свободного кислорода (по Тёмкину) и модуль основности.

Шлак представляет собой расплав оксидов с некоторым количеством сульфидов, а в ряде случаев — фторидов и является побочным продуктом плавки. Однако он играет очень важную роль в протекании процессов в сталеплавильных агрегатах и оказывает существенное влияние на качество стали. В зависимости от состава шлак может быть окислительным или восстановительным по отношению к металлу и растворенным в нем примесям.

Меняя состав шлака и, соответственно, химическую активность находящейся в нем закиси железа, можно регулировать окислительно-восстановительные процессы в стали. Шлак может поглощать из металла вредные для стали примеси — серу и фосфор — и не допускать проникновение в металл азота, водорода и кислорода из печной атмосферы.

Шлак ограничивает интенсивность нагрева металла и является теплоизоляционной прослойкой на поверхности металла.

В состав сталеплавильных шлаков входят оксиды с различными химическими свойствами: основные — CaO , MgO , MnO , FeO , Na_2O , K_2O , кислотные — SiO_2 , P_2O_5 , Cr_2O_3 , S , F и амфотерные — Al_2O_3 , Fe_2O_3 .

Оксиды Al_2O_3 и Fe_2O_3 часто относят к амфотерным, так как в шлаковом расплаве в зависимости от условий они могут проявлять основные или кислотные свойства, а также участвовать в процессе образования каркаса расплава. Наиболее ярко выраженными основными свойствами в сталеплавильных шлаках обладает CaO , а кислотными свойствами — SiO_2 и P_2O_5 .

В зависимости от состава шлака и, соответственно, его физико-химических свойств различают два главных типа сталеплавильных шлаков:

- 1) кислые, в которых преобладает кремнезем (48–65 %);
- 2) основные, в которых преобладают основные оксиды.

В процессе плавки шлак образуется в результате действия следующих факторов:

- 1) окисления компонентов шихты (FeO , SiO_2 , MnO , Cr_2O_3);
- 2) специальных добавок железной руды (Fe_2O_3 , SiO_2 и др.), восстановителя (C), шлакообразующих — извести (CaO), плавикового шпата (CaF_2), шамота (SiO_2 , Al_2O_3 и др.), песка (SiO_2);
- 3) ошлакования огнеупорной футеровки печи (MgO , Al_2O_3 , SiO_2).

Химические и теплофизические (температура плавления, вязкость) свойства шлаков во многом определяются соотношением концентраций основных и кислотных оксидов, которая может быть оценена либо основностью шлака (i), либо, более точно, ионной долей свободного кислорода $n_{\text{O}^{2-}}$.

При $i \geq 2,235$ шлаки являются основными, при $i \leq 0,54$ шлаки являются кислыми, при $0,54 \leq i \leq 2,235$ шлаки являются нейтральными.

Практически применяется следующая шкала основности в зависимости от значения (i):

- кислые при (i) $\leq 0,9$;
- низкой основности 1,1–1,7;
- средней основности 1,9–2,5;
- высокой основности $\geq 2,7$.

Универсальной формулой для определения основности шлака (i) является отношение суммы концентраций основных оксидов к сумме концентраций кислотных и амфотерных оксидов:

$$i = \frac{(\text{CaO}) + (\text{MgO}) + (\text{FeO}) + (\text{MnO}) + (\text{Na}_2\text{O}) + (\text{K}_2\text{O}) + \dots}{(\text{SiO}_2) + (\text{Al}_2\text{O}_3) + (\text{Fe}_2\text{O}_3) + (\text{P}_2\text{O}_5) + (\text{SO}_3) + (\text{Cr}_2\text{O}_3) + \dots} \quad (3.1)$$

Для шлака заданного состава основность будет равна:

Оксид	SiO_2	CaO	MgO	FeO	Al_2O_3	P_2O_5	MnO	F	S
Содержание, мас. %	11,0	42,0	5,0	17,0	3,0	9,0	10,0	1,0	2,0

Тогда

$$i = \frac{42,0 + 17,0 + 5,0 + 10,0}{11,0 + 3,0 + 9,0 + 1,0 + 2,0} = 2,85.$$

Таким образом, заданный шлак относится к группе высокоосновных.

В случае если сумма оксидов в химическом составе шлака не равна 100 % или в составе присутствуют потери при прокаливании, химический состав шлака должен быть приведен к 100 %.

Шлаки имеют ионное микрогетерогенное строение. Простые катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} и др. с анионами кислорода имеют преимущественно (более 50 %) ионную связь. Атомы Si, P, Al образуют с кислородом сложные анионные полимерные комплексы: SiO_4^{4-} , AlO_3^{3-} , PO_4^{3-} и др., в которых атомы с кислородом имеют преимущественно ковалентную связь. Строение расплава является результатом борьбы между «сильными» и «слабыми» катионами за кислородные анионы. Чем слабее катион, тем больше ионов кислорода переходит к кремнекислородным группам, при этом образуются более сложные полимерные кремнекислородные анионы $\text{Si}_x\text{O}_y^{z-}$, $\text{Al}_m\text{O}_n^{k-}$ и т. п. (рис. 3.1). С увеличением содержания в шлаке CaO, MgO, FeO, MnO размеры полимерных комплексов уменьшаются, что приводит к снижению вязкости расплава.

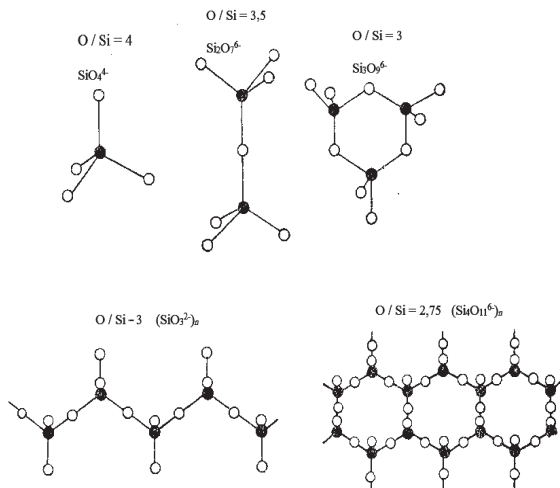


Рис. 3.1. Комплексные ионы типа $\text{Si}_x\text{O}_y^{z-}$ при разных отношениях O:Si

В рамках ионной теории строения шлака М. И. Тёмкиным разработана модель совершенного ионного раствора, которая предусматривает выполнение следующих условий:

- шлак состоит только из ионов;
- одноименно заряженные ионы являются равноценными в отношении взаимодействия с ионами противоположного знака и отличаются только величиной заряда;

- ближайшими соседями любого иона являются ионы, имеющие противоположный заряд, то есть анионы могут обмениваться местами только с анионами, а катионы — с катионами;
- теплота смешивания частиц при образовании совершенного ионного раствора равняется нулю, вследствие этого энергия и энтальпия раствора аддитивно складываются из энергий и энтальпий отдельных его компонентов; однако энтропия смешивания отличается от таковой для совершенного раствора незаряженных компонентов: она равняется сумме энтропий смешивания, рассчитанных отдельно для катионов и анионов.

При соблюдении этих условий активность каждого иона в совершенном ионном растворе численно равна его ионной доле, а активность оксида — произведению ионных долей катиона и аниона, образующих данный оксид.

Наибольшую активность в шлаке имеют ионы свободного кислорода. Поэтому необходимо в шлаках определять ионную долю свободного кислорода $n_{O^{2-}}$. Пример расчета приведен ниже. Число свободных ионов кислорода равно разности числа ионов кислорода, внесенных двухвалентными металлами, и числа ионов кислорода, связанных в сложные анионы:

$$n_{O^{2-}} = n_{FeO} + n_{MgO} + n_{CaO} + n_{MnO} - 2n_{SiO_2} - 3n_{P_2O_5} - 3n_{Al_2O_3} - n_{F^-} - n_{S^{2-}}.$$

Число молей оксида в шлаке n_{RA} равно отношению количества оксида (индивидуального вещества) в шлаке (C_{RA}) к его молярной массе

$$(M_{RA}): n_{RA} = \frac{C_{RA}}{M_{RA}}$$

В расчетах n_{i^-} и n_{i^+} учитывается, что 1 г-моль основного оксида дает: 1 г-катион и 1 г-анион кислорода: $CaO = Ca^{2+} + O^{2-}$; $MgO = Mg^{2+} + O^{2-}$ и т. д;

1 г-моль SiO_2 связывает 2 г-иона кислорода: $SiO_2 + 2O^{2-} = SiO_4^{4-}$;

1 г-моль P_2O_5 связывает 3 г-иона кислорода: $P_2O_5 + 3O^{2-} = 2PO_4^{3-}$;

1 г-моль Al_2O_3 связывает 3 г-иона кислорода: $Al_2O_3 + 3O^{2-} = 2AlO_3^{3-}$;

1 г-моль Fe_2O_3 связывает 1 г-ион кислорода: $Fe_2O_3 + O^{2-} = 2FeO_2^{1-}$.

Каждый грамм-моль кислотного оксида образует:

SiO_2 — один анион SiO_4^{4-} ; P_2O_5 — два аниона PO_4^{3-} ; Al_2O_3 — два аниона AlO_3^{3-} ; Fe_2O_3 — два аниона FeO_2^{1-} .

Ионная доля кислорода является более точной мерой основности шлака (расплава).

Таблица 3.1

Расчет доли свободного кислорода в шлаке

Состав шлака, % оксид количес- тво	Число молей		Ионы кислорода		Число молей		Ионная доля	
	внесено	связано	катионы	анионы	катионы	анионы	катионы	анионы
CaO 42,0	$n_{\text{CaO}} = \frac{42}{56} = 0,750$ $1n_{\text{CaO}} = \frac{42}{56} = 0,750$	—	$n_{\text{Ca}^{2+}} = 0,750$	—	$n_{\text{Ca}^{2+}} = 0,750$	—	$N_{\text{Ca}^{2+}} = 0,599$	—
FeO 17,0	$n_{\text{FeO}} = \frac{17}{72} = 0,236$ $1n_{\text{FeO}} = \frac{17}{72} = 0,236$	—	$n_{\text{Fe}^{2+}} = 0,236$	—	$n_{\text{Fe}^{2+}} = 0,236$	—	$N_{\text{Fe}^{2+}} = 0,188$	—
MnO 10,0	$n_{\text{MnO}} = \frac{10}{71} = 0,141$ $1n_{\text{MnO}} = \frac{10}{71} = 0,141$	—	$n_{\text{Mn}^{2+}} = 0,141$	—	$n_{\text{Mn}^{2+}} = 0,141$	—	$N_{\text{Mn}^{2+}} = 0,113$	—
MgO 5,0	$n_{\text{MgO}} = \frac{5}{40} = 0,124$ $1n_{\text{MgO}} = \frac{5}{40} = 0,124$	—	$n_{\text{Mg}^{2+}} = 0,124$	—	$n_{\text{Mg}^{2+}} = 0,124$	—	$N_{\text{Mg}^{2+}} = 0,100$	—
SiO ₂ 11,0	$n_{\text{SiO}_2} = \frac{11}{60} = 0,183$ $2n_{\text{SiO}_2} = \frac{11}{60} = 0,183$	$4n_{\text{SiO}_2} = 0,732$	—	$n_{\text{SiO}_4^{4-}} = 0,183$	—	$n_{\text{SiO}_4^{4-}} = 0,183$	—	$N_{\text{SiO}_4^{4-}} = 0,183$
Al ₂ O ₃ 3,0	$n_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{3}{102} = 0,029$ $3n_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{3}{102} = 0,029$	$6n_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0,174$	—	$n_{\text{AlO}_3^{3-}} = 0,058$	—	$n_{\text{AlO}_3^{3-}} = 0,058$	—	$N_{\text{AlO}_3^{3-}} = 0,0585$
P ₂ O ₅ 9,0	$n_{\text{P}_2\text{O}_5} = \frac{9}{142} = 0,064$ $5n_{\text{P}_2\text{O}_5} = \frac{9}{142} = 0,064$	$8n_{\text{P}_2\text{O}_5} = 0,513$	—	$n_{\text{PO}_4^{3-}} = 0,128$	—	$n_{\text{PO}_4^{3-}} = 0,128$	—	$N_{\text{PO}_4^{3-}} = 0,128$

Окончание табл. 3.1

Состав шлака, %	Число молей		Ионы кислорода		Число молей		Ионная доля	
			внесено	связано				
оксид чество								
F	1,0	$n_F = \frac{1}{19} = 0,053$	—	$0,5n_F = 0,026$	—	$n_{F^-} = 0,053$	—	$N_{F^-} = 0,053$
S	2,0	$n_S = \frac{2}{32} = 0,063$	—	$n_S = 0,063$	—	$n_{S^{2-}} = 0,063$	—	$N_{S^{2-}} = 0,063$
		—	$n_{O^{2-}(\text{внес})} = 2,024$	$n_{O^{2-}(\text{св})} = 1,507$	—	—	—	—
—			$n_{O^{2-}} = n_{O^{2-}(\text{внес})} - n_{O^{2-}(\text{св})} = 0,517$		—	$n_{O^{2-}} = 0,517$	—	$N_{O^{2-}} = 0,517$
		—			$\Sigma n^+ = 1,251$	$\Sigma n^- = 1,002$	$\Sigma N^+ = 1,000$	$\Sigma N^- = 1,000$

Установлено, что начальная стадия разъедания огнеупора шлаком находится в прямой зависимости от концентрации свободного кислорода в расплаве. С увеличением доли свободного кислорода связи Si—O—Si разрываются и заменяются на связи Si—O—Me (рис. 3.2). Химическая активность и вязкость шлака при этом уменьшается. На контакте «шлак — огнеупор» свободные ионы кислорода могут переходить в твердую фазу огнеупора с образованием низковязких расплавов, что ускоряет разрушение огнеупора.

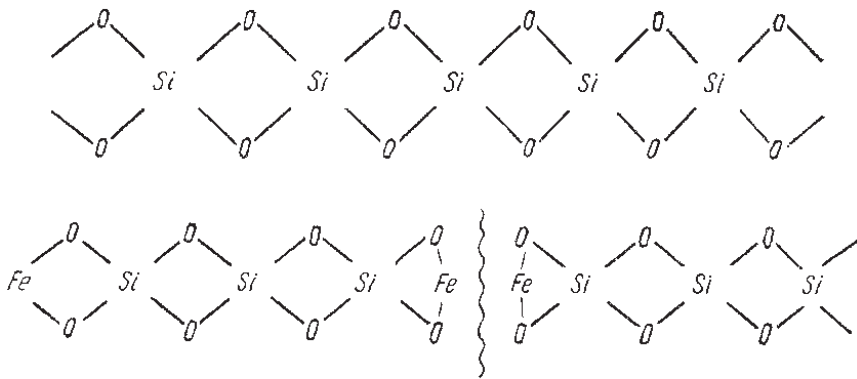


Рис. 3.2. Увеличение доли свободного кислорода при дроблении полимерных цепочек введением основных оксидов

Что касается общей активности шлака в зависимости от основности, при i до 2,5 агрессивность шлака возрастает, а при основности более 2,5, при образовании $2\text{CaO}-\text{SiO}_2$ при высоких температурах (1600°C) происходят быстрая кристаллизация двухкальциевого силиката и резкое повышение вязкости шлака. Таким образом, наибольшая агрессивность металлургического шлака проявляется в определенном интервале его основности к определенным видам огнеупоров. Например, по отношению к алюмосиликатным огнеупорам при температурах до 1600°C интервал агрессивности шлака находится при его основности в пределах 1,3–2,5. К основным огнеупорам наиболее активны кислые шлаки в интервале основности менее 1,3.

В общем случае нельзя говорить об «агрессивных» и «неагрессивных» шлаках, нужно говорить о соответствии основности шлака и огнеупора. Основность огнеупора может быть определена по формуле (3.1).

3.1.3.2. Оценка вязкости шлака

Еще одной важной характеристикой расплава (шлакового, металлического, стекломассы), влияющей на процесс его взаимодействия с огнеупором, является вязкость. Вязкость характеризует внутреннее трение в жидкости. Согласно уравнению Ньютона, силы внутреннего трения связаны со скоростью движения следующей зависимостью:

$$F = S \cdot \eta \left(\frac{d\omega}{dn} \right), \text{ [Н]}, \quad (3.2)$$

где S — поверхность двух слоев жидкости, см^2 , сдвигающихся друг относительно друга на расстоянии dn , см , со скоростью $d\omega$, см/с .

В данном уравнении η — коэффициент вязкости или, как его называют, вязкость жидкости. Если принять все величины равными единице, то вязкость характеризует силу F , действующую на 1 см^2 поверхности слоев жидкости, отстоящих один от другого на 1 см и движущихся с разницей скоростей в 1 см/сек .

Вязкость

$$\eta = \frac{F}{S} \cdot \frac{1}{\frac{d\omega}{dn}} \text{ Па}\cdot\text{с}. \quad (3.3)$$

Вязкость расплавленных шлаков определяется строением расплава и силами взаимодействия между отдельными ионами. Различают два типа вязкости¹⁾: структурную вязкость, обусловленную силами связи атомов в крупных комплексных ионах, подвижность которых ограничена, и электростатическую вязкость, вызываемую электростатическими силами взаимодействия между катионами и анионами.

Для расплавов, в которых много длинных цепочек и крупных комплексных ионов, вязкость определяется в основном структурой расплава. Именно поэтому кислые расплавы характеризуются высокой вязкостью.

Для основных расплавов, состоящих из мелких легкоподвижных ионов, вязкость обусловлена в основном электростатическими силами, пропорциональными количеству ионов и их заряду, и относительно невелика.

С повышением температуры расплава комплексные ионы частично диссоциируют, крупные ионы дробятся, подвижность всех ионов растет. Поэтому такие условия вызывают значительно более резкое падение вязкости кислых расплавов, чем основных. Вследствие повышения температуры расплава сразу уменьшается вязкость. Существует

¹⁾ Чернышев А. М. Вязкость и минералогический состав первичных доменных шлаков : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М. : 1952. 135 с.

целый ряд эмпирических формул, связывающих вязкость с температурой. Для расплавов типа шлака наиболее универсальной является форма уравнения Аррениуса:

$$\eta = A_a e^{\frac{1000 B_a}{T}} \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad (3.4)$$

где A_a и B_a — эмпирические коэффициенты, которым часто придается физический смысл; T — температура, К.

Величина, обратная вязкости, характеризует текучесть расплава.

Величина вязкости характеризует внутреннюю структуру жидкости. Так, например, удлинение цепи кремнеземистых групп в расплавах повышает вязкость расплавов при одной и той же температуре. Наибольшей вязкостью отличается силикатный расплав из чистого SiO_2 (кварцевый расплав), строение которого имеет наиболее длинные цепочки.

При введении в силикатный расплав основных окислов FeO , CaO , MgO , которые диссоциируют и освобождают ионы кислорода, происходит разрыв цепочек по кислороду (рис. 3.2), длина цепочек уменьшается, что вызывает падение вязкости расплава. На этом явлении основано флюсование, применяемое для разжижения шлака.

Еще более активными агентами, разрушающим полимерную структуру оксидных расплавов, являются вещества, изменяющие анионную подрешетку структуры расплава (вытесняющие кислород из оксидов) — F^- , Cl^- . Они также активно разрушают оксидные огнеупоры. Таким образом, увеличение расхода, например, фторида кальция CaF_2 резко снижает стойкость огнеупоров сталеплавильного агрегата.

При вязкости расплава шлака $\geq 3,5$ Па·с шлак не взаимодействует с футеровкой. Данная величина вязкости служит основой для организации работы футеровки в гарнисажном режиме.

Другим свойством расплавов, определяющим ряд процессов (смачиваемость огнеупоров шлаками, проникновение шлака в структуру огнеупора и образование тонких пленок), является поверхностное натяжение. Поверхностное натяжение выражается энергией, необходимой для образования единицы новой поверхности раздела двух фаз, или силой, действующей при этом на один линейный сантиметр поверхности пленки.

На процесс взаимодействия шлакового расплава с огнеупором большое влияние оказывает и процесс смачивания поверхности огнеупора расплавом. Смачиваемость расплавом той или иной поверхности характеризуется формой капли на этой поверхности или, точнее, кра-

евым углом смачивания. На границе трех фаз действуют тангенциальные к границам раздела силы поверхностного натяжения $F_{ТГ}$, $F_{ТЖ}$, и $F_{ЖГ}$ — соответственно в плоскости раздела фаз твердой и газообразной, твердой и жидкой, жидкой и газообразной.

Угол смачивания определяется из уравнения Юнга:

$$\cos \alpha = \frac{F_{ТЖ} - F_{ТГ}}{F_{ЖГ}}. \quad (3.5)$$

Природа сил поверхностного натяжения обусловлена различным притяжением молекул на границе раздела двух фаз: внутрь расплава и наружу.

Механизм смачивания огнеупора шлаковым расплавом определяется, прежде всего, молекулярным строением шлака и огнеупора. В случае, когда огнеупор и шлаковый расплав представляют собой диполи, происходит соответствующее взаимодействие диполей и ориентировка молекул расплава на поверхности твердого огнеупора и ее смачивание. Когда же только одно из рассмотренных тел имеет дипольное строение, ориентирующие электростатические силы взаимодействия отсутствуют и расплав не смачивает поверхности.

За последнее время в литературе появился ряд указаний на возможность снижения шлакоразъедания огнеупоров благодаря обработке их поверхностей соединениями, снижающими смачиваемость футеровки шлаками.

Известно, например, что поверхностное натяжение расплавов уменьшается при увеличении содержания в них окислов V_2O_5 , MoO_3 , PbO и увеличивается при добавке TiO_2 , Cr_2O_3 , ZrO_2 ²⁾.

Для расчета вязкости расплава шлака используются эмпирические методы (установление корреляционных связей для анализируемой совокупности данных) и полуэмпирические модели, базирующиеся на теоретических моделях вязкого течения, строения расплава и эмпирических коэффициентах.

В настоящее время наиболее обоснованной моделью строения расплавов системы $SiO_2-Al_2O_3-CaO-MgO-FeO$ являются метод Watt & Fereday³⁾ и модель Urban et al⁴⁾. Основные характеристики этой модели заключаются в замене многокомпонентной системы расплава

²⁾ Куколев Г. В. Химия кремния и физическая химия силикатов. М. : Промстройиздат, 1971. 165 с.

³⁾ Watt J. D., Fereday F. The flow properties of slag formed from the ashes of British coals: Part I. Viscosity of homogeneous liquid slags in relation to slag composition // Journal of the Institute of Fuel. 1969. Vol. XLII. No. 338. P. 99–103.

⁴⁾ Urbain G., Bottinga Y., Richet P. Viscosity of liquid silica, silicate and alumino-silicates // Geochim. Cosmochim. Acta. 1982. Vol. 46. P. 1061–1072.

трехкомпонентной и принятии условия однозначности связи коэффициентов A_a и B_a , т. е. достаточности прогнозирования всего одного показателя для описания всей зависимости «вязкость — температура». По Урбану шлаки рассматриваются как сложные силикатные расплавы, которые содержат комплексобразующие компоненты X_K (SiO_2), модификаторы структуры X_M (CaO , MgO) и амфотерные X_{AM} (Al_2O_3) компоненты. Полученный при таком разделении трехкомпонентный состав характеризуется содержанием комплексобразователей X_K и отношением модификатора сетки и амфотерных компонентов $a = X_M / (X_M + X_{AM})$.

На основе модели Урбана предложено несколько полуэмпирических уравнений расчета вязкости шлаковых расплавов, из которых наиболее общее признание имеют уравнения Калмановича и Франка⁵⁾ и уравнение, разработанное японскими учеными корпорации «Kokan Mining Co. Ltd»⁶⁾.

Метод Калмановича — Франка

Расчетная схема Калмановича — Франка по модифицированной модели Урбана имеет следующую последовательность расчета.

1-й шаг. Химический состав анализируемой пробы пересчитывается в мольные доли, при этом содержание железа дается в виде FeO . Далее для этого метода приняты обозначения: CaO — мольная доля CaO при принятии всего железа в двухвалентной форме и т. п.

2-й шаг. Определяется величина M в **мольных долях**:

$$M_k = \text{CaO} + \text{Mg} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{FeO} + 2 \times \text{TiO}_2 + \text{MnO}.$$

3-й шаг. Рассчитывается параметр α в мольных долях:

$$\alpha = M_k / (M_k + \text{Al}_2\text{O}_3).$$

4-й шаг. Определяется параметр B_k :

$$B_k = B_0 + B_1 \times \text{SiO}_2 + B_2 \times (\text{SiO}_2)^2 + B_3 \times (\text{SiO}_2)^3,$$

$$\text{где } B_0 = 13,8 + 39,9355 \times \alpha - 44,049 \times \alpha^2;$$

$$B_1 = 30,481 - 117,1505 \times \alpha + 129,9978 \times \alpha^2;$$

$$B_2 = -40,9429 + 234,0486 \times \alpha - 300,04 \times \alpha^2;$$

$$B_3 = 60,7619 - 153,9276 \times \alpha + 211,1616 \times \alpha^2.$$

5-й шаг. Рассчитывается величина A_k :

$$A_k = -(0,2812 \times B_k + 11,8279).$$

⁵⁾ Kalmanovitch D. P., Frank M. An effective model of viscosity for ash deposition phenomena // Proc. Conf. on Mineral Matter and Ash Deposition from Coal. 1988. P. 89–101.

⁶⁾ Iida T., Sakai H., Kita Y., Shigeno K. An equation for accurate prediction of the viscosities of blast furnace type slags from chemical composition // ISIJ Int. 2000. Vol. 40. P. 110–114.

6-й шаг. Рассчитывается натуральный логарифм вязкости (в пуазах) при текущей температуре, выраженной в градусах Кельвина:

$$\ln(\eta) = A_k + \ln T + (1000 \times B_k / T).$$

Метод «Kokan Mining Co. Ltd»

Базовый вид уравнения расчета вязкости решили оставить прежним:

$$\eta = A\eta_0 \exp\left(\frac{E}{B}\right), \quad (3.6)$$

где A и E — коэффициенты зависимости вязкости шлака от температуры, η_0 — вязкость гипотетически чистых оксидов в расплаве, B — приведенный коэффициент основности.

Вязкость шлака очень сильно зависит от физического нагрева. Коэффициенты A и E рассчитываются по уравнениям второго и первого порядка соответственно, которые учитывают влияние температуры на суммарную вязкость каждого из оксидов расплава (коэффициент A) и влияние температуры на вязкость при приведенном коэффициенте основности (коэффициент E). Уравнения для расчета коэффициентов A и E имеют вид

$$\begin{aligned} A &= 1,745 - 1,961 \times 10^{-3} T + 7,060 \times 10^{-7} T^2; \\ E &= 11,13 - 3,65 \times 10^{-3} T, \end{aligned} \quad (3.7)$$

где T — температура расплава, К.

Рассчитанные по этим уравнениям температурные коэффициенты применимы только в интервале температур от 1330 до 1700 °С, что соответствует температуре большинства металлургических процессов. Авторы оригинальной методики вывели эти уравнения, изучая опытным путем зависимость вязкости оксидных расплавов от температуры. Эмпирические коэффициенты в уравнениях для расчета температурных коэффициентов A и E были подобраны с таким расчетом, чтобы как можно точнее подходить к экспериментальным данным, полученным для полусинтетических шлаковых расплавов, взятых за образцы, а также соответствовать стандартному описанию измерений вязкости материалов для высоких температур.

Модифицированный коэффициент основности B , который используется в методике, может быть рассчитан по формуле

$$B = \frac{\sum(\alpha_i M_i)_B + \alpha_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^* M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}{\sum(\alpha_i M_i)_A + \alpha_{\text{Al}_2\text{O}_3}^* M_{\text{Al}_2\text{O}_3} + \alpha_{\text{TiO}_2}^* M_{\text{TiO}_2}}, \quad (3.8)$$

где α_i — специфический коэффициент; M_i — массовый процент оксида в шлаке; A, B — индексы кислых и основных оксидов соответственно; α^* — модифицированный специфический коэффициент.

Приведенному коэффициенту основности отведена важная роль в данной методике. Как видно из формулы приведенного коэффициента основности, по сравнению с используемыми обычно коэффициентами основности $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$, $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3}$ и т. д. в нашем случае считает-

ся, что на основность шлака оказывают разное влияние не только кислые (индекс A) и основные (индекс B) оксиды, но также содержащийся в некоторых шлаках и повышающий основность Fe_2O_3 . Кроме того, особо учитывается влияние на основность Al_2O_3 и TiO_2 (чего обычно раньше не делалось): для этих оксидов выведены особые уравнения для расчета специфического коэффициента α^* . Ввести этот коэффициент было предложено авторами оригинальной методики исключительно с целью повышения ее точности.

При разработке и унификации уравнений для расчета специфического коэффициента α^* для Al_2O_3 авторы опирались на опытные данные, полученные для 34 различных составов полусинтетической четырехкомпонентной системы $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--CaO--MgO}$. Это позволило установить достаточно точно температурную зависимость влияния оксида алюминия на основность шлака. Уравнение для $\alpha^*_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ как функции показателя основности B и массовой доли Al_2O_3 в шлаковом расплаве имеет следующий вид:

$$\alpha^*_{\text{Al}_2\text{O}_3} = aB + bW_{\text{Al}_2\text{O}_3} + c, \quad (3.9)$$

где a, b, c — эмпирические коэффициенты, рассчитываемые по уравнениям:

$$\begin{aligned} a &= 1,2 \times 10^{-5} T^2 - 4,3552 \times 10^{-2} T + 41,16; \\ b &= 1,4 \times 10^{-7} T^2 - 3,4944 \times 10^{-4} T + 0,2062; \\ c &= -8,00 \times 10^{-6} T^2 + 2,5568 \times 10^{-2} T - 22,16. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Для других компонентов значения для специфического коэффициента α_i , определенные авторами оригинальной методики, приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Значения для специфического коэффициента α_i для компонента i

Компонент		α_i
Кислые оксиды	SiO ₂	1,48
Амфотерные оксиды	Al ₂ O ₃	0,10
	TiO ₂	0,36
Основные оксиды	CaO	1,53
	MgO	1,51
	K ₂ O	1,37
	Na ₂ O	1,94
	MnO	1,03
	FeO	0,96
Фториды	CaF ₂	1,53

Коэффициент η_0 — вязкость несетевых формирующихся (гипотетических) расплавов. Важным моментом в понимании данной методики является утверждение о том, что расплавленные шлаки (стекломассы) имеют беспорядочную сетевую структуру, то есть молекулы этих оксидов образуют единую химически связанную пространственную сетку. Свойства вещества в таком случае определяются молекулярной структурой сетки. При этом такого рода плавление легко ускоряется при наличии разного рода примесей (других оксидов, ионов OH⁻ и т. д.). Следовательно, можно сделать предположение: так как шлак (расплав стекломассы) является многокомпонентной системой, то структура сеток чистых оксидов под воздействием температуры, других химических соединений и процессов самоассоциации стеклообразователей непрерывно меняется. Значит, при рассмотрении влияния каждого из присутствующих в шлаке (расплаве) компонентов на вязкость системы считаем, что структурные изменения каждого из них не влияют на вязкость, этот фактор уже учитывается при расчете приведенного коэффициента основности.

Общая формула расчета данного коэффициента:

$$\eta_0 = \sum_{i=1}^n \eta_{0i} \cdot X_i, \quad (3.11)$$

где η_{0i} — вязкость каждого i -го гипотетически чистого оксида в расплаве, X_i — массовая доля i -го оксида в шлаке.

Вязкость чистых оксидов, которые находятся в расплавленном состоянии в шлаке, непосредственно в расплаве определить невозможно, так как температуры плавления одних чистых оксидов очень высоки, других, например щелочных оксидов, — очень низки, и при температурах процессов они кипят (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Температуры плавления некоторых чистых оксидов

Элемент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	FeO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	CaF ₂
$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	1710	2050	1870	2630	2825	1368	1275	740	1780	1418

Рассчитать величину η_{0i} для каждого из оксидов можно, используя формулу

$$\eta_{0i} = 1,8 \times 10^{-7} \frac{[M_i(T_m)_i]^{1/2} \exp\left(\frac{H_i}{RT}\right)}{(V_m)_i^{2/3} \exp\left[\frac{H_i}{R(T_m)_i}\right]}, \quad (3.12)$$

$$H_i = 5,1 \cdot (T_m)_i^{1/2},$$

где M_i — массовая доля i -го вещества, при пересчете состава к 100 %, T_m — температура в точке плавления i -го вещества, V_m — молярный объем в точке плавления i -го вещества, R — универсальная газовая постоянная, X — мольная доля i -го вещества.

Однако сами авторы признают приблизительность расчета вязкости несетевых оксидов по вышеприведенной формуле. Поэтому для расчета вязкости применяют не вычисленные по этой формуле значения, а используют аппроксимирующие уравнения, полученные на основе экспериментальных данных при помощи методов математической статистики:

$$\eta_{\text{oSiO}_2} = -0,0095 \times \ln(T) + 0,0722;$$

$$\eta_{\text{oAl}_2\text{O}_3} = -0,0231 \times \ln(T) + 0,1753;$$

$$\eta_{\text{oiCaF}_2} = -0,4956 \times \ln(T) + 0,3475;$$

$$\eta_{\text{oCaO}} = -0,0862 \times \ln(T) + 0,648;$$

$$\eta_{\text{oMgO}} = -0,1532 \times \ln(T) + 1,1497;$$

$$\eta_{\text{oTiO}_2} = -0,0177 \times \ln(T) + 0,1348;$$

$$\eta_{\text{oK}_2\text{O}} = -0,0006 \times \ln(T) + 0,0046;$$

$$\eta_{\text{oNa}_2\text{O}} = -0,0012 \times \ln(T) + 0,0097;$$

$$\eta_{\text{oMnO}} = -0,0174 \times \ln(T) + 0,1332;$$

$$\eta_{\text{oFeO}} = -0,007 \times \ln(T) + 0,0541.$$

Из расчетов видно, что наиболее высока при производственных температурах вязкость основных оксидов CaO и MgO, так как они имеют и самую высокую температуру плавления (табл. 3.3). Отдельной группой можно выделить оксиды Al₂O₃, MnO, TiO₂ — их вязкость в чистом виде при производственных температурах лежит в интервале (6,6–8) × 10⁶ Па·с. Наименьшую вязкость имеют оксиды FeO (~4 × 10⁶ Па·с) и K₂O, Na₂O (до 10⁶ Па·с), а также фторид кальция.

Эти уравнения имеют область применения, ограниченную рабочим температурным интервалом 1330–1700 °С, что соответствует реальной температуре большинства металлургических и стекловарочных процессов. Данное утверждение основано на том, что характер всех кривых η_{0i} для изученного температурного интервала остается неизменным. Использование разработанных уравнений значительно упрощает расчет.

Алгоритм расчета вязкости по методу «Kokan Mining Co. Ltd»

1. Определить химический состав расплава (шлака), привести его к системе SiO₂–Al₂O₃–FeO–CaO–MgO–TiO₂–K₂O–Na₂O–MnO–CaF₂ и привести состав к 100 %.

2. Определить температуры процесса (температурный интервал).

3. Рассчитать вязкость каждого гипотетически чистого оксида в расплаве η_{0i} .

4. Рассчитать вязкость несетевого (неструктурированного расплава) η_0 .

5. Рассчитать коэффициент основности расплава B .

6. Рассчитать коэффициенты A и E для заданной температуры (интервала температур).

7. Рассчитать вязкость расплава по формуле (3.12) для заданной температуры (температурного интервала).

3.1.3.3. Выбор типа огнеупора для заданных условий эксплуатации

Для обоснованного выбора типа огнеупоров для рабочего слоя футеровки теплового агрегата необходимо:

- определить основные оксиды шлака/расплава и огнеупора;

- привести состав зоны химического взаимодействия между шлаком/расплавом и огнеупором к тройной диаграмме состояния ($\text{CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ и т. п.);
- оценить температуру плавления на границе шлака/расплава и огнеупора, количество и темп роста количества жидкой фазы по соответствующей диаграмме состояния.

Для этого необходимо сделать следующее.

1. Исходя из основности и состава расплава и литературных данных выбрать тип и группу огнеупорного материала для рабочего слоя футеровки, стойкого к заданному шлаку/расплаву при температурах процесса (согласно ГОСТ 28874–2004 «Огнеупоры. Классификация»).

Необходимо исходить из требования соответствия основности огнеупора и шлака/расплава с учетом критериев взаимодействия (термодинамического — ΔG_T^0 , энергетического — ΔU_{am} , электрохимического — φ_{Mc}^0 и критерия поверхностной энергии — $\cos \Theta$) и структуры (открытой пористости, размеров пор).

2. Для выбранных типов огнеупоров определить основной оксид (соединение) и выбрать тройные (четверные) диаграммы, описывающие взаимодействие заданного шлака/расплава с выбранными огнеупорами.

Для чего привести состав шлака/расплава к двухкомпонентной системе (CaO-SiO_2 , CaO-FeO , $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ и т. п.), исходя из содержания оксидов в шлаке/расплаве и их химической активности.

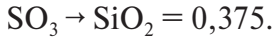
Принцип пересчета заключается в том, что все компоненты делятся на три или четыре группы по признаку химического подобия — щелочные (R^+), щелочноземельные (R^{2+}), полуторные (R^{3+}) и кислые (R^{4+}). Все оксиды приводятся внутри одной группы (щелочные — к щелочным или щелочноземельным, полуторные — к полуторным, кислые — к кислым).

Для пересчета пользуются переходными коэффициентами, выведенными на основании правила Рихтерса: оксиды плавня влияют на температуру соответственно их эквивалентным массам, т. е. молекулярным массам, отнесенным к количеству катионов в формуле. Пример коэффициентов:

$\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 = 0,9$ (в системах $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, $\text{K}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$),
и $0,64$ (в системах с MgO);

$\text{K}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} = 0,7$, $\text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} = 0,9$;

$\text{MgO} \rightarrow \text{CaO} = 1,40$, $\text{MgO} \rightarrow \text{K}_2\text{O} (\text{Na}_2\text{O}) = 2,5$;



Проанализировать фазовые диаграммы состояния (основные оксиды шлага — основные оксиды огнеупора), определить количество и вязкость расплава в анализируемых диаграммах. Оценить механизм и скорость износа огнеупора на контакте с заданным расплавом (шлаком, стекломассой).

Пример

Выбрать материал для рабочего слоя футеровки мартеновской печи для выплавки рядовой конструкционной углеродистой стали.

Температура процесса — 1600–1650 °С. В процессе плавки проходят: период плавления, окислительный период (десульфурация и дефосфация стали), восстановительный период (восстановление железа из шлага), легирование и выпуск стали.

Химический состав шлага перед раскислением, мас. %: SiO_2 —20, CaO — 39, MgO — 6, Al_2O_3 —8, FeO — 14, Fe_2O_3 —5, MnO — 8.

Таким образом, на рабочий слой футеровки ванны мартеновской печи воздействуют:

- температура до 1650 °С;
- переменная окислительно-восстановительная среда;
- механические нагрузки со стороны загружаемого (динамические) и перерабатываемого (статические) металла;
- химические нагрузки со стороны расплава металла и шлага.

Наиболее активным расплавом в исследуемом процессе, в химическом отношении, является шлаг периода окисления (кипения). Основность шлага

$$K_{\text{ос}} = \frac{(\text{CaO}) + (\text{MgO}) + (\text{FeO}) + (\text{MnO})}{(\text{SiO}_2) + (\text{Al}_2\text{O}_3) + (\text{Fe}_2\text{O}_3)} = 2,03.$$

Это соответствует среднеосновным шлакам, к которым стойки огнеупоры нейтрального химического состава (шамотные, высокоглиноземистые, периклазохромитовые, периклазоциркониевые и т. п.).

Из указанных типов огнеупоров шамотные не могут эксплуатироваться при температурах выше 1450 °С из-за малой температуры начала деформации под нагрузкой (1400 °С) и малой химической стойкости к расплавам на основе железа. Группа высокоглиноземистых огнеупоров имеет температуру эксплуатации от 1500 до 1700 °С. Срок эксплуатации высокоглиноземистых огнеупоров в рабочем слое пла-

вильных агрегатов зависит от содержания Al_2O_3 , плотности (открытой пористости) огнеупорных изделий. Но высокоглиноземистые огнеупоры имеют низкую химическую стойкость по отношению к расплавам, содержащим железо. Даже муллитовые особоплотные изделия хорошо смачиваются и взаимодействуют с железосодержащим шлаком с образованием герценита $FeOAl_2O_3$, который разрыхляет структуру огнеупора.

Магнезиальные огнеупоры образуют с железом (как в окисленной, так и восстановленной форме) высокоогнеупорные соединения, при этом оксид магния может поглотить до 60 об. % оксида железа, не изменяя параметров кристаллической решетки, т. е. без разрыхления структуры. Введение в структуру периклаза хромитовой руды, а лучше плавленного хромита повышает химическую стойкость материала за счет снижения угла смачиваемости и образования при спекании термодинамически стабильных хромшпинелидов.

Наиболее оптимальным выбором следует признать периклазошпинелидные или хромитопериклазовые плотные огнеупоры из плавленных порошков. Возможно рассматривать изделия периклазоциркониевые, но они существенно дороже, хотя и показывают большую стойкость.

Свойства хромсодержащих изделий, изготовляемых из плавленных порошков, представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Изделия периклазохромитовые из плавленных порошков

Наименование показателей		ПХПП	ПХПУ	ПХПС
Массовая доля, %	MgO, не менее	70	70	70
	Cr ₂ O ₃ , в пределах	8–16	8–18	8–18
	CaO, не более	2,5	2,5	2,5
	SiO ₂ , не более	2,0	2,5	2,5
Пористость открытая, %, не более		16	18	21
Предел прочности при сжатии, Н/мм ² , не менее		30	20	20
Температура начала размягчения, °С, не ниже		1640	1620	1600
Термическая стойкость, теплосмен, не менее		5	3	2

Выбираем изделия марки ПХПП — периклазохромитовые из плав-
 ленных порошков периклаза и периклазохромита.

Основным оксидом данных изделий является оксид магния — не ме-
 нее 70 мас. %.

Таким образом, взаимодействие шлака с выбранным огнеупором
 будет описываться диаграммой состояния $\text{MgO}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$. Учиты-
 вая высокое содержание в рассматриваемой системе оксидов алю-
 миния, железа и хрома, необходимо также рассмотреть системы
 $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}$, $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$
 (рис. 3.3).

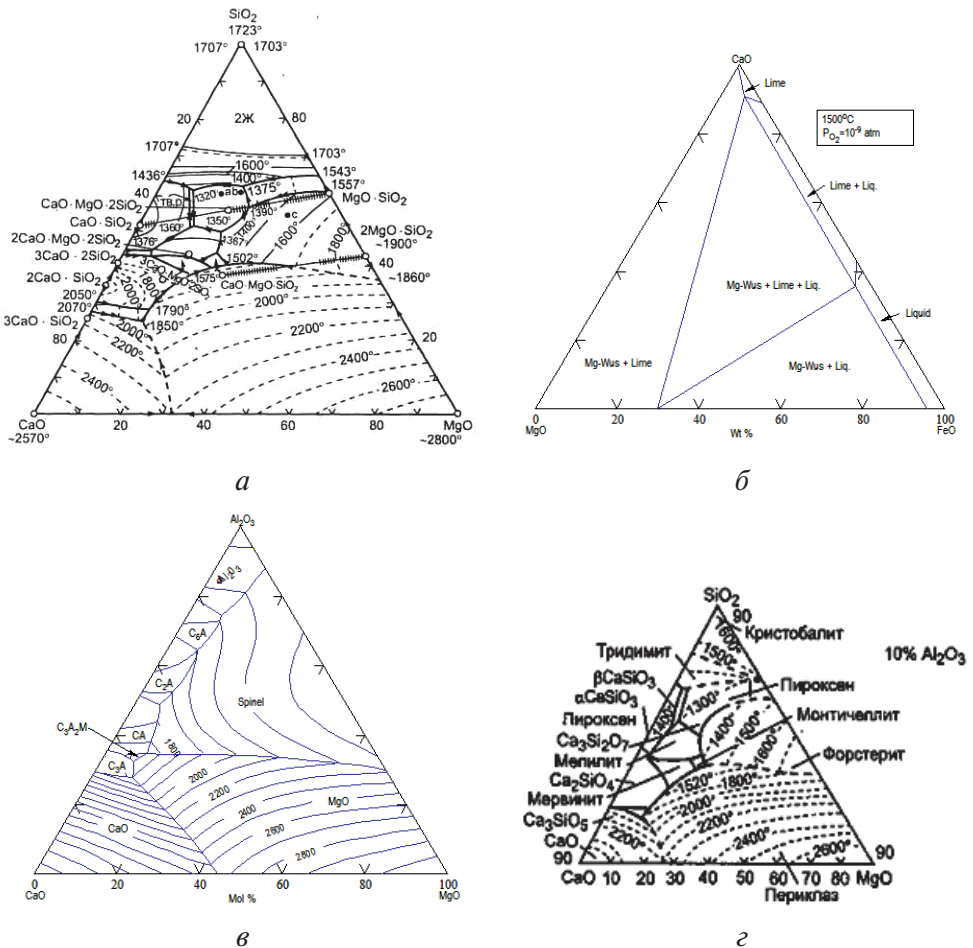


Рис. 3.3. Диаграммы состояния,
 описывающие рассматриваемую систему

Проанализируем процесс взаимодействия шлака и выбранного огнеупора.

Приведем химический состав зоны взаимодействия расплава шлака и огнеупора к единому химическому составу:

Исходные компоненты	Содержание, мас. %							Всего
	SiO ₂	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	FeO	Al ₂ O ₃	MnO	
Шлак	20	39	6	–	19	8	8	100
ПХПП	5	1	70	13	4	7	–	100

Приведем содержание оксидов в смеси шлак/огнеупор = 1/1 к 100 %:

$$\text{SiO}_2 = 20 \times 0,5 + 5 \times 0,5 = 12,5\%;$$

$$\text{CaO} = 39 \times 0,5 + 1 \times 0,5 = 20\%;$$

$$\text{MgO} = 6 \times 0,5 + 70 \times 0,5 = 38\%;$$

$$\text{Cr}_2\text{O}_3 = 0 \times 0,5 + 13 \times 0,5 = 6,5\%;$$

$$\text{FeO} = 19 \times 0,5 + 4 \times 0,5 = 11,5\%;$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 = 8 \times 0,5 + 7 \times 0,5 = 7,5\%.$$

$$\text{MnO} = 8 \times 0,5 + 0 \times 0,5 = 4\%;$$

Соотношение шлак/огнеупор	Содержание, мас. %							Всего
	SiO ₂	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	FeO	Al ₂ O ₃	MnO	
1/1	12,5	20	38	6,5	11,5	7,5	4	100

Приводим систему к тройной диаграмме состояния MgO–SiO₂–FeO:

$$\text{CaO и MnO к MgO: } 20 \times 0,71 + 4 \times 0,56 + 38 = 54,5;$$

$$\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ к FeO: } 7,5 \times 0,71 + 11,5 = 16,8;$$

$$\text{Cr}_2\text{O}_3 \text{ к SiO}_2: 6,5 \times 0,39 + 12,5 = 15,0;$$

Итого: 86,3 мас. %

Приведем к 100 %:

$$\text{SiO}_2 = \frac{15,0 \times 100}{86,3} = 17,4;$$

$$\text{MgO} = \frac{54,5 \times 100}{86,3} = 63,1;$$

$$\text{FeO} = \frac{16,8 \times 100}{86,3} = 19,5.$$

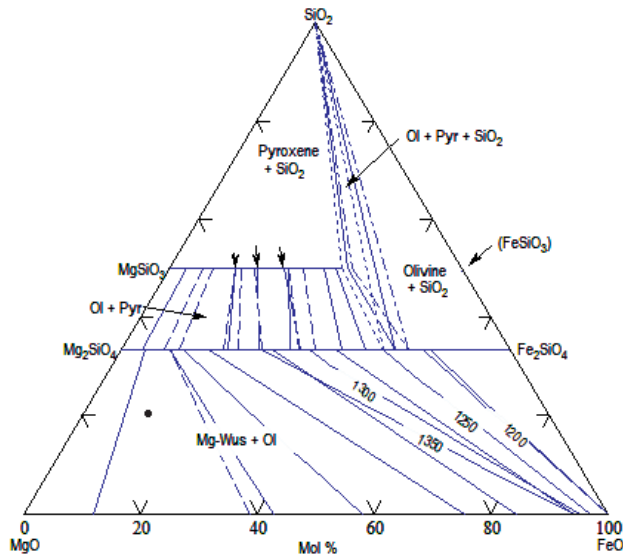


Рис. 3.4. Точка состава исследуемой системы на диаграмме состояния $\text{SiO}_2\text{—MgO—FeO}$

Точка нашего оценочного состава попадает в поле первичной кристаллизации твердого раствора магнезиовюститового состава. Поле первичной кристаллизации твердого раствора соседствует с полями оливина и форстерита, соответственно, в равновесии с шпинелидом в исследуемой системе могут находиться вышеуказанные фазы. Температура появления расплава — между 2300 и 1800 °С, но примеси существенно снижают ее.

На диаграмме состояния $\text{MgO—CaO—Fe}_2\text{O}_3$ (рис. 3.3, б) исследуемый состав попадает в область сосуществования магнезиоферрита и магнезиовюstitа.

На диаграмме состояния $\text{MgO—CaO—SiO}_2\text{—}10\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ (рис. 3.3, в) исследуемый состав попадает в область первичной кристаллизации периклаза, которая соседствует с областями первичной кристаллизации форстерита, мервинита, монтичеллита и извести.

Увеличение количества шлака в системе будет приводить к понижению температуры плавления к области «фаялит — оливин» с температурами плавления 1205–1470 °С и снижением вязкости расплава. Повышение температуры плавления и вязкости в системе может происходить при увеличении содержания MgO (CaO).

Основным механизмом износа периклазохромитовых огнеупоров в указанных условиях будет химическое взаимодействие (смачива-

ние и пропитка с последующим насыщением рабочей зоны продуктами взаимодействия огнеупора с шлаком) и растворение образовавшихся легкоплавких продуктов в шлаке. Процесс будет ускоряться при переменной окислительно-восстановительной среде в тепловом агрегате, при перемешивании расплава в агрегате (эрозия огнеупора) и при использовании разжижителей шлаков, особенно фтористых.

Увеличение содержания MgO во всех рассматриваемых системах приводит к увеличению температуры плавления и, соответственно, вязкости расплава, следовательно, для повышения стойкости футеровки можно рекомендовать после каждой плавки подваривать рабочую поверхность футеровки материалами на основе MgO или MgO/CaO.

Следует оценить возможность повышения температуры плавления шлака/расплава путем введения добавок-модификаторов.

Для того, чтобы проанализировать термомеханические свойства выбранного огнеупора для рабочего слоя футеровки, с целью расчета тепловых свойств футеровки (теплоемкости, теплопроводности) необходимо провести анализ:

- по огнеупорности и температуре начала деформации;
- по механическим свойствам (предел прочности изделий при сжатии, изгибе, растяжении);
- по термостойкости.

Оценить допустимую скорость нагрева/охлаждения огнеупора.

Сравнить скорость нагрева футеровки с допустимой для выбранного материала. Сделать вывод о правильности выбора материала.

Анализ термомеханических свойств выбранных огнеупоров

Проанализировать термомеханические свойства выбранного огнеупора для рабочего слоя футеровки:

- 1) по огнеупорности и температуре начала деформации;
- 2) механическим свойствам (предел прочности изделий при сжатии, изгибе, растяжении);
- 3) термостойкости (оценить разрушающий градиент температур $\Delta T_{\text{доп}}$ для выбранного огнеупора):
 - для огнеупорных изделий первой (керамическая) и второй (типа динаса) структурных групп

$$\Delta T_{\text{доп}} = \frac{\sigma_{\text{пр}} \times (1 - \mu)}{\alpha \times E}; \quad (3.13)$$

- для огнеупоров третей (типа шамота) и четвертой (типа периклаза) структурных групп

$$\Delta T_{\text{доп}} = \frac{E}{\sigma_{\text{пр}}^2 \times (1 - \mu)}, \quad (3.14)$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ — предел прочности огнеупора (при нагревании — предел прочности при растяжении, при охлаждении — предел прочности при сжатии), Мпа; E — модуль Юнга огнеупора, Мпа; μ — коэффициент Пуассона (для огнеупоров можно принять равным 0,25–0,3); α — термический коэффициент линейного расширения огнеупора, K^{-1} .

Оценить допустимую скорость нагрева/охлаждения огнеупора:

$$V_{\text{доп}} = \Delta T_{\text{доп}} \times \frac{a}{(S_{\text{пр}} \times \delta^2)}, \text{ [град/с]}, \quad (3.15)$$

где a — коэффициент температуропроводности (для большинства огнеупорных изделий можно взять 0,5–0,9 m^2/c); $S_{\text{пр}}$ — приведенная площадь изделия (отношение нагреваемой площади к объему изделия), m^{-1} ; δ — приведенный коэффициент теплопередачи, для большинства огнеупоров можно принять в интервале 1,65–1,85.

Сравнить скорость нагрева футеровки с допустимой для выбранного материала. Сделать вывод о правильности выбора материала.

Исходя из выбранной марки огнеупора для рабочего слоя футеровки и справочных (литературных) данных по его теплопроводности выбрать огнеупорные материалы для арматурного и теплоизоляционных слоев футеровки по температуре эксплуатации (температуре начала деформации под нагрузкой), прочности и теплопроводности.

Способность огнеупоров противостоять, не разрушаясь, резким перепадам температуры при нагревании или охлаждении называют термостойкостью. По ориентировочной оценке 40% огнеупоров разрушается вследствие недостаточной их термостойкости при температурах, значительно более низких, чем огнеупорность (плавление). В основе явлений, вызывающих термическое разрушение, лежат процессы, связанные с возникновением в материале напряжений. Термические напряжения бывают двух видов: напряжения I рода, вызываемые градиентом температур, и напряжения II, вызываемые анизотропией термического коэффициента линейного расширения, химическими реакциями, расширением при полиморфизме. Эти напряжения возникают при постоянной температуре, их называют также химическими. В обо-

их случаях напряжения возникают тогда, когда материал не имеет возможности свободно изменять свой объем по тем или иным причинам.

При нагревании тела с поверхности внешние (поверхностные) слои его нагреваются и расширяются быстрее, чем внутренние. Напряжения, возникающие из-за препятствия изменению размеров, являются сжимающими, поскольку тело стремится расшириться. При охлаждении возникают растягивающие напряжения. Величина напряжений прямо пропорциональна термическому коэффициенту линейного расширения, модулю упругости, перепаду температур ($T_{\text{ср}} - T_{\text{пов}}$) и обратно пропорциональна $(1 - \mu)$ по формуле

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{[E\alpha(T_0 - T_1)]}{(1 - \mu)}, \quad (3.16)$$

при этом значения напряжений могут превосходить соответствующую прочность материала.

Эпюры напряжений в пластинке при нагревании и охлаждении изображены на рис. 3.5.

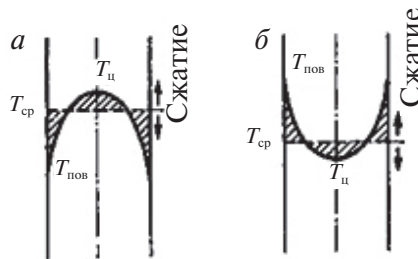


Рис. 3.5. Распределение напряжений и температур при охлаждении с поверхности (а) и нагревании с поверхности (б)

При изменении температуры с постоянной скоростью распределение ее внутри тела будет параболическим. Для огнеупоров предел прочности при сжатии больше, чем при растяжении, поэтому при нагревании огнеупорных изделий деформация в виде трещин возможна в центре, а при охлаждении — на поверхности.

В формуле (3.16) для напряжений на поверхности и в центре перепад температур будет соответственно равен $(T_{\text{ср}} - T_{\text{пов}})$ и $(T_{\text{ср}} - T_{\text{ц}})$. Определить температуру непосредственно на поверхности и в центре сложно.

Значения температур в центре и на поверхности зависят от теплопередачи от поверхности к окружающей среде δ , теплопроводности ма-

териала λ и расстояния между поверхностью и центром r_m , т. е. от половины толщины тела. Эта зависимость выражается безразмерным критерием Био:

$$\beta = \frac{r_m K}{\lambda}. \quad (3.17)$$

Таким образом, напряжения I рода зависят от свойств материала (a , α , E , μ , λ), формы изделий, размеров (r_m), условий теплопередачи (β), скорости изменения температур и др.

Теория термостойкости хрупких тел при развитии в них максимальных напряжений

Если структура тела имеет плотный кристаллический каркас без жидкой фазы (керамическая структура) или характеризуется прямой связью «кристалл — кристалл» (структура типа динаса), в которой жидкая фаза не смачивает кристаллическую и располагается в порах структуры, не мешая прямой связи кристаллов (рис. 3.6), то тело будет иметь хрупкий характер разрушения. Т. е. возникшая в нем трещина будет распространяться через все тело по кристаллической фазе до его физической границы. В этом случае термостойкость структуры будет описывать теория максимальных напряжений.

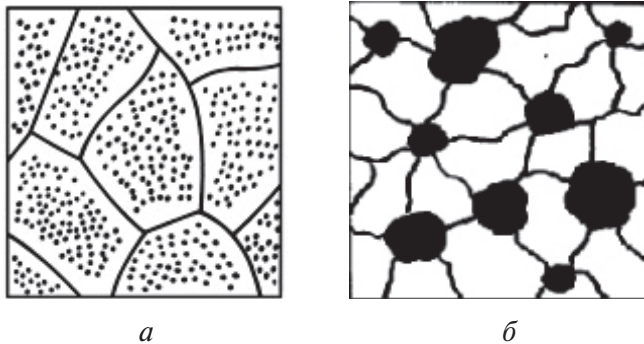


Рис. 3.6. Структура керамическая (а) и типа динаса (б)

По теории максимальных напряжений тело разрушается, когда его прочность меньше образующихся в нем максимальных термических напряжений.

По первому способу термостойкость выражается в критериальной форме отношением прочности к возникшему в теле под действием градиента температур напряжению:

$$R = \frac{\sigma_{\text{прч}}(1-\mu)}{E\alpha}, \quad (3.18)$$

где R — критерий термостойкости (численно равен градиенту температур), при котором в теле могут возникнуть напряжения, превышающие прочность материала при соответствующем виде нагрузки; чем больше его значение, тем выше термостойкость; $\sigma_{\text{прч}}$ — прочность материала, кПа (это может быть предел прочности при изгибе, растяжении или при сжатии); E — модуль упругости, кПа; α — термический коэффициент линейного расширения, K^{-1} ; μ — коэффициент Пуассона; значение μ берется с целью исключения влияния поперечных напряжений.

Поскольку абсолютное значение R зависит от выбора величины $\sigma_{\text{прч}}$, сравнение термостойкости различных материалов правомерно при одинаковом характере прочности. Все величины в формуле (3.18) берутся при комнатной температуре; при этом изменение значений μ и α от температуры, ввиду его незначительности, не учитывается, а изменение значений $\sigma_{20}/E_{20} \approx \sigma_{1300}/E_{1300}$.

Распространение температуры в теле зависит от теплопроводности и температуропроводности, критерии термостойкости с учетом λ и a имеют вид

$$R^I = R\lambda; \quad (3.19)$$

$$R^{II} = Ra. \quad (3.20)$$

R , R^I и R^{II} принято называть соответственно критерием термостойкости, I критерием термостойкости и II критерием термостойкости.

Применение того или иного критерия определяется значением критерия Био: R применяют при критерии Био > 20 , т. е. при высоких скоростях теплопередачи от поверхности в окружающую среду; R^I — при критерии Био < 2 , т. е. при низких скоростях теплоотдачи; R^{II} — при постоянной скорости изменения температуры. Применением трех критериев термостойкости в некоторой степени учитываются условия теплопередачи.

Второй способ выражения критерия термостойкости заключается в следующем. Для пластины термическое напряжение выражается уравнением

$$\sigma_y = \sigma_z = \frac{[E\alpha(T_{\text{сп}} - T)]}{(1-\mu)}, \quad (3.21)$$

где $\sigma_y = \sigma_z$ — прочность материала по оси y или z , откуда

$$(T_0 - T_1) = \Delta T_p = \frac{\sigma_{\max}(1 - \mu)}{[E\alpha]}, \quad (3.22)$$

т. е. критерий термостойкости R также равен перепаду температур, при котором в теле возникают напряжения, превосходящие предел прочности материала при данном виде нагрузки (сжатие, растяжение), $R = \Delta T_p$. Для другого тела, по форме отличающегося от пластины:

$$(T_0 - T_1) = \Delta T_p = \frac{\sigma_{\text{прч}}(1 - \mu)}{[E\alpha]} S', \quad (3.23)$$

где S' — приведенная площадь изделия (отношение нагреваемой площади к объему изделия), $\sigma_{\text{прч}}$ — предел прочности при соответствующем виде нагрузки; в случае вертикальной стены и нагрева принимается предел прочности при сжатии, в случае криволинейной кладки и нагревания принимается предел прочности при изгибе, в случае охлаждения — предел прочности при растяжении.

Термостойкость с учетом критерия Био β , по Кингери:

$$\Delta T_p = \frac{\sigma_{\text{прч}}(1 - \mu)}{[E\alpha]} S' \frac{1}{0,31\beta}. \quad (3.24)$$

Из последней формулы следует, что нельзя составить таблицу термостойкости материалов в порядке ее повышения, так как термостойкость не определяется однозначно свойствами материала, а зависит также от формы, размеров и условий теплопередачи. Иначе говоря, термостойкость не является физическим свойством материала.

Теория двух стадий

Если структура тела содержит большое количество жидкой (аморфной) фазы, которая хорошо смачивает и химически взаимодействует с кристаллической фазой (структура типа шамота); содержит относительно небольшое количество аморфной фазы, которая хорошо смачивает, но химически не взаимодействует с кристаллической фазой (структура типа периклаза) или имеет достаточно высокую пористость (рис. 3.7), то материал будет иметь относительно пластичный характер разрушения. То есть возникшая в кристаллической фазе трещина будет распространяться через кристаллическую фазу, но останавливаться в аморфной фазе или в порах. В этом случае термостойкость структуры будет описывать теория двух стадий. По этой теории раз-

рушение материалов под влиянием термических напряжений происходит в две стадии: зарождения трещин и их роста. Критерии термостойкости R , R^I и R^{II} относятся к стадии зарождения трещин.

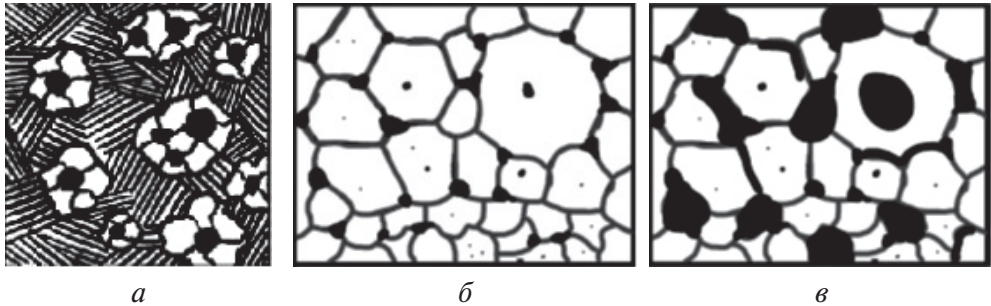


Рис. 3.7. Структура типа шамота (*a*), типа периклаза (*б*) и пористая (*в*)

Теория двух стадий не опровергает теорию максимальных напряжений, а развивает ее. Трещина, зародившаяся в гетерогенных материалах, какими являются большинство огнеупоров, развивается медленно, а может и вообще не развиваться. По теории Гриффитса, трещины будут расти в том случае, если упругая энергия, освободившаяся из напряженной области, будет больше энергии, необходимой для создания двух новых поверхностей раздела. По Хассельману, критерии распространения трещин выражаются следующими формулами:

$$R^{III} = \frac{E}{\sigma_{\text{прч}}^2 (1 - \mu)} \quad (3.25)$$

и

$$R^{IV} = R^{III} v_{\text{эф}}, \quad (3.26)$$

где $v_{\text{эф}}$ — эффективная энергия, необходимая для создания двух новых поверхностей раздела.

Чтобы трещины не развивались, материал должен обладать высоким значением модуля упругости и низкой прочностью, а чтобы трещины не зарождались, модуль упругости должен быть низким, прочность высокой.

Кажущееся противоречие в самом деле противоречием не является. В гетерогенном материале трещины зарождаются в твердых фазах, и, чтобы трещины в них не зарождались, эти фазы должны иметь высокую прочность, а распространяются трещины во всем объеме мно-

гофазного материала: по кристаллической, аморфной фазам и порам. Напряжения гасятся в порах и при высокой температуре — в пластичной аморфной фазе. Для того чтобы трещины не развивались, материал должен иметь поры, а следовательно, в целом быть менее прочным. В гомогенном материале (стекле) зародившаяся трещина растет без ограничения (катастрофическое разрушение), в гетерогенном же зародившиеся трещины обычно не приводят к немедленному разрушению.

Таким образом, анализ выбранного типа огнеупорных изделий по термостойкости заключается в определении его структурного типа, выбора уравнения и определения критерия термостойкости ΔT_p .

Далее следует оценить допустимые скорости нагрева (охлаждения) выбранного огнеупора в условиях элементов конструкции футеровки теплового агрегата (вертикальная стена, кольцевая кладка, арочный свод и т. п.) по уравнению

$$V_{\text{доп}} = \Delta T_{\text{доп}} \cdot \frac{a}{(S_{\text{пр}} \cdot \delta^2)}, \quad (3.27)$$

где a — коэффициент температуропроводности (для большинства огнеупорных изделий можно взять $0,5-0,9 \text{ м}^2/\text{с}$), $S_{\text{пр}}$ — приведенная площадь изделия (отношение нагреваемой площади к объему изделия), м^{-1} , δ — приведенный коэффициент теплопередачи, для большинства огнеупоров можно принять в интервале $1,65-1,85$.

Следует сравнить полученную допустимую скорость нагрева материала с требуемыми режимами работы теплового агрегата (по литературным данным). Сделать вывод о правильности выбора огнеупорного материала для рабочего слоя футеровки.

3.2. Проектирование многослойной футеровки

Исходя из выбранной марки (химического состава) огнеупора для рабочего слоя футеровки и справочных (литературных) данных по его теплопроводности, следует выбрать огнеупорные материалы для арматурного и теплоизоляционных слоев футеровки. Затем — оценить эффективную теплопроводность проектируемой футеровки, выбрать и оценить слой теплоизоляционных материалов, исходя из темпера-

туры за арматурным слоем футеровки и химического характера огнеупоров арматурного слоя. Правильность выбора материалов для арматурного и теплоизоляционных слоев футеровки проверяется расчетом распределения температур по слоям при полном износе рабочего слоя.

3.2.1. Выбор огнеупорных и теплоизоляционных материалов для арматурного и теплоизоляционных слоев огнеупорной футеровки

При высоких температурах между огнеупорами различного химического состава могут возникнуть нежелательные реакции. Нельзя, например, изделия алюмосиликатного состава класть рядом с магнезитовыми при предполагаемых температурах эксплуатации более 1400 °С. В табл. 3.5 приведены результаты лабораторных исследований реакционных температур, возникающих между различными огнеупорами. При необходимости между изделиями разного химического состава кладут прокладку нейтрального огнеупора, чаще периклазохромитового, муллитового или шпинельного.

Таблица 3.5

Температура реакционного взаимодействия различных огнеупоров, °С*

Огнеупоры	Динасовые	Шамотные	Высокоглиноземистые, 70 % Al ₂ O ₃	Хромитовые	Форстеритовые	Хромопериклазовые	Периклазохромитовые	Периклазовые
Динасовые	–	$\frac{1500}{1600}$	$\frac{1600}{-}$	$\frac{1650}{-}$	$\frac{1700}{-}$	$\frac{1600}{-}$	$\frac{1600}{-}$	$\frac{1500}{-}$
Шамотные	$\frac{1500}{1600}$	–	–	$\frac{1600}{-}$	$\frac{1500}{1600}$	$\frac{1600}{-}$	$\frac{1600}{1650}$	$\frac{1400}{1500}$
Высокоглиноземистые, 70 % Al ₂ O ₃	$\frac{1600}{-}$	–	–	$\frac{1600}{1600}$	$\frac{1650}{1700}$	$\frac{1600}{1700}$	$\frac{1600}{1700}$	$\frac{1500}{1700}$
Хромитовые	$\frac{1650}{-}$	$\frac{1600}{-}$	$\frac{1600}{1600}$	–	$\frac{1600}{1650}$	$\frac{1700}{-}$	$\frac{1700}{-}$	$\frac{1700}{-}$

Окончание табл. 3.5

Огнеупоры	Динасовые	Шамотные	Высокоглиноземистые, 70% Al ₂ O ₃	Хромитовые	Форстеритовые	Хромпериклазовые	Периклазохромитовые	Периклазовые
Форстеритовые	$\frac{1700}{-}$	$\frac{1500}{1600}$	$\frac{1650}{1700}$	$\frac{1600}{1650}$	—	$\frac{1700}{-}$	$\frac{1700}{-}$	$\frac{1700}{1700}$
Хромпериклазовые	$\frac{1600}{-}$	$\frac{1600}{-}$	$\frac{1600}{1700}$	$\frac{1700}{-}$	—	—	—	—
Периклазохромитовые	$\frac{1600}{1700}$	$\frac{1600}{1650}$	$\frac{1600}{1700}$	$\frac{1700}{-}$	$\frac{1700}{-}$	—	—	—
Периклазовые	$\frac{1500}{1600}$	$\frac{1400}{1500}$	$\frac{1500}{1700}$	$\frac{1700}{-}$	$\frac{1700}{1700}$	—	—	—

* По данным фирм США: числитель — температура начала реакции; знаменатель — температура начала разрушения, вызванного реакцией.

Таким образом, выбор материала для арматурного слоя футеровки должен обуславливаться несколькими критериями:

- оценкой максимально возможной температуры на границе «рабочий слой — арматурный слой»;
- химической инертностью материалов по отношению друг к другу;
- химической стойкостью по отношению к основному корродирующему фактору в тепловом агрегате;
- конструкционной механической прочностью;
- термической стабильностью и низким т. к. л. р.

Материалы для теплоизоляционных слоев должны иметь температуру долговременной эксплуатации не менее оценочной максимальной температуры на границе соответствующего слоя футеровки, обладать высокой стабильностью свойств во времени при предполагаемых температурах эксплуатации и по возможности большей механической

прочностью и малой теплопроводностью. Для повышения эффективности теплоизоляции (как тепловой, так и экономической) ее рекомендуется выполнять в несколько слоев, понижая плотность и теплопроводность выбранных материалов от арматурного слоя футеровки к «холодной» стороне футеровки.

3.2.2. Оценка эффективной теплопроводности многослойной футеровки

3.2.2.1. Основные понятия и определения

Явления теплообмена имеют большое значение в теории и практике проектирования и эксплуатации тепловых агрегатов всех отраслей промышленности. От процессов теплообмена зависят расходы энергоносителей, скорости обработки материалов, основные размеры и параметры тепловых агрегатов и отдельных узлов, а также выбор материалов для их строительства.

Теплообмен — это самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты в пространстве, обусловленный неоднородным полем температуры. Направленность теплообмена определяется вторым законом термодинамики. Когда физические тела одной системы находятся при разной температуре, то происходит передача тепловой энергии от более нагретого тела к менее нагретому до наступления термодинамического равновесия.

Распределение температур по объему (площади) тела характеризуется температурным полем. Температурное поле — совокупность мгновенных значений температуры во всех точках рассматриваемой системы или физического тела. Поскольку температура является скалярной величиной, то и температурное поле — скалярное поле.

Температура, осредненная по поверхности, объему, массе тела, характеризует температуру в данной точке тела. Если соединить точки температурного поля с одинаковой температурой, то получится изотермическая поверхность. При пересечении изотермической поверхности плоскостью получим на этой плоскости семейство изотерм — линий постоянной температуры.

Если температурное поле не зависит от времени, то теплообмен называется стационарным, в противном случае — нестационарным. Стационарно-периодический теплообмен характеризуется периодическим изменением температурного поля.

Перепад температур Δt — разность температур между двумя точками одного тела, двумя изотермическими поверхностями и т. п. Пере-

пад температуры вдоль изотермы равен нулю. Наибольший перепад температуры наблюдается по направлению нормали к изотермической поверхности. Возрастание температуры вдоль нормали характеризуется градиентом температуры.

Средний градиент температуры $\Delta t/\Delta h$ (°С/м) — отношение перепада температур Δt между двумя изотермическими поверхностями к расстоянию между ними Δh , измеренному по нормали h к этим поверхностям.

3.2.2.2 Виды теплообмена

В зависимости от характера теплового движения различают перенос теплоты теплопроводностью (кондукцией), конвекцией и тепловым излучением.

Теплопроводность — это перенос тепла структурными частицами вещества (молекулами, атомами, электронами) в процессе их движения. Такой теплообмен может происходить в любых телах с неоднородным распределением температуры. Механизм переноса тепла будет определяться агрегатным состоянием вещества. Физическая сущность теплопроводности заключается в том, что кинетическая энергия атомов и молекул, которая определяет температуру тела, передается другому телу при их контакте или от более нагретой части тела к менее нагретой части.

Кондуктивный теплообмен состоит из трех основных частей:

- стационарной теплопроводности, в которой температура зависит от одной пространственной координаты;
- стационарной теплопроводности, в которой температура зависит от двух или трех пространственных координат;
- нестационарной теплопроводности.

При разработке теплотехнических агрегатов в основном используются методы расчета стационарной одномерной теплопроводности.

Основами теории теплопроводности являются закон Фурье и уравнение теплопередачи. В установившемся режиме плотность потока энергии, передающейся посредством теплопроводности, пропорциональна градиенту температуры:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}, \quad (3.28)$$

где q — плотность теплового потока, характеризующая количество энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной оси x , Вт/м²; λ — коэффициент пропорцио-

нальности, называемый коэффициентом теплопроводности среды, Вт/(м·К).

Знак «минус» в правой части уравнения (3.28) указывает на то, что тепловой поток направлен противоположно градиенту температуры. Уравнение (3.28) является выражением основного закона теплопроводности Фурье:

$$q = -\lambda \text{grad} t, \quad (3.29)$$

где q — вектор плотности теплового потока.

Закон Фурье неявно предполагает, что скорость распространения теплоты является бесконечно большой. Для стационарных процессов и умеренной интенсивности возможность такого допущения подтверждается соответствием расчетных и опытных данных.

В прикладных задачах печной теплотехники процесс теплообмена теплопроводностью рассматривается преимущественно в твердых телах, частицы которых сближены друг с другом. В капельных жидкостях и газах, в силу незначительности их коэффициента теплопроводности, данный вид теплообмена не играет существенной роли.

Конвекция — это процесс переноса теплоты потоками неравномерно нагретых объемов жидкости или газов. В общем случае теплообмен между движущимся потоком теплопередающего или тепловоспринимающего вещества и поверхностью твердого тела наряду с конвекцией всегда сопровождается явлениями теплопроводности. При ламинарном режиме перенос теплоты определяется только молекулярным переносом вещества, который зависит от коэффициента теплопроводности жидкости или газа. При турбулентном режиме перенос теплоты обусловлен поперечным перемешиванием микро- и макрообъемов вещества. Чем выше скорость потока, тем меньше влияние молекулярного переноса теплоты на процесс теплообмена.

Конвективный теплообмен между движущимся потоком газа и твердой поверхностью называется теплоотдачей. Например, в металлургических печах примерами конвективной теплоотдачи являются нагрев поверхности металла (шлака) и кладки рабочего пространства движущимися продуктами сгорания топлива, естественное и принудительное охлаждение наружной поверхности боковых стен теплового агрегата и др.

Различают естественную (свободную) и вынужденную конвекцию. Естественная конвекция возникает при неравномерном нагреве веществ, находящихся в поле силы тяжести (или в системе, движущейся с ускорением). Под действием силы Архимеда более нагретое вещество

(с меньшей плотностью) перемещается относительно менее нагретого вещества. Направление действия силы Архимеда противоположно направлению силы тяжести. При стационарном режиме нагрева в веществе возникают конвекционные потоки, переносящие тепло от более нагретых слоев вещества к менее нагретым слоям. С уменьшением разности температур между слоями интенсивность конвективного теплообмена снижается.

При вынужденной конвекции перемещение вещества происходит под воздействием внешних сил, обусловленных применением насосов, мешалок, барботирования, электромагнитного перемешивания и т. п.

Следует отметить, что температурные поля при свободной и вынужденной конвекции аналогичны по форме. В обоих случаях механизмом переноса теплоты на поверхности теплообмена является теплопроводность.

Согласно закону Ньютона — Рихмана для теплоотдачи, плотность теплового потока от движущейся среды к твердой стенке пропорциональна разности температур среды и стенки:

$$q = \alpha(t_c - t_{ст}) = \alpha\Delta t, \quad (3.30)$$

где α — коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К); $t_c, t_{ст}$ — температура среды и стенки соответственно, °С.

Из уравнения (3.30) видно, что коэффициент конвективной теплоотдачи есть плотность теплового потока, отнесенная к единичному перепаду температур. В отличие от коэффициента теплопроводности, являющегося физической характеристикой вещества, коэффициент конвективной теплоотдачи — гидродинамическая характеристика системы. В то время как разность температур является величиной термодинамической. В уравнение (3.30) подставляется только положительное значение Δt .

Проблема конвективного теплообмена в основном состоит в корректном определении коэффициента теплоотдачи. Диапазон изменения коэффициента теплоотдачи:

Режим движения	α , Вт/(м ² ·К)
Свободная конвекция газов	5–50
Вынужденная конвекция газов	30–5·10 ²
Свободная конвекция воды	10 ² –10 ³
Вынужденная конвекция воды	5·10 ² –2·10 ⁴
Кипение воды	2·10 ³ –4·10 ⁴

В практических расчетах коэффициент теплоотдачи находится с использованием обобщенных уравнений, составленных с использованием коэффициентов, определенных опытным путем для конкретных задач теплообмена.

Тепловое излучение — это электромагнитное излучение нагретых тел. Оно обладает как волновыми, так и корпускулярными свойствами, которые дополняют друг друга, но никогда не проявляются одновременно. Лучистая энергия испускается и поглощается телами не непрерывно, а отдельными дискретными порциями — квантами энергии. Поэтому процессы излучения и поглощения лучистой энергии описываются законами квантовой механики, а процессы распространения этого вида энергии — законами распространения электромагнитных колебаний.

В отличие от теплопроводности и конвекции лучистый теплообмен всегда сопровождается переходом энергии из одной формы и другую. При излучении теплота тела превращается в энергию электромагнитных колебаний, которая распространяется в пространстве со скоростью света. При поглощении энергия электромагнитных колебаний частично или полностью вновь трансформируется в теплоту.

Тепловое излучение происходит в ультрафиолетовой (0,02–0,4 мкм), видимой (0,4–0,8 мкм) и инфракрасной (0,8–1000 мкм) областях спектра. Спектр инфракрасного излучения подразделяется на ближнюю (0,8–1,5 мкм), среднюю (1,5–10 мкм) и дальнюю (10–1000 мкм) области. В высокотемпературных печах основная доля теплового излучения приходится на ближнюю и среднюю области инфракрасного спектра.

Различают монохроматическое и интегральное (полное) излучение. Монохроматическое излучение лежит в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$. Все величины, отнесенные к этому виду излучения, обозначаются индексом λ . Интегральное излучение характеризует суммарное излучение в интервале длин волн от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$.

В лучистом теплообмене используются понятия лучистого потока Q , Вт, энергии E , Вт/м² и интенсивности монохроматического излучения I_λ , Вт/(м²·м), которые могут относиться как к полусферическому излучению, так и к излучению в заданном направлении.

Полусферическим лучистым потоком называется полное количество энергии, излучаемое элементом поверхности dS в полупространство в единицу времени:

$$dQ = EdS, \quad (3.31)$$

где dQ — мощность излучателя.

Энергией полусферического излучения называется количество энергии, излучаемой телом с единицы поверхности в единицу времени. Величина $E = Q/S$ — удельная мощность излучателя, Вт/м².

Интенсивность полусферического излучения — энергия монохроматического полусферического излучения, отнесенная к рассматриваемому интервалу длин волн:

$$I_{\lambda} = \frac{dE}{d\lambda}, \quad (3.32)$$

В общем случае падающий на поверхность тела тепловой поток распадается на составляющие:

$$Q_{\text{пад}} = Q_{\text{погл}} + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{проп}}, \quad (3.33)$$

где $Q_{\text{пад}}$, $Q_{\text{погл}}$, $Q_{\text{отр}}$ и $Q_{\text{проп}}$ — падающий, поглощенный, отраженный и пропущенный тепловой поток соответственно, Вт.

Способность тела поглощать, отражать и пропускать падающий тепловой поток определяется следующими коэффициентами:

- коэффициентом поглощения $a = Q_{\text{погл}}/Q_{\text{пад}}$; (3.34)

- коэффициентом отражения $r = Q_{\text{отр}}/Q_{\text{пад}}$; (3.34 а)

- коэффициентом пропускания $d = Q_{\text{проп}}/Q_{\text{пад}}$. (3.34 б)

При этом $a + r + d = 1$. Для непрозрачных тел $d = 0$ и $a + r = 1$, для абсолютно черного тела $a = 1$ и $r = d = 0$, для абсолютно белого тела $r = 1$ и $a = d = 0$.

Сложный теплообмен — это совокупность элементарных способов переноса тепла. В тепловых агрегатах наиболее распространенными видами сложного теплообмена являются:

- конвективный теплообмен — теплообмен при совместном протекании молекулярного и конвективного переноса теплоты (теплопроводность и конвекция);
- теплоотдача — конвективный теплообмен между движущейся средой и поверхностью ее раздела с другой средой (твердым телом, жидкостью или газом);
- теплопередача — процесс теплообмена между двумя теплоносителями через разделяющую стенку;
- радиационно-кондуктивный теплообмен — теплообмен, обусловленный совместным переносом теплоты излучением и теплопроводностью;
- радиационно-конвективный теплообмен — теплообмен, обусловленный совместным переносом теплоты излучением, конвекцией и теплопроводностью.

3.2.2.3. Краевые условия теплопроводности

Дифференциальное уравнение теплопроводности (3.29) выведено на основе общих законов физики и описывает процесс теплопроводности в самом общем виде. Любое дифференциальное уравнение описывает целый класс явлений. Для того чтобы выделить конкретный рассматриваемый процесс и дать его полное математическое описание, к дифференциальным уравнениям надо присоединить математическое описание всех частных особенностей рассматриваемого процесса. Эти частные особенности, которые совместно с дифференциальным уравнением дают полное математическое описание конкретного процесса теплопроводности, называются условиями однозначности или краевыми условиями и включают:

1) геометрические условия, характеризующие форму и размеры тела, в котором протекает процесс;

2) физические условия, характеризующие физические свойства тела (теплопроводность, теплоемкость, плотность, мощность внутренних источников тепла и т. д.);

3) временные или начальные условия, характеризующие распределение температуры в изучаемом теле в начальный момент времени: при $\tau = 0$ $t = f(x, y, z)$;

4) граничные условия, характеризующие взаимодействие рассматриваемого тела с окружающей средой.

Начальные условия учитываются только при решении задач нестационарной теплопроводности. Они задаются распределением температуры в момент времени, условно принятый за нулевой:

$$t = f(x, y, z, 0).$$

В частном случае начальное распределение температуры может быть равномерным:

$$t = f(x, y, z) = t_0 = \text{const},$$

где t_0 — начальная температура тела; x, y, z — пространственные координаты.

Для тел произвольной формы начальные условия оказывают влияние лишь на первой стадии нестационарного процесса; начиная с некоторого момента, наступает регулярный режим, при котором распределение температуры в теле определяется только граничными условиями и не зависит от начальных.

Граничные условия — это условия теплообмена на поверхности тела, которые могут быть заданы несколькими способами.

1. Граничные условия первого рода. Задается распределение температуры по поверхности тела для каждого момента времени:

$$t_n = f_1(x, y, z, \tau), \quad (3.35)$$

где t_n — температура поверхности.

Для процессов стационарной теплопроводности функция f_1 не зависит от времени в условии (3.35), и оно обычно называется условием Дирихле. При решении одномерных и многомерных задач часто принимается допущение о том, что температура во всех точках поверхности одинакова, или постоянна, или изменяется по заданному закону во времени. В этом случае задается

$$t_n = \text{const} \text{ или } t_n = f(\tau). \quad (3.36)$$

К граничным условиям первого рода могут быть отнесены задачи разогрева и охлаждения системы при заданном изменении температуры на границе или весьма интенсивном теплообмене на поверхности (температура стенок близка к температуре среды). Однако круг таких практических задач ограничен, и относительно простые граничные условия первого рода используются в основном при разработке математических методов и оценочных расчетов.

2. Граничные условия второго рода задаются распределением плотности теплового потока на поверхности тела как функция координат и времени:

$$q_n = f_2(x, y, z, \tau). \quad (3.36)$$

Для стационарного теплообмена функция f_2 в условии (3.36) не зависит от времени, и это условие называют условием Неймана:

$$q_n = q_0 = \text{const}. \quad (3.37)$$

К граничным условиям второго рода относятся часто встречающиеся на практике задачи нагрева системы внешним источником — нагревателем, причем собственная температура последнего, свойства его поверхности, а также температура и свойства поверхности нагреваемого объекта могут меняться во времени. Кроме того, из-за взаимного переизлучения, температура нагревателя, а следовательно, и тепловой поток становятся зависимыми от температуры объекта, что затрудняет расчет падающего на исследуемую систему теплового потока.

3. Граничные условия третьего рода задаются зависимостью плотности теплового потока вследствие теплопроводности со стороны тела от температуры поверхности t_n до температуры окружающей среды $t_{\text{окр}}$. Их использование предполагает знание температуры окружающей среды $t_{\text{окр}}$ и закона теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Для описания процесса теплообмена при граничных условиях третьего рода используется закон Ньютона — Рихмана (3.30).

Коэффициент теплопередачи α характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Численно он равен количеству теплоты, отдаваемой (или получаемой) единицей поверхности в единицу времени при разности температур между поверхностью тела и окружающей средой в 1°C .

Согласно закону сохранения энергии количество теплоты, которая отводится с единицы поверхности в единицу времени вследствие теплоотдачи, должно равняться количеству теплоты, подводимой к единице поверхности в единицу времени вследствие теплопроводности из внутренних объемов тела, то есть:

$$\alpha(t_{\text{ст}} - t_c) = -\lambda \left(\frac{dt}{dn} \right)_{\text{ст}},$$

где n — нормаль к поверхности тела, а индекс «ст» указывает на то, что температура и температурный градиент относится к поверхности тела при $n = 0$.

Окончательно граничные условия третьего рода можно записать в виде

$$\left(\frac{dt}{dn} \right)_{\text{ст}} = -\frac{\lambda}{\alpha} (t_{\text{ст}} - t_c). \quad (3.38)$$

Уравнение 3.38 является частным выражением закона сохранения энергии для поверхности тела. Коэффициент теплопередачи α в этом случае, в отличие от коэффициента теплопроводности λ , не является физической постоянной, характерной для вещества. В общем случае он отражает совместное действие конвекции и излучения и поэтому зависит от множества факторов.

Граничные условия третьего рода широко применяются на практике (например, конвективный теплообмен на границе расплава и футеровки), поэтому многие решения приводятся в руководствах в виде таблиц и графиков.

4. Граничные условия четвертого рода определяются условиями теплообмена системы тел или тела с окружающей средой по закону теплопроводности. Предполагается, что между телами осуществляется идеальный контакт (температуры соприкасающихся тел одинаковы).

При этом имеет место равенство тепловых потоков, проходящих через поверхность соприкосновения, то есть:

$$\lambda_1 \left(\frac{dt_1}{dn} \right)_{\text{ст}} = \lambda_2 \left(\frac{dt_2}{dn} \right)_{\text{ст}}. \quad (3.39)$$

В задачах с граничными условиями четвертого рода задается отношение тангенсов угла наклона касательных к температурным кривым в точке соприкосновения тел или тела и среды. Граничные условия четвертого рода, по существу, дают правило сопряжения температурных полей объекта исследования и внешнего тела, в котором теплота передается путем теплопроводности.

При решении некоторых задач теплопроводности задаются смешанные граничные условия. Например, при расчете потерь теплоты через многослойную футеровку ставятся граничные условия I и III рода.

Дифференциальное уравнение (3.30) с заданными условиями однозначности дает полную математическую формулировку краевой задачи теплопроводности. Поставленная таким образом задача может быть решена аналитическими или численными методами.

3.2.2.4. Коэффициент теплопроводности

Коэффициент теплопроводности является физической характеристикой среды. Он зависит от ее локального состояния и прежде всего от температуры. Численно коэффициент теплопроводности равен количеству теплоты, проходящему в единицу времени через единицу изотермической поверхности при условии $\text{grad } t = 1$.

Значение λ определяется экспериментальным путем. Результаты обработки опытных данных, как правило, представляются в виде полинома второй степени:

$$\lambda(t) = a + b \cdot 10^{-3} \cdot t + c \cdot 10^{-6} \cdot t^2,$$

где a, b, c — экспериментальные коэффициенты.

Наименьшей проводимостью теплоты характеризуются газы, коэффициент теплопроводности которых существенно увеличивается с возрастанием температуры. При нагреве до 1000 °С коэффициент

теплопроводности газов сопоставим с λ огнеупорных и теплоизоляционных материалов.

3.2.2.5. Расчет стационарной теплопередачи

Условия тепловой работы плавильных, обжиговых и сушильных тепловых агрегатов металлургии, машиностроения, химической и энергетической промышленности, промышленности строительных материалов приближены к стационарному состоянию. Толщина печных ограждений в направлении x значительно меньше их размеров в направлениях y (длина) и z (высота). Поэтому задача оценки эффективной теплопроводности и выбора материалов для организации футеровки может быть сведена к условиям одномерной стационарной теплопередачи через плоскую стенку и цилиндрическую поверхность. Данная постановка охватывает практически весь круг прикладных задач, связанных с расчетом и конструированием кладки теплотехнического оборудования. При этом наиболее типичные задачи теплопроводности предполагают задание граничных условий I и III рода, а также смешанную постановку граничных условий (I и III рода).

Плоская стенка с граничными условиями I рода

К таким задачам относятся этапы разогрева/охлаждения теплового агрегата, смены штатного режима работы (рабочий ход/холостой ход).

Для однослойной стенки $k = \text{const}$. Расчет теплопередачи производится при заданной температуре внутренней $t_{\text{вн}}$ и наружной $t_{\text{нар}}$ поверхности стенки (рис. 3.8). По оси x отложена толщина стенки δ , по оси y — температура t . Вектор показывает направление теплового потока через стенку.

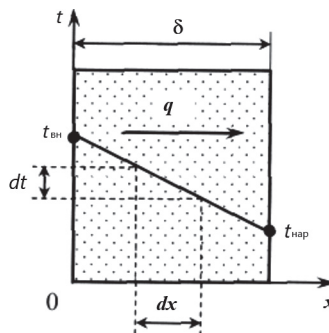


Рис. 3.8. Распределение температуры в плоской однородной стенке при граничных условиях I рода

Из уравнения (3.38) получаем выражение $dt = -\frac{q}{\lambda} dx$, интегрируя которое, приходим к уравнению $t = -\frac{q}{\lambda} x + A$, где A — постоянная интегрирования, определяемая пограничными условиями теплопередачи:

$$\text{при } x = \delta \quad t = t_{\text{нар}} = -q \frac{\delta}{\lambda} + A = -q \frac{\delta}{\lambda} t_{\text{вн}},$$

откуда следует:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) = \frac{1}{R} (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) = K (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}), \quad (3.40)$$

где $R = \delta/\lambda$ — коэффициент термического (теплового) сопротивления стенки, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$; $K = 1/R$ — коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Уравнение (3.40) является расчетной формулой процесса теплопередачи через плоскую стенку при стационарном тепловом состоянии и предположении, что коэффициент теплопроводности материала не зависит от температуры. В действительности λ является функцией температуры. Если эта функция описывается линейной зависимостью, то в формулу (3.40) следует подставлять среднеарифметическое значение коэффициента теплопроводности при температуре $t_{\text{вн}}$ и $t_{\text{нар}}$. В случае нелинейной зависимости $\lambda(t)$ коэффициент теплопроводности определяется при среднеарифметической температуре стенки.

Для многослойной стенки ($\lambda = \text{const}$), состоящей из четырех разнородных плотно прилегающих друг к другу слоев кладки толщиной δ_1 , δ_2 , δ_3 и δ_4 соответственно (рис. 3.9). Для каждого слоя известны значения коэффициентов теплопроводности λ_1 , λ_2 , λ_3 и λ_4 соответственно.

При заданных значениях $t_{\text{вн}}$ и $t_{\text{нар}}$, а также $q = \text{const}$ можно записать систему, из которой после преобразований получаем уравнения:

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_{\text{вн}} - t_1); \quad q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_1 - t_2); \quad q = \frac{\lambda_3}{\delta_3} (t_2 - t_3); \quad q = \frac{\lambda_4}{\delta_4} (t_3 - t_{\text{нар}}).$$

Из которых после преобразования получаем

$$(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) = q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} \right) = q (R_1 + R_2 + R_3 + R_4).$$

Откуда следует:

$$q = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}. \quad (3.41)$$

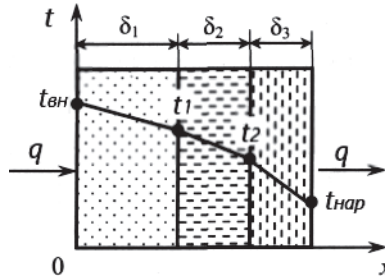


Рис. 3.9. Распределение температуры в плоской трехслойной стенке при граничных условиях I рода

Для n слоев в стенке уравнение (3.41) преобразуется к виду

$$q = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{\sum_{i=1}^n R_i}. \quad (3.42)$$

Из выражения (3.42) определяется температура на контакте слоев в кладке t_i :

$$t_i = t_{\text{вн}} - q \sum_{i=1}^n R_i$$

Плоская стенка с граничными условиями III рода

Передача тепла от одной среды (твердой, жидкой или газообразной) к другой через разделяющую их одно- или многослойную твердую стенку любой формы называется теплопередачей.

Теплопередача включает в себя теплоотдачу от более горячей среды к стенке, теплопроводность в стенке, теплоотдачу от стенки к более холодной подвижной среде.

На границах стенки заданы суммарные коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 , а также температура среды в печи t_r и температура окружающей среды $t_{\text{окр}}$ (рис. 3.10). Процесс теплопередачи от одной газовой среды в другую через разделительную стенку включает действие всех трех видов теплообмена, т. е. горячая среда передает теплоту излучением и конвекцией на внутреннюю поверхность стенки с температурой $t_{\text{вн}}$. Внутри стенки тепло передается теплопроводностью к ее наружной поверхности с температурой $t_{\text{нар}}$. От наружной поверхности теплота

излучением и конвекцией передается в окружающее пространство. Последовательное прохождение теплового потока через все элементы цепи для однослойной стенки описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} q &= \alpha_1 (t_{\text{вн}} - t_{\text{окр}}) \text{ или } t_{\text{нар}} - t_{\text{окр}} = q / \alpha_1 ; \\ q &= \frac{\lambda}{\delta} (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) \text{ или } t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}} = q \frac{\delta}{\lambda} ; \\ q &= \alpha_2 (t_{\text{р}} - t_{\text{вн}}) \text{ или } t_{\text{р}} - t_{\text{вн}} = q / \alpha_2 . \end{aligned} \quad (3.43)$$

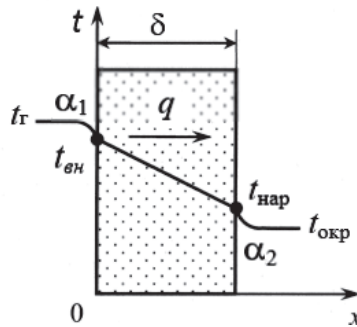


Рис. 3.10. Распределение температуры в плоской стенке при граничных условиях III рода

Сложив разности температур (3.43), после преобразований получаем

$$q = \frac{t_{\text{р}} - t_{\text{окр}}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (3.44)$$

или
$$q = K (t_{\text{р}} - t_{\text{окр}}) , \quad (3.44 \text{ а})$$

где K — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К).

Для однослойной стенки
$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} . \quad (3.44 \text{ б})$$

Для многослойной стенки
$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} . \quad (3.45)$$

Знаменатель в формуле (3.45) представляет собой сумму всех термических сопротивлений на пути теплового потока от t_r до $t_{окр}$. Величины $1/\alpha_1$ и $1/\alpha_2$ являются внешним термическим сопротивлением в пограничном слое на границах контакта газовой среды с разделительной стенкой. В то время как $\sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i$ — сумма внутренних термических сопротивлений многослойной стенки. Суммарные коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 равны $\alpha_{1(2)} = \alpha_{рад} + \alpha_{кон}$, где $\alpha_{рад}$, $\alpha_{кон}$ — коэффициент радиационной и конвективной теплоотдачи соответственно, Вт/(м²·К).

Перепад температур в каждом слое стенки пропорционален термическому сопротивлению этого слоя. Поэтому температура между слоями t_i определяется по формуле

$$t_i = t_r - q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{n-1} R_i \right). \quad (3.46)$$

Учитывая температурную зависимость коэффициента теплопроводности, задача определения тепловых потерь в окружающую среду и распределения температур в многослойной стенке решается методом последовательных приближений (методом итераций). Итерационный процесс прекращается, как только выполнено условие по заданной погрешности расчета:

$$\left| \frac{q_1 - q_2}{q} \right| \leq \varepsilon_{погр}, \quad (3.47)$$

где q — плотность теплового потока по формуле (3.20), Вт/м²; $q_1 = \alpha_1 (t_r - t_{вн})$ — плотность теплового потока на входе в многослойную стенку, Вт/м²; $q_2 = \alpha_2 (t_{нар} - t_{окр})$ — плотность теплового потока от наружной поверхности в окружающую среду, Вт/м²; $t_{вн}$, $t_{нар}$ — определяемая расчетом температура внутренней и внешней поверхности многослойной стенки, °С; $\varepsilon_{погр}$ — заданная погрешность расчета.

3.2.2.6. Расчет тепловых потерь через печные ограждения

Выбор огнеупорных материалов для футеровки теплового агрегата должен осуществляться на основании:

- оценки возможности и скорости химических реакций, протекающих с участием огнеупора, с одной стороны, и корродирующих факторов производства (расплава металла и/или шлака,

газовой атмосферы, пыли, перепадов температур) — с другой, с целью обеспечения высокой химической и термической стойкости рабочего слоя футеровки;

- соответствия свойств огнеупора рабочим температурам процессов (по огнеупорности, температуре начала деформации, крипу и температуре 1 % усадки);
- соотношения между затратами на поставку и монтаж и стойкостью материалов.

Как правило, выполнение одного или нескольких из этих условий приводит к выбору материала для рабочего слоя футеровки с высокой теплопроводностью и теплоемкостью. Поэтому выбор материалов для арматурного и теплоизоляционных слоев футеровки должен решать задачу снижения непроизводительных тепловых потерь процесса. Дополнительным фактором является обеспечение конструкционной прочности и отсутствия химического взаимодействия между слоями футеровки при рабочих температурах.

Допустимая величина тепловых потерь задается или плотностью теплового потока q , или предельной температурой наружной поверхности кладки $t_{\text{нар}}$. В первом случае параметр $t_{\text{нар}}$ будет определяться величиной q , во втором — потери теплоты в окружающую среду задаются предельным значением $t_{\text{нар}}$.

Геометрия печных ограждений подразделяется на плоские и полые цилиндрические поверхности. Первый тип поверхности является основным в конструкции плавильных и нагревательных печей, второй — в тепловых агрегатах барабанного типа. Примерами установок первого типа являются ваннные печи (мартены, стекловаренные), а также методические, туннельные и камерные сушила, второго типа — сушильные барабаны и вращающиеся обжиговые печи.

Корректность расчета печных ограждений в значительной степени определяется способом задания граничных условий, обеспечивающих применение исходных данных, правомерность которых может быть подтверждена инструментальным контролем. Для расчета потерь теплоты в окружающую среду задача теплопроводности решается при смешанной постановке граничных условий I и III рода. Из условий I рода принимается внутренняя температура кладки $t_{\text{вн}}$. Ее величина, как правило, задается технологическим регламентом печи и контролируется штатными средствами измерения. Из условий III рода задается температура воздуха в зоне обслуживания печи $t_{\text{окр}}$ и суммарный

коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности кладки $\alpha_{\text{нар}}$. Его величина определяется наружной температурой $t_{\text{нар}}$ и видом конвективного теплообмена (естественного или принудительного) этой поверхности с окружающей средой.

Теплопередача через плоскую многослойную стенку

Исходя из смешанной постановки граничных условий теплопередачи, уравнения (3.44) и (3.44 а) преобразуются к виду

$$q = K \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{окр}}) = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{окр}}}{\sum_{i=1}^n R_i + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}}}, \quad \text{где } K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n R_i + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}}}. \quad (3.48)$$

Соответственно, формула (3.46) будет иметь вид

$$t_i = t_{\text{вн}} - q \sum_{i=1}^{n-1} R_i. \quad (3.49).$$

Для естественной конвекции коэффициент суммарной теплоотдачи рассчитывается по выражению

$$\alpha_{\text{нар}} = k_n \sqrt[4]{t_{\text{нар}} - t_{\text{окр}}} + \frac{C_0 \varepsilon_n}{t_{\text{нар}} - t_{\text{окр}}} \left[\left(\frac{T_{\text{нар}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр}}}{100} \right)^4 \right], \quad (3.50)$$

где k_n — коэффициент, учитывающий положение поверхности и направление теплоотдачи в пространстве: для боковых стен (вертикальные поверхности) $k_n = 2,4$; для свода и пода печи $k_n = 3,3$ и $1,6$ соответственно; $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε_n — степень черноты наружной поверхности стенки (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Степень черноты некоторых материалов

Материал		Температура, °С	Степень черноты
Стальной лист		25–50	0,81–0,83
Стальная полоса без зачистки		35–350	0,95–0,97
Жидкий чугун с несколько окисленной поверхностью		1400–1600	0,25–0,40
Огнеупорный кирпич	высокоглиноземистый	1000–1500	0,45–0,60
	шамотный		0,65–0,80
	магнезитовый		0,39–0,41
	красный печной	200–500	0,91–0,93

Окончание табл. 3.6

Материал	Температура, °С	Степень черноты
Асбестовый картон	40–370	0,93–0,95
Поверхность, покрытая масляной краской	50–100	0,92–0,95
Поверхность, покрытая светлой алюминиевой краской	200–500	0,20–0,30

Погрешность расчета определяется по формуле

$$\left| \frac{q_{\text{нар}} - q_{\text{т}}}{q} \right| \leq \varepsilon_{\text{погр}}, \quad (3.51)$$

где q — плотность теплового потока по формуле (3.48), Вт/м²; $q_{\text{нар}} = \alpha_{\text{нар}} (t_{\text{нар}} - t_{\text{окр}})$ — плотность теплового потока от наружной поверхности в окружающую среду, Вт/м²; $q_{\text{т}} = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}}{\sum_{i=1}^n R_i}$ — плотность теплового

потока, передаваемая через стенку теплопроводностью, Вт/м².

На первой итерации для определения $t_{\text{нар}}$ используется соотношение

$$\frac{1}{\alpha_{\text{нар}}} \approx 0,05 \div 0,07. \quad (3.52)$$

Теплопередача через цилиндрическую многослойную стенку

В большинстве промышленных печей используются конструктивные элементы арочного типа. В качестве примера можно привести свод рабочего пространства печей, свод регенератора и др. В тех случаях, когда толщина арки ($r_2 - r_1$) значительно меньше ее среднего диаметра ($r_1 + r_2$) и выполняется соотношение $(r_2 - r_1)/(r_1 + r_2) \leq 0,3$, где $r_2 = r_1 + \delta$, расчет теплопередачи производится по формулам для плоской стенки. При выводе формул для цилиндрических стенок, для которых $(r_2 - r_1)/(r_1 + r_2) > 0,03$, приходится учитывать некоторые особенности теплопередачи через подобные поверхности.

В цилиндрической стенке изменение температуры происходит только вдоль радиуса r (рис. 3.11). По длине цилиндра и по его периметру температура остается неизменной. Поэтому уравнение (3.30) будет иметь вид:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dr}. \quad (3.53)$$

Кроме того, по мере удаления от оси цилиндра площадь его внешней поверхности будет увеличиваться, а плотность теплового потока соответственно уменьшаться. Следовательно, q не является величиной постоянной, а зависит от радиуса r цилиндра. Таким образом, не выполняется основное условие в виде $q = \text{const}$, положенное в основу расчетных формул теплопередачи через плоскую стенку.

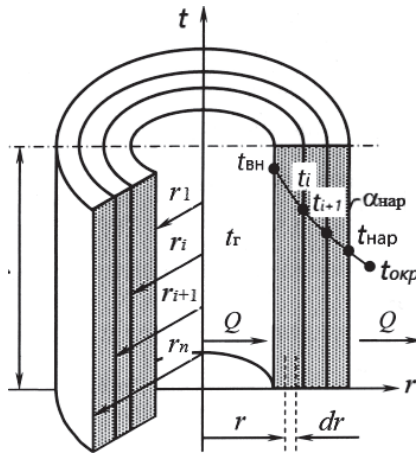


Рис. 3.11. Схема теплопередачи через цилиндрическую стенку

Для цилиндрической стенки постоянной является величина теплового потока $Q = \text{const}$:

$$Q = qF = 2\pi r l q, \quad (3.54)$$

где Q — тепловой поток, Вт; l — длина цилиндра, м.

С учетом (3.28) уравнение (3.29) преобразуется к виду

$$Q = -2\pi r l \lambda \frac{dt}{dr}. \quad (3.55)$$

Разделив переменные в уравнении (3.30), получаем $dt = -\frac{Q}{2\pi\lambda l} \frac{dr}{r}$,

после интегрирования получаем

$$t = C - \frac{Q}{2\pi\lambda l} \ln r, \quad (3.56)$$

где C — постоянная интегрирования.

Из уравнения (3.56) следует, что распределение температуры в цилиндрической стенке подчиняется логарифмическому закону.

Введем понятие погонной плотности теплового потока:

$$q_{\text{пог}} = \frac{Q}{l}, \quad (3.57)$$

где $q_{\text{пог}}$ — погонная плотность теплового потока, Вт/м. С учетом (3.57) уравнение (3.56) преобразуется к виду

$$t = C - \frac{q_{\text{пог}}}{2\pi\lambda} \ln r. \quad (3.58)$$

Перепишем уравнение (3.58) относительно $q_{\text{пог}}$. После подстановки граничных значений переменных ($r = r_1, t = t_{\text{вн}}$; $r = r_2, t = t_{\text{нар}}$) и исключения C получаем расчетную формулу для погонной плотности теплового потока для цилиндрической однослойной стенки при граничных условиях I рода ($\lambda = \text{const}$):

$$q_{\text{пог}} = \frac{2\pi(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}})}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (3.59)$$

Для многослойной стенки

$$q_{\text{пог}} = \frac{2\pi(t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (3.60)$$

Температура между слоями кладки равна

$$t_i = t_{\text{вн}} - \frac{q}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{i-1}} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}. \quad (3.61)$$

При граничных условиях III рода ($\lambda = \text{const}$) погонная плотность теплового потока через одно- и многослойную стенку определяется соответственно выражениями

$$q_{\text{пог}} = \frac{2\pi(t_{\text{г}} - t_{\text{окр}})}{\frac{1}{\alpha_1 r_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_2 r_2}}, \quad (3.62)$$

$$q_{\text{пог}} = \frac{2\pi(t_{\text{г}} - t_{\text{окр}})}{\frac{1}{\alpha_1 r_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{1}{\alpha_2 r_2}}. \quad (3.63)$$

Температура между слоями кладки равна

$$t_i = t_{i-1} - \frac{q_{\text{пог}}}{2\pi\lambda_{i-1}} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}. \quad (3.64)$$

Для расчета тепловых потерь в окружающую среду при граничных условиях I и III рода используется уравнение

$$q_{\text{пог}} = \frac{2\pi(t_{\text{вн}} - t_{\text{окр}})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} r_{i+1}}}. \quad (3.65)$$

Значения температур между слоями цилиндрической кладки определяются по формуле (3.64).

Погрешность расчета определяется по формуле

$$\left| \frac{t_{\text{нар}} - t_{\text{нар.1}}}{t_{\text{нар}}} \right| \leq \varepsilon_{\text{погр}}, \quad (3.66)$$

где $t_{\text{нар}}$, $t_{\text{нар.1}}$ — наружная температура стенки, определенная от $t_{\text{г}}$ и $t_{\text{окр}}$ соответственно, °С.

3.2.3. Алгоритм расчета теплопередачи через непроницаемые стенки

Согласно классификации задач тепломассообмена существуют две постановки задачи расчета теплопередачи: прямая и обратная. При решении прямой задачи расчета теплопередачи находят температурное поле и тепловой поток через стенку при заданных условиях однозначности — известных коэффициентах теплоотдачи, геометрических и теплофизических параметрах задачи. В этом случае необходимо дополнительно знать температуру в двух любых точках данной области теплообмена.

При решении обратной задачи расчета теплопередачи находят один из параметров однозначности: толщину i -го слоя стенки δ_i , коэффициент теплопроводности материала i -го слоя стенки λ_i , коэффициенты теплоотдачи α_1 или α_2 .

Для решения обратной задачи теплопередачи должна быть задана температура в двух точках данной расчетной области теплообмена и тепловой поток (удельный тепловой поток).

Алгоритм решения прямой задачи

1. На первом этапе решения прямой задачи рассчитывают термические сопротивления всех *элементарных* участков (элементарных слоев) теплопередачи:

- теплоотдачи от горячего рабочего объема к стенке;
- теплопроводности всех слоев стенки;
- теплоотдачи от стенки к холодному окружающему пространству.

2. Затем по формуле теплопередачи определяют поверхностную плотность теплового потока (q) для плоской стенки, линейную плотность теплового потока (q_l) для цилиндрической стенки и по двум заданным температурам и термическому сопротивлению участка между этими температурами определяют величину теплового потока (q):

- а) плоская стенка — по уравнению (3.44 а) и (3.45);
- б) цилиндрическая стенка — по уравнению (3.65).

3. На третьем этапе расчета теплопередачи находят неизвестные температуры на границе слоев футеровки в данной области теплопередачи. Для этого выбирают участок теплообмена таким образом, чтобы на одной из его границ была известная температура, а на другой — искомая. Затем по формуле теплопередачи для стенки заданной формы находят неизвестную температуру, предварительно рассчитав термическое сопротивление выбранного участка теплообмена.

Алгоритм решения обратной задачи

1. При решении обратной задачи теплопередачи через стенку тепловой поток или удельный тепловой поток — заданная по условию задачи величина. Поэтому сразу находят термическое сопротивление участка теплопередачи между заданными температурами:

а) плоская стенка:

$$R_i = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{окр}}}{q} - \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}}; \quad (3.67)$$

б) цилиндрическая стенка:

$$R_i = \frac{2\pi(t_{\text{вн}} - t_{\text{окр}})}{q_{\text{пог}}} - \frac{1}{\alpha_{\text{нар}} r_{i+1}}, \text{ где } R_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}. \quad (3.68)$$

2. На втором этапе решения обратной задачи расчета теплопередачи через стенку по известному термическому сопротивлению находят

(в зависимости от целей расчета) один из параметров однозначности: толщину слоя стенки δ , или коэффициент теплопроводности материала стенки λ , либо один из коэффициентов теплоотдачи — α_1 или α_2 .

3. Если по условию задачи требуется рассчитать неизвестные температуры в заданной области теплопередачи, то необходимо выполнить пункты 1 и 3 алгоритма решения прямой задачи.

Пример

При граничных условиях I и III рода определить удельный тепловой поток через футеровку кислородного конвертера для плавки рядовой низкоуглеродистой стали. Температура расплава 1730°C , температура окружающей среды 40°C , заданная погрешность расчета $\varepsilon_{\text{погр}} \leq 0,02$ (не более 2%).

Коэффициент теплопередачи от расплава к футеровке α_1 примем $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, коэффициент теплопередачи от наружной поверхности футеровки в окружающую среду α_2 примем $15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Тепловым сопротивлением металлического корпуса конвертера пренебрегаем. Футеровка кислородного 160-тонного конвертера состоит из 6 слоев огнеупорных и теплоизоляционных материалов, свойства которых представлены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Исходные данные для расчета

Назначение	Материал, марка	Толщина слоя, м	Уравнение теплопроводности
Рабочий слой	Периклазоуглеродистые изделия ПУПК	0,920	$11,9 - 10,1 \cdot 10^{-3}t + 3,65 \cdot 10^{-6}t^2$
Буферная засыпка	Форстерит фр. 1–0 мм	0,040	$0,195 - 0,065 \cdot 10^{-3}t + 0,29 \cdot 10^{-6}t^2$
Арматурный слой	Периклазохромитовые изделия ПХП-70	0,230	$4,77 - 3,03 \cdot 10^{-3}t + 0,975 \cdot 10^{-6}t^2$
Теплоизоляция	Муллитовые легковесные изделия МЛЛТ-1,3	0,230	$0,624 - 0,128 \cdot 10^{-3}t + 0,234 \cdot 10^{-6}t^2$
	Картон муллитокремнеземистый МКРК-350	0,040	$0,069 + 0,06 \cdot 10^{-3}t + 0,155 \cdot 10^{-6}t^2$
	Катрон асбестовый КАОН 5	0,010	$0,02 + 0,16 \cdot 10^{-3}t$

Первая итерация

Определяем ориентировочные температуры по границам слоев футеровки.

Средняя температура в футеровке

$$t_{cp} = 0,5 \times (1730 + 40) = 885 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура первого слоя футеровки

$$t_{cp1} = 0,5 \times (1730 + 885) = 1307,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура второго слоя футеровки

$$t_{cp2} = 0,5 \times (1307,5 + 885) = 1096 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура третьего слоя футеровки

$$t_{cp3} = 0,5 \times (1096 + 885) = 991 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура четвертого слоя футеровки

$$t_{cp4} = 0,5 \times (991 + 885) = 938 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура шестого слоя футеровки

$$t_{cp6} = 0,5 \times (885 + 40) = 462,5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура пятого слоя футеровки

$$t_{cp5} = 0,5 \times (938 + 462,5) = 700 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Предварительная оценка теплового сопротивления слоев футеровки:

$$\lambda_1 = 11,9 - 10,1 \times 10^{-3} \times 1307,5 + 3,65 \times 10^{-6} \times 1307,5^2 = 11,203 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К}),$$

$$R_1 = \delta_1/\lambda_1 = 0,920/11,203 = \mathbf{0,082} \text{ (м}^2 \times \text{К)}/\text{Вт};$$

$$\lambda_2 = 0,195 - 0,065 \times 10^{-3} \times 1096 + 0,29 \times 10^{-6} \times 1096^2 = 0,223 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К}),$$

$$R_2 = \delta_2/\lambda_2 = 0,040/0,223 = \mathbf{0,180} \text{ (м}^2 \times \text{К)}/\text{Вт};$$

$$\lambda_3 = 4,77 - 3,03 \times 10^{-3} \times 991 + 0,975 \times 10^{-6} \times 991^2 = 4,568 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К}),$$

$$R_3 = \delta_3/\lambda_3 = 0,023/4,568 = \mathbf{0,050} \text{ (м}^2 \times \text{К)}/\text{Вт};$$

$$\lambda_4 = 0,624 - 0,128 \times 10^{-3} \times 938 + 0,234 \times 10^{-6} \times 938^2 = 0,633 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К}),$$

$$R_4 = \delta_4/\lambda_4 = 0,023/0,633 = \mathbf{0,364} \text{ (м}^2 \times \text{К)}/\text{Вт};$$

$$\lambda_5 = 0,069 + 0,06 \times 10^{-3} \times 700 + 0,155 \times 10^{-6} \times 700^2 = 0,0808 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К}),$$

$$R_5 = \delta_5/\lambda_5 = 0,020/0,0808 = \mathbf{0,248} \text{ (м}^2 \times \text{К)}/\text{Вт};$$

$$\lambda_6 = 0,02 + 0,16 \times 10^{-3} \times 462,5 = 0,0274 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К}),$$

$$R_6 = \delta_6/\lambda_6 = 0,010/0,0274 = \mathbf{0,182} \text{ (м}^2 \times \text{К)}/\text{Вт}.$$

Учитывая $1/\alpha_1 = 1/100 = 0,01$ и $1/\alpha_2 = 1/15 = 0,067$, по формулам (3.44) и (3.44 а) находим:

$$K = \frac{1}{0,01 + 0,082 + 0,180 + 0,050 + 0,364 + 0,248 + 0,182 + 0,067} = 0,497 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{К}};$$

$$q = 0,845 \times (1730 - 40) = 1428 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

По формуле (3.46) определяются температуры на границах слоев футеровки:

$$t_{\text{вн}} = 1730 - 1428 (0,01) = 1716 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{1-2} = 1730 - 1428 (0,01 + 0,082) = 1599 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{2-3} = 1730 - 1428 (0,01 + 0,082 + 0,180) = 1342 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\begin{aligned}
 t_{3-4} &= 1730 - 1428 (0,01 + 0,082 + 0,180 + 0,050) = 1270 \text{ }^\circ\text{C}; \\
 t_{4-5} &= 1730 - 1428 (0,01 + 0,082 + 0,180 + 0,050 + 0,364) = 750 \text{ }^\circ\text{C}; \\
 t_{5-6} &= 1730 - 1428 (0,01 + 0,082 + 0,180 + 0,050 + 0,364 + 0,248) = 396 \text{ }^\circ\text{C}; \\
 t_{6-\text{нар}} &= 1730 - 1428 (0,01 + 0,082 + 0,180 + 0,050 + 0,364 + 0,248 + \\
 &+ 0,182) = 136 \text{ }^\circ\text{C}.
 \end{aligned}$$

Вторая итерация

Средняя температура первого слоя футеровки

$$\bar{t}_1 = 0,5 \times (1716 + 1599) = 1658 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура второго слоя футеровки

$$\bar{t}_2 = 0,5 \times (1599 + 1342) = 1471 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура третьего слоя футеровки

$$\bar{t}_3 = 0,5 \times (1342 + 1270) = 1306 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура четвертого слоя футеровки

$$\bar{t}_4 = 0,5 \times (1270 + 750) = 1010 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура пятого слоя футеровки

$$\bar{t}_5 = 0,5 \times (750 + 396) = 573 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура шестого слоя футеровки

$$\bar{t}_6 = 0,5 \times (396 + 136) = 266 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Предварительная оценка теплового сопротивления слоев футеровки:

$$\lambda_1 = 11,9 - 10,1 \times 10^{-3} \times 1658 + 3,65 \times 10^{-6} \times 1658^2 = 11,229 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К}),$$

$$R_1 = \delta_1 / \lambda_1 = 0,920 / 11,229 = \mathbf{0,082} \text{ (м}^2 \times \text{К)} / \text{Вт};$$

$$\lambda_2 = 0,195 - 0,065 \times 10^{-3} \times 1471 + 0,29 \times 10^{-6} \times 1471^2 = 0,248 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К}),$$

$$R_2 = \delta_2 / \lambda_2 = 0,040 / 0,248 = \mathbf{0,161} \text{ (м}^2 \times \text{К)} / \text{Вт};$$

$$\lambda_3 = 4,77 - 3,03 \times 10^{-3} \times 1306 + 0,975 \times 10^{-6} \times 1306^2 = 4,541 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К}),$$

$$R_3 = \delta_3 / \lambda_3 = 0,230 / 4,541 = \mathbf{0,051} \text{ (м}^2 \times \text{К)} / \text{Вт};$$

$$\lambda_4 = 0,624 - 0,128 \times 10^{-3} \times 1010 + 0,234 \times 10^{-6} \times 1010^2 = 0,635 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К}),$$

$$R_4 = \delta_4 / \lambda_4 = 0,230 / 0,635 = \mathbf{0,362} \text{ (м}^2 \times \text{К)} / \text{Вт};$$

$$\lambda_5 = 0,069 + 0,06 \times 10^{-3} \times 573 + 0,155 \times 10^{-6} \times 573^2 = 0,078 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К}),$$

$$R_5 = \delta_5 / \lambda_5 = 0,020 / 0,078 = \mathbf{0,256} \text{ (м}^2 \times \text{К)} / \text{Вт};$$

$$\lambda_6 = 0,02 + 0,16 \times 10^{-3} \times 266 = 0,0243 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К}),$$

$$R_6 = \delta_6 / \lambda_6 = 0,010 / 0,0243 = \mathbf{0,412} \text{ (м}^2 \times \text{К)} / \text{Вт}.$$

Учитывая $1/\alpha_1 = 1/100 = 0,01$ и $1/\alpha_2 = 1/15 = 0,067$, по формулам (3.44) и (3.44 а) находим:

$$K = \frac{1}{0,01 + 0,082 + 0,161 + 0,051 + 0,362 + 0,256 + 0,412 + 0,067} = 0,7137 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{К}};$$

$$q = 0,7137 \times (1730 - 40) = 1206 \text{ Вт/м}^2.$$

По формуле (3.46) определяются температуры на границах слоев футеровки:

$$t_{\text{вн}} = 1730 - 1206 (0,01) = 1718 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_1 = 1730 - 1206 (0,01 + 0,082) = 1619 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_2 = 1730 - 1206 (0,01 + 0,082 + 0,161) = 1425 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_3 = 1730 - 1206 (0,01 + 0,082 + 0,161 + 0,051) = 1363 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_4 = 1730 - 1206 (0,01 + 0,082 + 0,161 + 0,051 + 0,362) = 927 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_5 = 1730 - 1206 (0,01 + 0,082 + 0,161 + 0,051 + 0,362 + 0,256) = 618 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{нар}} = 1730 - 1206 (0,01 + 0,082 + 0,161 + 0,051 + 0,362 + 0,256 + 0,412) = 121 \text{ }^\circ\text{C}.$$

По формуле (3.47) оцениваем погрешность расчета:

$$q_1 = 100 \times (1730 - 1718) = 1200 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_2 = 15 \times (121 - 40) = 1215 \text{ Вт/м}^2.$$

$$\varepsilon_{\text{пог}} = \left| \frac{1200 - 1215}{1206} \right| = 0,012 < 0,02, \text{ что соответствует заданной точности.}$$

В случае если разница величин теплового потока от расплава к футеровке и от футеровки в окружающую среду больше 0,02 (2%), итерационный расчет продолжают.

При очень больших значениях разности теплового потока на горячей и холодной стороне футеровки следует еще раз оценить эффективность выбранной теплоизоляции (толщину и вид материалов для арматурного и теплоизоляционного слоев футеровки).

В результате теплового расчета спроектированной футеровки получаем величину теплового потока через футеровку и температуры на границе слоев футеровки, которые не должны превышать рекомендуемые температуры эксплуатации для выбранных огнеупорных и теплоизоляционных материалов. Если расчетные температуры на границе слоев футеровки выше рекомендованных для выбранного материала, следует подобрать другой огнеупор или теплоизоляционный материал с требуемыми характеристиками и повторить расчет.

Второй задачей теплового расчета является решение вопроса тепловой эффективности футеровки (снижения потерь тепла через футеровку). Вклад каждого слоя футеровки в суммарное тепловое сопротивление можно менять, изменяя толщину слоя и материал (теплотехнические характеристики), но при этом основными аргументами в пользу того или иного материала все-таки должны оставаться химическая и термическая стойкость, температура начала деформации и механическая прочность.

4. Расчет раскладки огнеупорных изделий в рабочем слое футеровки

Проjekt футеровки теплового агрегата разрабатывается на основании проведенного выбора марки и типоразмера огнеупорных материалов (изделий или неформованных масс) для рабочего слоя футеровки, а также конструкции и рабочего объема.

Проект должен включать раскладку изделий рабочего слоя по рядам кладки (или расчет количества неформованного материала на рабочий слой), расчет величины температурных швов, количество изделий по маркам и типоразмерам для рабочего слоя футеровки; марки, типоразмеры и объем огнеупорных материалов для арматурного и теплоизоляционного слоев футеровки.

Оформление эскизного чертежа футеровки теплового агрегата должно производиться по ГОСТ 21.405–93 «Правила выполнения рабочей документации тепловой изоляции оборудования и трубопроводов», ГОСТ 21.401–88 «Технология производства» и ГОСТ 21.114–2013 «Правила выполнения эскизных чертежей общих видов нетиповых изделий».

Согласно стандартам РФ тепловые металлургические агрегаты могут иметь номинальные емкости, выбранные из заданного номенклатурного ряда:

- для конвертеров черной металлургии он определен ГОСТ 20067–74 «Конвертеры для стали. Ряд емкостей», т: 50, 100, 130, 160, 200, 250, 300, 350, 400, 500;
- для электродуговых печей он определен ГОСТ 27729–88 «Печи дуговые сталеплавильные», т: 1.0, 2.5, 3.0, 5.0, 6.0, 10.0, 12.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0, 45.0, 50.0, 60.0, 75.0, 90.0, 100.0, 120.0, 150.0, 200.0, 250.0, 300.0, 400.0;
- для сталеразливочных ковшей он определен ГОСТ 7358–78 «Ковши сталеразливочные. Ряд вместимостей», т: 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 16.0, 20.0, 25.0, 30.0, 40.0, 50.0, 60.0, 71.0, 90.0, 100.0, 115.0, 130.0, 140.0, 160.0, 180.0, 200.0, 230.0, 250.0, 280.0, 300.0, 330.0, 350.0, 380.0, 400.0, 430.0, 480.0, 500.0.

Другие тепловые агрегаты как в черной металлургии, так и в прочих отраслях промышленности также имеют номенклатурный перечень рекомендуемых типоразмеров, установленный соответствующими нормативными документами. При проектировании предприятия емкость тепловых агрегатов закладывается на основании принятой производительности, производственной программы и требуемой оборачиваемости (стойкости) футеровки агрегата.

По заданной номинальной емкости теплового агрегата его геометрические размеры, как правило, нормированы конструкцией теплового агрегата.

Для черной металлургии (рис. 4.1) наиболее распространенными являются конвертеры емкостью 50, 100, 150, 200, 250 и 300 т:

Емкость, т	50	100	150	200	150	300
$D_{\text{вн}}$, м	3,3	4,2	4,93	5,5	6,2	6,9
h , м	1,1	1,4	1,5	1,6	1,7	2,0
$H_1/D_{\text{вн}}$	1,55	1,47	1,4	1,3	1,22	1,25

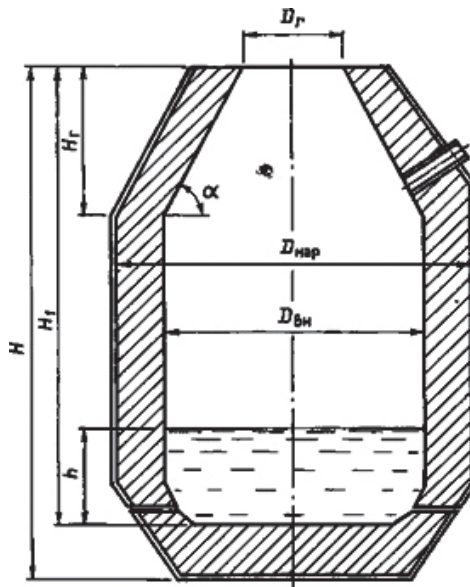


Рис. 4.1. Конвертер черной металлургии:

H_1 — высота рабочего пространства, м; $D_{\text{вн}}$ — диаметр рабочего пространства, м; $D_{\text{г}}$ — диаметр горловины, м; $H_{\text{г}}$ — высота горловины, м; α — угол наклона горловины, град; $D_{\text{нар}}$ — внутренний диаметр металлического корпуса, м; h — высота слоя расплава, м; H — общая высота конвертера, м

Толщину футеровки 150-тонного конвертера обычно принимают так: конусная часть 508–888 мм; цилиндрическая часть 711–990 мм; днище 748–1220 мм.

В соответствии с рекомендациями $D_{\text{вн}}$ будет равен 4,93 м и $H_1/D_{\text{вн}} = 1,4$. Тогда высота рабочего пространства

$$H_1 = 4,93 \cdot 1,4 = 6,9 \text{ м.}$$

Диаметр горловины принимается равным

$$D_{\text{г}} = 0,55 D_{\text{вн}} = 0,55 \cdot 4,93 = 2,7 \text{ м.}$$

Высота горловины при рекомендованном угле ее наклона $\alpha = 60^\circ$ равна

$$H_{\text{г}} = 0,5 (D_{\text{вн}} - D_{\text{г}}) \text{tg}60^\circ = 0,5 \cdot (4,93 - 2,7) \cdot 1,732 = 1,93 \text{ м.}$$

Объем конвертера находится по упрощенной формуле:

$$V = \frac{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2}{4} \cdot H_1 = \frac{3,14 \cdot 4,93^2}{4} \cdot 6,9 = 131,65 \text{ м}^3.$$

Принимая толщину футеровки днища равной $\delta_{\text{фут}} = 1$ м и толщину кожуха $\delta_{\text{кож}} = 0,03$ м, определим общую высоту конвертера

$$H = 6,9 + 1,0 + 0,03 = 7,93 \text{ м.}$$

Наружный диаметр конвертера при средней толщине футеровки стен $\delta_{\text{фут}}^{\text{ср}} = 0,85$ м и толщине кожуха $\delta_{\text{кож}} = 0,03$ м равен

$$D_{\text{нар}} = 4,93 + 2 \cdot 0,85 + 2 \cdot 0,03 = 6,69 \text{ м.}$$

Геометрически вся футеровка конвертера делится на три части:

- футеровка горловины, представляющая собой усеченный конус с диаметром основания $D_{\text{вн}}$, диаметром верхней части $D_{\text{г}}$ и толщиной 0,85 м (выбирается по рекомендованным значениям или проекту);
- футеровка цилиндрической части, представляющая собой цилиндр с диаметром $D_{\text{вн}}$ и толщиной 0,85 м (выбирается по проекту);
- футеровка днища, представляющая собой круг диаметром $D_{\text{нар}}$ и толщиной 1,0 м (выбирается по проекту или согласно рекомендациям).

Для дуговых электросталеплавильных печей наиболее распространенной является сфероконическая ванна с углом между образующей и осью конуса, равным 45° (рис. 4.2.).

ческого процесса, не требующего тщательной рафинировки расплавленного металла в печи. При таких соотношениях с теплотехнической точки зрения будет обеспечено и сравнительно равномерное облучение поверхности ванн от дуг и кладки печи, и более равномерный прогрев металла в объеме ванны.

При высоте сферического сегмента H_c , увеличенной до 25 % общей глубины жидкости металла, коэффициент C определяется по формуле $C = (0,9-0,04)\alpha$.

Глубина ванны по жидкому металлу $H_m = D_m/\alpha$, м.

Глубина сферического сегмента $H_c = (0,02-0,25) H_m$, м.

Над жидким металлом в ванне предусмотрено пространство для шлака, объем которого составляет 20 % объема металла в небольших печах, 10–17 % в крупных: $V_{шл} = (0,10-0,20) V_m$, м³.

Высота слоя шлака

$$H_{шл} = \frac{V_{шл}}{0,785 \cdot D_m^2} (\text{м}), \quad (4.3)$$

где 0,785 — эмпирический коэффициент.

Уровень порога рабочего окна принимается на уровне зеркала шлака или на 20–40 мм выше $h' = 0-40$ мм. Уровень откосов рекомендуется принимать на 30–70 мм выше уровня порога рабочего окна во избежание размывания шлаком основания футеровки стен, $h'' = 30-70$ мм.

Объем от уровня зеркала шлака до уровня верха откосов называется дополнительным. Обычно он составляет 10–15 % от H_m . Тогда глубина ванны до уровня откосов печи составит $H_b = H_m + H_{шл} + h' + h''$.

Диаметры рабочего пространства дуговой печи на уровне порога рабочего окна и на уровне откосов соответственно равны:

$$D_{\pi} = D_m + 2(H_{шл} + h'), \text{ мм}; \quad (4.4)$$

$$D_{от} = D_{\pi} = 2h'', \text{ мм}. \quad (4.5)$$

Высота конической части ванны $H_k = H_m - H_c$ (мм).

Тогда диаметр основания шарового сегмента $D_c = D_m - 2 H_k$ (мм).

Для современных дуговых сталеплавильных печей высота плавильного пространства $H_{пл}$ принимается в пределах:

Емкость печи, т	Доля $H_{пл}$ от $D_{от}$
0,5–6,0	0,5–0,45
12,0–50,0	0,45–0,4
100 и выше	0,38–0,34

Выше откосов стены делаются наклонными под углом $15\text{--}30^\circ$ к вертикали. В этом случае увеличивается стойкость огнеупоров кладки, так как по высоте стен увеличивается расстояние от дуг и уменьшается плотность теплового потока на верхний пояс.

Высота наклонной части составляет $H_{\text{накл}} = (0,25\text{--}0,33) (H_{\text{пл}} - h'')$, мм.

Высота цилиндрической части стен $H_{\text{цил}} = H_{\text{пл}} - H_{\text{накл}}$, мм.

Диаметр стен находится по формуле $D_{\text{ст}} = D_{\text{от}} + 2 H_{\text{накл}} \cdot \text{tg}\alpha$, мм, где α — угол наклона стен к вертикали.

Конструкция футеровки кроме внутреннего профиля рабочего пространства определяет материалы и толщину рабочего, арматурного и теплоизоляционных слоев кладки, а также форму и размеры кожуха ДСП.

Основная футеровка ДСП — подина и откосы. Футеровка подины состоит из рабочей части и теплоизоляционного слоя. В свою очередь, рабочая часть футеровки подины включает набивной слой и кирпичную кладку. Верхний набивной слой толщиной $100\text{--}200$ мм обычно выполняют из периклазового или периклазодоломитового порошка на органическом или химическом связующем. Средний огнеупорный слой выполняется из огнеупорных изделий. Толщина рабочего слоя должна быть равной $70\text{--}80\%$ футеровки ванны, т. е. $4\text{--}6$ рядов изделий «на ребро» и «на плашку» или только «на ребро». Нижний изоляционный слой выполняется из огнеупорных изделий или бетона толщиной $120\text{--}140$ мм. На металлическое днище укладывают листовой асбест слоем до 10 мм и насыпают выравнивающий слой шамотного порошка толщиной $30\text{--}40$ мм.

Для печей различной емкости рекомендуется следующая толщина отдельных слоев и всей футеровки подины, мм:

Емкость печи, т	< 12	25–50	100	200	300	400
Набивной слой	100	100	150	150	160	180
Кирпичная кладка	365	495	530	575	595	620
Изоляционный слой	85	105	170	190	195	200
Общая толщина	550	700	850	915	950	1000

Футеровка стен дуговых печей выполняется без теплоизоляционного слоя для облегчения тепловой работы и увеличения стойкости футеровки. Верхняя часть стен (выше уровня шлака) изнашивается меньше, поэтому он выкладывается изделиями меньшего размера, с одним-двумя уступами. Толщина кладки стен зависит от емкости печи, мм:

Емкость печи, т	< 12	25–50	100	200	300–400
Общая толщина:					
на уровне откосов δ_1	365–445	445–495	525–575	575–610	550–650
в верхней части δ_2	230–300	300–365	365–415	380–450	400–470

Для сталеплавильных ковшей (рис. 4.3) типичной формой является усеченный конус с широким основанием сверху. Отношение диаметра кожуха к высоте (C) находится в пределах 0,75–0,90, причем для ковшей меньшей емкости (до 200 т) отношение принимается 0,90–0,80, а для ковшей большой емкости — 0,75–0,80; конусность стен (α) составляет 3–5%. Объем сталеразливочного ковша должен быть таким, чтобы принять весь металл и около 10% шлака (от всего металла).

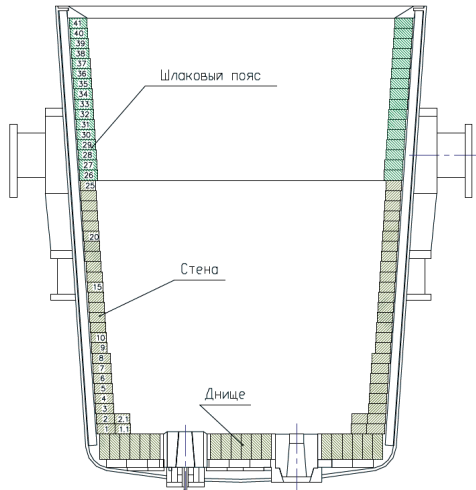


Рис. 4.3. Стальковш

Объем стальковша включает в себя объем металла V_M , шлака $V_{ш}$ и дополнительный объем $V_{доп}$: $V_k = V_M + V_{ш} + V_{доп}$.

Принимая в среднем плотность жидкого металла $\rho_M = 7,15 \text{ т/м}^3$, а емкость стальковша M_T , получаем

$$V_M = \frac{M_T}{\rho_M} (\text{м}^3). \quad (4.6)$$

Объем шлака $V_{ш} = 0,1 \cdot V_M (\text{м}^3)$. Дополнительный объем $V_{доп} = 0,05 \cdot V_M (\text{м}^3)$.

Конкретные размеры стальковша рассчитываются из системы уравнений, учитывая R_1 — радиус верхнего основания ковша, R_2 — радиус нижнего основания ковша, H — высоту ковша:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \frac{2R_1}{H} \\ V = \frac{1}{3} \pi \cdot H \cdot (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2). \\ R_1 = R_2 + H \cdot \operatorname{tg} \alpha \end{array} \right. \quad (4.7)$$

Толщина рабочего слоя футеровки сталковша, в зависимости от зоны и объема ковша, вида транспортируемой и обрабатываемой стали и теплотехнических параметров работы ковша, составляет от 100 до 250 мм.

Таким образом, задача проектирования футеровки теплового агрегата сводится к задаче раскладки огнеупорных изделий заданной формы и размеров в заданную геометрическую фигуру.

Футеровка рабочего слоя круглых тепловых агрегатов выполняется, как правило, кольцами с высотой, равной высоте огнеупорных изделий. Форма изделий для кольцевых кладок — трапецеидальная. Футеровка рабочего слоя прямых участков выполняется прямыми огнеупорными изделиями с формой параллелепипеда.

В настоящее время для футеровки рабочего слоя тепловых агрегатов черной металлургии используются изделия двух форматов: «Р» и «мини-кей». Изделия Р-формата имеют высоту от 20 до 76 мм и по типоразмерам совпадают с номенклатурой огнеупорных изделий, принятой в системе ГОСТ Р. Изделия формата «мини-кей» имеют высоту 100 мм, форму призмы с различными центральными углами и типоразмеры, представленные в приложении 1.

Расчет раскладки футеровки теплового агрегата сводится:

- к разбиению футеровки зоны (конической или цилиндрической) на слои, равные высоте одного изделия («ряды кладки»);
- определению внутреннего и наружного диаметров рабочего слоя футеровки (исходя из заданной в проекте толщины изделий или рекомендаций по эксплуатации);
- расчету количества огнеупорных изделий заданного размера в каждом слое (кольце), исходя из требования максимального совпадения суммарной длины хорд, равных ширине рабочего и «холодного» концов огнеупорных изделий с учетом толщины шва между ними (рис. 4.4), с периметром соответственно внутренней и наружной окружностей, образующих данный слой футеровки.

Количество изделий в слое считается по формулам:

$$1) \text{ для внутреннего периметра: } N_{\text{вн}} = \frac{3 \cdot \pi \cdot R_{\text{вн}}}{b+1}; \quad (4.8)$$

$$2) \text{ для наружного периметра: } N_{\text{нар}} = \frac{3 \cdot \pi \cdot R_{\text{нар}}}{a+1}, \quad (4.9)$$

где $R_{\text{вн}}$ и $R_{\text{нар}}$ — соответственно внутренний и наружный периметры кольца рабочего слоя футеровки.

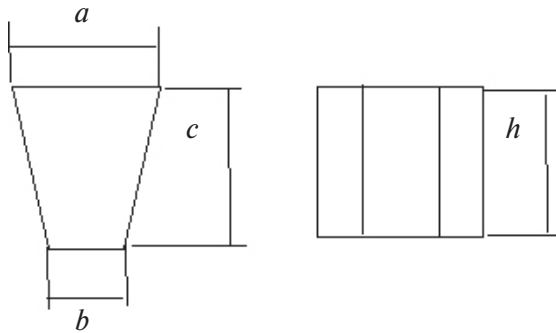


Рис. 4.4. Форма и размеры изделия для кольцевой кладки:
 a — ширина «холодного» конца изделия, мм; b — ширина «рабочего» конца изделия, мм; c — толщина изделия, мм; h — высота изделия, мм

Количество изделий, посчитанное по обеим формулам, должно совпадать, для чего в каждом кольце должны применяться изделия с разными (как правило, 2–3 типов) центральными углами (отношением a/b), т.е. $N = N_{\text{тол}} + N_{\text{тон}} + N_{\text{тон2}}$, где $N_{\text{тол}}$ — количество изделий с большим центральным углом, $N_{\text{тон}}$ и $N_{\text{тон2}}$ — количество изделий с малым центральным углом.

Проверка и подбор типоразмеров изделий осуществляется по формулам:

1) для внутреннего периметра:

$$K_{\text{вн}} = L_{\text{вн}} - [N_{\text{тол}}(b_{\text{тол}} + 1) + N_{\text{тон}}(b_{\text{тон}} + 1) + N_{\text{тон2}}(b_{\text{тон2}} + 1)]; \quad (4.10)$$

2) для внешнего периметра:

$$K_{\text{внеш}} = L_{\text{внеш}} - [N_{\text{тол}}(a_{\text{тол}} + 1) + N_{\text{тон}}(a_{\text{тон}} + 1) + N_{\text{тон2}}(a_{\text{тон2}} + 1)], \quad (4.11)$$

где $K_{\text{внеш}}$ и $K_{\text{вн}}$ — параметры проверки, задача проверки — привести их к минимально возможным значениям; $a_{\text{тол}}$ и $a_{\text{тон}}$ — ширина «холодного» конца изделий соответственно с большим и малым центральным углом, $b_{\text{тол}}$ и $b_{\text{тон}}$ — ширина «горячего» конца изделий соответственно с большим и малым центральным углом.

Библиографический список

1. ГОСТ 2.701–84. Единая система конструкторской документации. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. Взамен ГОСТ 2.701–76 ; введ. 1985–07–01. Москва : Стандартиформ, 2004. 12 с.
2. ГОСТ 2.105–95. ЕСКД. Общие требования к текстовым документам (Изменение ИУС 2–2012). Взамен ГОСТ 2.105–79, ГОСТ 2.906–71 ; введ. 1996–07–01. Москва : Стандартиформ, 2005. 30 с.
3. ГОСТ 2.106–2006. ЕСКД. Текстовые документы (Изменение ИУС 4–2007). Взамен ГОСТ 2.106–96 ; введ. 2006–09–01. Москва : Стандартиформ, 2006. 38 с.
4. ГОСТ 2.109–73. ЕСКД. Основные требования к чертежам (Изменение ИУС 9–2006). Взамен ГОСТ 2.107–68, ГОСТ 2.109–68, ГОСТ 5292–60 в части разд. VIII ; введ. 1974–07–01. Москва : Стандартиформ, 2007. 29 с.
5. ГОСТ 2.113–75. ЕСКД. Групповые и базовые конструкторские документы (Изменение ИУС 7–1986). Взамен ГОСТ 2.113–70 ; введ. 1976–07–01. Москва : Стандартиформ, 2007. 50 с.
6. ГОСТ 2.301–68. ЕСКД. Форматы (Изменение ИУС 9–2006). Взамен ГОСТ 3450–60 ; введ. 1971–01–01. Москва : Стандартиформ, 2007. 4 с.
7. ГОСТ 2.302–68. ЕСКД. Масштабы (Изменение ИУС 9–2006). Взамен ГОСТ 3451–59 ; введ. 1971–01–01. Москва : Стандартиформ, 2007. 3 с.
8. ГОСТ 2.303–68. ЕСКД. Линии (Изменение ИУС 9–2006). Взамен ГОСТ 3456–59 ; введ. 1971–01–01. Москва : Стандартиформ, 2007. 8 с.
9. ГОСТ 2.304–81. ЕСКД. Шрифты чертежные (Изменение ИУС 9–2006). Взамен ГОСТ 2.304–68 ; введ. 1971–01–01. Москва : Стандартиформ, 2007. 22 с.
10. ГОСТ 2.307–2011. ЕСКД. Нанесение размеров и предельных отклонений (Изменение ИУС 12–1987). Взамен ГОСТ 2.307–68 ; введ. 2012–01–01. Москва : Стандартиформ, 2012. 36 с.

11. ГОСТ 2.316–2008. ЕСКД. Правила нанесения надписей, технических требований и таблиц на графических документах. Общие положения. Взамен ГОСТ 2.316–68 ; введ. 2009–07–01. Москва : Стандартинформ, 2009. 11 с.
12. ГОСТ 2.321–84. ЕСКД. Обозначения буквенные. Взамен ГОСТ 3452–59 ; введ. 2009–07–01. Москва : Стандартинформ, 2007. 2 с.
13. ГОСТ 8.417–2002. ГСИ. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. Взамен ГОСТ 8.417–81 ; введ. 2003–09–01. Москва : Стандартинформ, 2010. 32 с.
14. ГОСТ 9327–60. Бумага и изделия из бумаги. Потребительские форматы (Изменение ИУС 11–1989). Взамен ОСТ 51115 ; введ. 1968–01–01. Москва : Издательство стандартов, 1987. 9 с.
15. ГОСТ Р 6.30–2003. УСД. Требования к оформлению документов. Введ. 2003–03–03. Москва : Стандартинформ, 2007. 17 с.
16. Р 50–77–88. Рекомендации. ЕСКД. Правила выполнения диаграмм. Взамен ГОСТ 2.319.–81 ; введ. 1989–01–01. Москва : Издательство стандартов, 1989. 11 с.
17. ГОСТ 7.32–2001. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления. Взамен ГОСТ 7.32–91 ; введ. 2002–07–01. Москва : Стандартинформ, 2006. 18 с.
18. Стрелов К. К. Технология огнеупоров / Стрелов К. К., Мамыкин П. С. Москва : Металлургия, 1978. 370 с.
19. Кашеев И. Д. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок : справочное издание. В 2 кн. Кн. 1. Производство огнеупоров / под ред. И. Д. Кашеева. Москва : Интернет Инжиниринг, 2000. 663 с.
20. Кашеев И. Д. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок : справочное издание. В 2 кн. Кн. 2. Служба огнеупоров / под ред. И. Д. Кашеева. Москва : Интернет Инжиниринг, 2002. 752 с.
21. Кашеев И. Д. Химическая технология огнеупоров : учебное пособие / И. Д. Кашеев, К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин. Москва : Интернет Инжиниринг, 2007. 746 с.
22. Кашеев И. Д. Неформованные огнеупоры : справочник : в 2 т. / И. Д. Кашеев, М. Г. Ладыгичев, В. Л. Гусовский; под ред. И. Д. Кашеева. Москва : Теплоэнергетик, 2003. 456 с.
23. Кашеев И. Д. Свойства и применение огнеупоров : справочник / И. Д. Кашеев. Москва : Теплотехник, 2004. 351 с.

24. Огнеупоры : материалы, изделия, свойства и применение : в 2 кн. / под ред. И. Д. Кашеева. 2-е изд., доп. Москва : Теплотехник, 2004.

25. Ладыгичев М. Г. Огнеупоры для нагревательных и термических печей : справочник / М. Г. Ладыгичев, В. Л. Гусовский, И. Д. Кашеев; под ред. И. Д. Кашеева. Москва : Теплоэнергетик, 2002. 231 с.

26. Кашеев И. Д. Химическая технология огнеупоров : учебное пособие / И. Д. Кашеев. Москва : Интермет Инжиниринг, 2007. 752 с.

27. Кашеев И. Д. Оксидноуглеродистые огнеупоры / И. Д. Кашеев. Москва : Интермет Инжиниринг, 2000. 265 с.

28. Хорошавин Л. Б. Магнезиальные огнеупоры : справочник / Л. Б. Хорошавин, В. А. Перепелицын, В. А. Кононов. Москва : Интермет Инжиниринг, 2001. 576 с.

29. Хорошавин Л. Б. Шпинелидные наноогнеупоры / Л. Б. Хорошавин. Екатеринбург : УрО РАН, 2009. 593 с.

30. Хорошавин Л. Б. Форстерит $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$ / Л. Б. Хорошавин. Москва : Теплотехник, 2004. 368 с.

31. Демиденко Л. М. Электропроводность огнеупорных материалов / Л. М. Демиденко, Ю. А. Полонский. Москва : Металлургия, 1985. 120 с.

32. Перепелицын В. А. Основы технической минералогии и петрографии / В. А. Перепелицын. Москва : Недра, 1987. 256 с.

33. Сиваш В. Г. Плавленый периклаз / В. Г. Сиваш, В. А. Перепелицын, Н. А. Митюшов. Екатеринбург : Уральский рабочий, 2001. 584 с.

34. Техногенное минеральное сырье Урала / В. А. Перепелицын [и др.]. Екатеринбург : РИО УрО РАН, 2013. 332 с.

35. Пивинский Ю. Е. Неформованные огнеупоры : справочник. В 2 т. Т. 1. Кн. 1. Общие вопросы технологии / Ю. Е. Пивинский. Москва : Теплоэнергетик, 2003. 447 с.

36. Пивинский Ю. Е. Избранные труды. В 3 т. Т. 2. Керамические и огнеупорные материалы / Ю. Е. Пивинский. Санкт-Петербург : Стройиздат, 2003. 687 с.

37. Стрелов К. К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов : учеб. пособие для студ. металлург. спец. вузов / К. К. Стрелов, И. Д. Кашеев. Москва : Металлургия, 1996. 601 с.

38. Черныш Г. И. Топливо и огнеупоры в металлургии : учеб. пособие / Г. И. Черныш, В. С. Стариков, Г. В. Самохвалов. Москва : Металлургия, 1993. 208 с.

39. Юрков А. Л. Огнеупоры и углеродные катодные материалы для алюминиевой промышленности / А. Л. Юрков. Красноярск : Бона компани, 2005. 257 с.
40. Пивинский Ю. Е. Кварцевая керамика / Ю. Е. Пивинский, А. Г. Ромашин. Москва : Металлургия, 1974. 264 с.
41. Попильский Р. Я. Прессование порошковых керамических масс / Р. Я. Попильский, Ю. Е. Пивинский. Москва : Металлургия, 1983. 176 с.
42. Пивинский Ю. Е. Керамические вяжущие и керамобетоны / Ю. Е. Пивинский. Москва : Металлургия, 1990. 269 с.
43. Пивинский Ю. Е. Кварцевая керамика и огнеупоры. В 2 т. Т. 1. Теоретические основы и технологические процессы / Ю. Е. Пивинский, Е. И. Сухдальцев. Москва : Теплоэнергетик, 2008. 672 с.
44. Пивинский Ю. Е. Кварцевая керамика и огнеупоры. В 2 т. Т. 2. Материалы, их свойства и области применения / Ю. Е. Пивинский, Е. И. Сухдальцев. Москва : Теплоэнергетик, 2008. 464 с.
45. Пивинский Ю. Е. Избранные труды. В 3 т. Т. 3. Реология дисперсных систем, ВКВС и керамобетоны. Элементы нанотехнологий в силикатном материаловедении / Ю. Е. Пивинский. Санкт-Петербург : Политехника, 2012. 682 с.
46. Алленштейн Й. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания : пер. с нем. / Й. Алленштейн. Москва : Интермет Инжиниринг, 2010. 392 с.
47. Темлянцев М. В. Огнеупоры и футеровки плавильных и литейных агрегатов алюминиевого производства / М. В. Темлянцев, Е. Н. Темлянцева. Москва : Теплотехник, 2008. 183 с.
48. Литовских Е. Я. Теплофизические свойства огнеупоров / Е. Я. Литовских, Н. А. Пучкелевич. Москва : Металлургия, 1982. 152 с.
49. Стариков В. С. Огнеупоры и футеровки в ковшевой металлургии / В. С. Стариков, М. В. Темлянцев, В. В. Темлянцев. Москва : Изд-во МИСиС, 2003. 328 с.

Приложение 1

Типоразмеры огнеупорных изделий формата «мини-кей»

марка	размер, мм				марка	размер, мм			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>h</i>		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>h</i>
4/0	150,00	150,00	101,60	100,00	5/0	150,00	150,00	127,00	100,00
4/4	152,00	148,00	101,60	100,00	5/4	152,00	148,00	127,00	100,00
4/6	153,00	147,00	101,60	100,00	5/6	153,00	147,00	127,00	100,00
4/8	154,00	146,00	101,60	100,00	5/8	154,00	146,00	127,00	100,00
4/10	155,00	145,00	101,60	100,00	5/10	155,00	145,00	127,00	100,00
4/12	156,00	144,00	101,60	100,00	5/12	156,00	144,00	127,00	100,00
4/16	158,00	142,00	101,60	100,00	5/16	158,00	142,00	127,00	100,00
4/20	160,00	140,00	101,60	100,00	5/20	160,00	140,00	127,00	100,00
4/20 120к	130,00	110,00	101,60	100,00	5/20 120к	130,00	110,00	127,00	100,00
4/25	162,50	137,50	101,60	100,00	5/25	162,50	137,50	127,00	100,00
4/30	165,00	135,00	101,60	100,00	5/30	165,00	135,00	127,00	100,00
4/40	170,00	130,00	101,60	100,00	5/40	170,00	130,00	127,00	100,00
4/70	185,00	115,00	101,60	100,00	5/60	180,00	120,00	157,00	100,00
4/60	180,00	120,00	101,60	100,00	5/70	185,00	115,00	127,00	100,00
4/80	190,00	110,00	101,60	100,00	5/80	190,00	110,00	127,00	100,00
6/0	150,00	150,00	152,40	100,00	7/0	150,00	150,00	177,80	100,00
6/4	152,00	148,00	152,40	100,00	7/4	152,00	148,00	177,80	100,00
6/6	153,00	147,00	152,40	100,00	7/6	153,00	147,00	177,80	100,00
6/8	154,00	146,00	152,40	100,00	7/8	154,00	146,00	177,80	100,00
6/10	155,00	145,00	152,40	100,00	7/10	155,00	145,00	177,80	100,00
6/12	156,00	144,00	152,40	100,00	7/12	156,00	144,00	177,80	100,00
6/16	158,00	142,00	152,40	100,00	7/16	158,00	142,00	177,80	100,00
6/20	160,00	140,00	152,40	100,00	7/20	160,00	140,00	177,80	100,00
6/20 120 к	130,00	110,00	152,40	100,00	7/20 120к	130,00	110,00	177,80	100,00
6/25	162,50	137,50	152,40	100,00	7/25	162,50	137,50	177,80	100,00
6/30	165,00	135,00	152,40	100,00	7/30	165,00	135,00	177,80	100,00
6/40	170,00	130,00	152,40	100,00	7/40	170,00	130,00	177,80	100,00
6/60	180,00	120,00	152,40	100,00	7/60	180,00	120,00	177,80	100,00
6/70	185,00	115,00	152,40	100,00	7/70	185,00	115,00	177,80	100,00
6/80	190,00	110,00	152,40	100,00	7/80	190,00	110,00	177,80	100,00

марка	размер, мм				марка	размер, мм			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>h</i>		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>h</i>
8/0	150,00	150,00	203,20	100,00	9/0	150,00	150,00	228,60	100,00
8/4	152,00	148,00	203,20	100,00	9/4	152,00	148,00	228,60	100,00
8/6	153,00	147,00	203,20	100,00	9/6	153,00	147,00	228,60	100,00
8/8	154,00	146,00	203,20	100,00	9/8	154,00	146,00	228,60	100,00
8/10	155,00	145,00	203,20	100,00	9/10	155,00	145,00	228,60	100,00
8/12	156,00	144,00	203,20	100,00	9/12	156,00	144,00	228,60	100,00
8/16	158,00	142,00	203,20	100,00	9/16	158,00	142,00	228,60	100,00
8/20	160,00	140,00	203,20	100,00	9/20	160,00	140,00	228,60	100,00
8/20 120 к	130,00	110,00	203,20	100,00	9/20 120 к	130,00	110,00	228,60	100,00
8/25	162,50	137,50	203,20	100,00	9/25	162,50	137,50	228,60	100,00
8/30	165,00	135,00	203,20	100,00	9/30	165,00	135,00	228,60	100,00
8/40	170,00	130,00	203,20	100,00	9/40	170,00	130,00	228,60	100,00
8/60	180,00	120,00	203,20	100,00	9/60	180,00	120,00	228,60	100,00
8/70	185,00	115,00	203,20	100,00	9/70	185,00	115,00	228,60	100,00
8/80	190,00	110,00	203,20	100,00	9/80	190,00	110,00	228,60	100,00
15/0	150,00	150,00	150,00	100,00	20/0	150,00	150,00	200,00	100,00
15/4	152,00	148,00	150,00	100,00	20/4	152,00	148,00	200,00	100,00
15/6	153,00	147,00	150,00	100,00	20/6	153,00	147,00	200,00	100,00
15/8	154,00	146,00	150,00	100,00	20/8	154,00	146,00	200,00	100,00
15/10	155,00	145,00	150,00	100,00	20/10	155,00	145,00	200,00	100,00
15/12	156,00	144,00	150,00	100,00	20/12	156,00	144,00	200,00	100,00
15/16	158,00	142,00	150,00	100,00	20/16	158,00	142,00	200,00	100,00
15/20	160,00	140,00	150,00	100,00	20/20	160,00	140,00	200,00	100,00
15/20 120 к	130,00	110,00	150,00	100,00	20/20 120 к	130,00	110,00	200,00	100,00
15/25	162,50	137,50	150,00	100,00	20/25	162,50	137,50	200,00	100,00
15/30	165,00	135,00	150,00	100,00	20/30	165,00	135,00	200,00	100,00
15/40	170,00	130,00	150,00	100,00	20/40	170,00	130,00	200,00	100,00
15/60	180,00	120,00	150,00	100,00	20/60	180,00	120,00	200,00	100,00
15/70	185,00	115,00	150,00	100,00	20/70	185,00	115,00	200,00	100,00
15/80	190,00	110,00	150,00	100,00	20/80	190,00	110,00	200,00	100,00
23/0	150,00	150,00	230,00	100,00	25/0	150,00	150,00	250,00	100,00
23/4	152,00	148,00	230,00	100,00	25/4	152,00	148,00	250,00	100,00
23/6	153,00	147,00	230,00	100,00	25/6	153,00	147,00	250,00	100,00
23/8	154,00	146,00	230,00	100,00	25/8	154,00	146,00	250,00	100,00
23/10	155,00	145,00	230,00	100,00	25/10	155,00	145,00	250,00	100,00
23/12	156,00	144,00	230,00	100,00	25/12	156,00	144,00	250,00	100,00
23/16	158,00	142,00	230,00	100,00	25/16	158,00	142,00	250,00	100,00
23/20	160,00	140,00	230,00	100,00	25/20	160,00	140,00	250,00	100,00
23/20 120 к	130,00	110,00	230,00	100,00	25/20 120 к	130,00	110,00	250,00	100,00
23/25	162,50	137,50	230,00	100,00	25/25	162,50	137,50	250,00	100,00
23/30	165,00	135,00	230,00	100,00	25/30	165,00	135,00	250,00	100,00
23/40	170,00	130,00	230,00	100,00	25/40	170,00	130,00	250,00	100,00
23/60	180,00	120,00	230,00	100,00	25/60	180,00	120,00	250,00	100,00
23/70	185,00	115,00	230,00	100,00	25/70	185,00	115,00	250,00	100,00
23/80	190,00	110,00	230,00	100,00	25/80	190,00	110,00	250,00	100,00

Приложение 2

Содержание и объем курсовой работы

Курсовая работа как итоговая работа по курсу «Служба огнеупоров» должна помочь обучающемуся закрепить навыки выбора и проектирования футеровки теплового агрегата и должна состоять из расчетно-аналитической пояснительной записки объемом 25–40 страниц и чертежа футеровки теплового агрегата на листе формата А3–А2 (А1).

Задание на курсовую работу предусматривает анализ условий эксплуатации футеровки одного из тепловых агрегатов при производстве заданного материала (сталь, цветной металл, стекломасса и т. п.) с определением разрушающих факторов и их активности, выбор типа огнеупорного материала для рабочего и теплоизоляционного слоев футеровки на основании физико-химических закономерностей, разработку дизайна рабочего слоя футеровки (выбор типоразмеров изделий, расчет раскладки изделий в футеровке), оценку тепловой эффективности разработанной футеровки на основе математической модели тепловых потерь через многослойную футеровку и расчет графика разогрева футеровки теплового агрегата на основании анализа теорий термостойкости огнеупорных изделий.

Графическая часть состоит из чертежа элемента рабочего слоя футеровки и графика разогрева футеровки теплового агрегата.

Рекомендуется следующий порядок расположения материала в расчетно-аналитической записке.

1. Титульный лист.
2. Задание.
3. Аннотация.
4. Содержание.
5. Введение.
6. Описание технологического процесса производства материала в заданном тепловом агрегате:

- 1) описание технологического процесса;
- 2) описание конструкции теплового агрегата;
- 3) анализ разрушающих факторов, действующих на футеровку;
- 4) выбор материала для рабочего слоя футеровки;
- 5) анализ термомеханических свойств выбранного огнеупорного материала.
7. Проектирование многослойной футеровки теплового агрегата.
 - 1) выбор материалов для арматурного и теплоизоляционных слоев футеровки;
 - 2) оценка эффективной теплопроводности футеровки;
 - 3) проверка правильности выбора материалов для арматурного и теплоизоляционных слоев футеровки.
8. Расчет раскладки и количества изделий для рабочего слоя футеровки.
9. Расчет допустимых скоростей нагрева футеровки.
10. Заключение.
11. Список использованной литературы.

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
1. ТЕПЛОВЫЕ АГРЕГАТЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	4
1.1. Классификация промышленных печей	7
1.2. Конструктивные элементы печей. Общие сведения	9
1.2.1. Фундаменты	9
1.2.2. Каркасы промышленных печей	12
1.2.3. Топливосжигающие устройства	13
1.3. Огнеупорные футеровочные работы	18
1.3.1. Основные правила огнеупорной кладки	19
1.3.2. Кладка арок и сводов	21
1.3.3. Кладка выстилок, подин и откосов	26
1.3.4. Футеровка цилиндрических трубопроводов	28
1.3.5. Расчет радиальной кладки из огнеупорных изделий	28
1.3.6. Монолитные футеровки	33
1.4. Технология выполнения многослойных футеровок	44
Принудительно охлаждаемые ограждения	47
2. ФУТЕРОВКА ОСНОВНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ АГРЕГАТОВ	52
2.1. Комплекс доменной печи	52
Общие сведения об устройстве доменной печи	52
Футеровка элементов комплекса доменной печи	54
Воздухонагреватели	59
2.2. Плавилисьные печи металлургии	61

2.2.1. Мартеновские печи.....	61
2.2.2. Электросталеплавильные печи	64
2.2.3. Ферросплавные печи	67
2.2.4. Сталеплавильный конвертер.....	68
2.3. Миксеры	70
Чугуновозные ковши миксерного типа.....	70
2.4. Сталеразливочные ковши	71
2.5. Нагревательные печи	72
Условия службы огнеупоров в футеровках нагревательных печей	74
2.6. Термические печи	74
2.7. Вращающиеся печи	75
2.7.1. Общие конструктивные характеристики печей	76
2.7.2. Вращающиеся печи для получения цементного клинкера	78
2.8. Стекловаренные печи	81
2.8.1. Назначение и устройство.....	81
2.8.2. Условия службы огнеупоров и требования к их качеству	83
2.9. Коксовая батарея.....	85
2.9.1. Устройство и принцип работы коксовых батарей	85
2.9.2. Условия службы огнеупоров и требования к их качеству	88
3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУТЕРОВКИ ТЕПЛООВОГО АГРЕГАТА.....	90
3.1. Технологический процесс производства продукта.....	90
3.1.1. Технология работы агрегата	90
3.1.2. Конструкция теплового агрегата.....	91
3.1.3. Разрушающие факторы, действующие на футеровку.....	91
3.2. Проектирование многослойной футеровки.....	121

3.2.1. Выбор огнеупорных и теплоизоляционных материалов для арматурного и теплоизоляционных слоев огнеупорной футеровки	122
3.2.2. Оценка эффективной теплопроводности многослойной футеровки	124
3.2.3. Алгоритм расчета теплопередачи через непроницаемые стенки	144
4. РАСЧЕТ РАСКЛАДКИ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ В РАБОЧЕМ СЛОЕ ФУТЕРОВКИ	151
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	160
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Типоразмеры огнеупорных изделий формата «мини-кей»	164
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Содержание и объем курсовой работы.....	166

Учебное издание

Земляной Кирилл Геннадьевич

СЛУЖБА ОГНЕУПОРОВ

Редактор *Т. Е. Мери*
Верстка *Е. В. Ровнушкиной*

Подписано в печать 14.08.2018. Формат 70×100 1/16.
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 13,9.
Уч.-изд. л. 8,6. Тираж 50 экз. Заказ 209.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>

