

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Машины и технология литейного производства»

ПЕЧИ ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ

Пособие

для студентов специальности

6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование
и производство материалов и изделий из них»
профилизаций «Машины и технология литейного производства»,
«Аддитивные технологии в литейном производстве»

В 2 частях

Часть 1

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области металлургического оборудования и технологий*

Минск
БНТУ
2025

УДК 621.74
ББК 34.61
С42

С о с т а в и т е л и:

М. А. Садоха, С. Л. Ровин, Ф. И. Рудницкий

Р е ц е н з е н т ы:

декан факультета повышения квалификации и переподготовки
учреждения образования «Государственный институт повышения квалификации
и переподготовки кадров в области газоснабжения «ГАЗ-ИНСТИТУТ»,

канд. техн. наук, доцент *В. А. Стасюлевич*;
начальник научной лаборатории ОАО «МТЗ»,
канд. техн. наук *С. А. Куликов*

Печи литейных цехов : пособие для студентов специальности 6-05-0714-03
С42 «Инженерно-техническое проектирование и производство материалов и изделий из них» профилизаций «Машины и технология литейного производства», «Аддитивные технологии в литейном производстве»: в 2 ч. / сост.: М. А. Садоха, С. Л. Ровин, Ф. И. Рудницкий – Минск : БНТУ, 2025. – Ч. 1. – 71 с.

Пособие разработано в соответствии с учебной программой по дисциплине «Печи литейных цехов», содержит описание и конструктивные особенности печей, используемых в литейном производстве, основы теплофизических расчетов, сведения о видах топлива, процессах горения, информацию об огнеупорных и футеровочных материалах. Пособие предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование и производство материалов и изделий из них» по профилизациям «Машины и технология литейного производства» и «Аддитивные технологии в литейном производстве».

УДК 621.74
ББК 34.61

ISBN 978-985-31-0082-2
ISBN 978-985-31-0083-9 (Ч. 1)

© Белорусский национальный
технический университет, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТОПЛИВА	6
1.1. Классификация технологического топлива и основные требования, предъявляемые к нему	6
1.2. Основные теплотехнические характеристики технологического топлива	9
2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ И РАСЧЕТЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА	11
2.1. Характеристика процессов горения	11
2.2. Тепловая теория горения	13
2.3. Цепная теория горения	16
3. ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПЕЧНЫХ ГАЗОВ	20
3.1. Статика и динамика газов. Понятие о механике газов	20
3.2. Определение давлений	22
3.3. Уравнение Бернулли. Связь между давлениями	24
3.4. Определение потерянного давления	25
3.5. Истечение газов через отверстия	26
3.6. Движение газов в печах и сушилах. Струйное движение газов	31
3.7. Движение газов в рабочем пространстве печей и сушил	34
3.8. Устройства для создания тяги в печных агрегатах	35
3.9. Понятие о теории подobia	37
4. ОСНОВЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ.	40
4.1. Общие сведения	40
4.2. Теплопроводность	42
4.2.1. Теплопроводность плоской однослойной стенки	42
4.2.2. Теплопроводность плоской многослойной стенки	43
4.3. Конвекция	44
4.3.1. Конвекция при свободном движении	44
4.3.2. Конвекция при вынужденном движении	45
5. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА ИЗЛУЧЕНИЕМ В ПЕЧАХ	47
5.1. Основные законы теплового излучения	48

6. ОГНЕУПОРНЫЕ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ	
МАТЕРИАЛЫ	51
6.1. Классификация огнеупорных материалов.	51
6.2. Кремнеземистые огнеупорные материалы	56
6.3. Алумосиликатные огнеупорные материалы	59
6.4. Магнезиальные огнеупорные материалы	63
6.5. Магнезиально-известковые огнеупорные материалы	64
6.6. Магнезиально-шпинелидные огнеупорные материалы	65
6.7. Углеродистые огнеупорные материалы	66
6.8. Карбидокремниевые огнеупорные материалы	67
6.9. Цирконистые огнеупорные материалы	68
6.10. Легковесные огнеупорные материалы	69
6.11. Огнеупорные бетоны и растворы	69
ЛИТЕРАТУРА	71

ВВЕДЕНИЕ

Литейное производство играет ключевую роль в машиностроении, предоставляя возможность придавать металлу нужную форму и производя изделия от нескольких грамм до сотен тонн. Доля литых деталей составляет до 70 % массы изделий машиностроения, включая металлорежущие станки и двигатели внутреннего сгорания.

В литейных цехах используются различные оборудования, такие, как высокопроизводительные вагранки, дуговые и индукционные печи, миксеры и раздаточные устройства. Часть отливок после получения подвергается термической обработке в печах, а материалы предварительно сушатся в сушилах.

Печи в литейных цехах могут быть плавильными, нагревательными и сушильными, в зависимости от их назначения. Для обеспечения современных технологических процессов тепловой обработки, которые проводятся в печах, необходимо учитывать ряд факторов:

- основные положения и законы нагрева различных материалов, включая изменение их агрегатного состояния;
- технологические и энергетические задачи, которые должны решаться в печах литейных цехов;
- характеристики современных печей, их параметры и технологические возможности;
- основы тепловой работы печей и зависимость их конструктивно-технологических схем от поставленных задач;
- конструкции печей и их систем, используемые материалы для строительства и эксплуатации;
- положения, требования и правила эксплуатации печного хозяйства.

Современные плавильные и нагревательные печи характеризуются высокой степенью механизации и автоматизации. Важным аспектом остается вопрос повышения экономичности работы печей всех типов.

1. ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТОПЛИВА

Современная структура потребления топливно-энергетических ресурсов представлена следующим образом: на освещение приходится около 0,5 %, на силовые процессы – примерно 25 %, на высокотемпературные процессы (свыше 673 К) – также около 25 %, а на средне- и низкотемпературные процессы (от 423 до 673 К и от 373 до 423 К соответственно) – около 49,5 %. Освещение и силовые процессы требуют электроэнергии, а высокотемпературные процессы, включая тепловую обработку материалов в литейном производстве, требуют технологического топлива, электроэнергии и пара.

В настоящее время доля технологического топлива в высокотемпературных процессах литейного производства постепенно уменьшается, уступая место электроэнергии.

К электрической энергии как к источнику тепловой энергии предъявляются основные требования по трем параметрам: напряжению (для обеспечения его постоянства), подводимой мощности (для обеспечения необходимого объема) и частоте (для обеспечения постоянства частоты тока).

1.1. Классификация технологического топлива и основные требования, предъявляемые к нему

Технологическим топливом называется горючее вещество, которое при сжигании в воздухе выделяет значительное количество тепловой энергии. К технологическому топливу предъявляются следующие требования:

- достаточное распространение в природе и низкие затраты на добычу;
- отсутствие выделения при сжигании вредных и ядовитых веществ, опасных для здоровья людей и окружающей среды;
- легкость сжигания и возможность регулирования процесса горения.

По агрегатному состоянию топливо подразделяется на *твердое, жидкое и газообразное*. По происхождению оно может быть естественным или искусственным.

Естественное топливо используется в том виде, в котором оно находится в природе. В настоящее время естественное топливо широко применяется в промышленности, хотя оно также является уникальным и невозобновляемым сырьем для других отраслей, таких, как химическая, нефтехимическая и фармацевтическая.

Однако непосредственное сжигание естественного топлива не всегда целесообразно из-за различных причин, поэтому широко используются методы его переработки. Продуктом такой переработки является искусственное топливо.

Основные виды технологического топлива, применяемые в промышленности, представлены в табл. 1.1 [1–3].

Таблица 1.1

Классификация топлива
по агрегатному состоянию и происхождению

Агрегатное состояние	Происхождение	
	естественное	искусственное
Твердое	Дрова, торф, бурый уголь, каменный уголь, антрацит, горючие сланцы	Древесный уголь, кокс, полукокс, брикеты, термоантрацит
Жидкое	Нефть	Бензин, керосин, мазут и другие продукты переработки нефти, спирт, каменноугольная смола и др.
Газообразное	Природный и нефтепромысловые газы	Газы: коксовый, доменный, светильный, водяной, генераторный, нефтезаводской и др.

Самый древний вид топлива – дрова. В настоящее время дрова используются в промышленности очень ограниченно.

Нефть как топливо применяется со второй половины XIX века. В настоящее время нефть является одним из важнейших ископаемых. Нефть в основном напрямую не сжигают. Ее используют для изготовления искусственных топлив: мазута, керосина и т. п.

С древнейших времен в металлургии в качестве топлива применялся древесный уголь, однако появившийся в более позднее время кокс вытеснил его.

В последнее время очень широкое применение получили природные газы. Увеличивается добыча каменного угля. При этом значительно увеличивается добыча углей, годных для коксования.

Кокс и термоантрацит в основном используются при плавке чугуна в вагранках.

Природный газ нашел самое большое распространение в сушильных и нагревательных (термических) печах, а также в плавильных печах для производства алюминиевых и медных сплавов.

Из жидких топлив наибольшее распространение получил мазут. Он по некоторым показателям превосходит другие топлива, в т. ч. и природный газ. Очень часто его используют в качестве резервного для печей, работающих на природном газе. В целом ряде случаев работа на комбинированном газо-мазутном топливе оказывается экономически более выгодной, чем на одном газообразном.

Все виды топлива характеризуются своим составом, т. е. содержанием горючих и негорючих составляющих. Негорючие составляющие называются балластом топлива.

Элементарный состав жидкого и твердого топлива.

Как горючие, так и негорючие составляющие жидкого или твердого топлив находятся в различных, часто сложных, химических соединениях. Поэтому для удобства определения горючих составляющих жидкого или твердого топлива расчет производят по их элементарному составу. В полном виде элементарный состав жидкого или твердого топлива описывается уравнением массы рабочего топлива (рабочего – означает с учетом балласта и влажности):

$$C^p + H^p + O^p + S^p + N^p + V^p + A^p + W^p + P^p = 100 \%,$$

где C^p ; H^p ; O^p ; S^p ; N^p – содержание (по массе) соответствующих химических элементов в топливе (%);

V^p ; A^p ; W^p ; P^p – содержание (по массе) летучих, золы, влаги и пыли соответственно (%).

Состав газообразного топлива.

Состав газообразного топлива определяют по концентрации химических составляющих, как горючих, так и балласта. Очень часто концентрацию составляющих газообразного топлива выражают в объемных процентах (объемн. %), приведенных к нормальному состоянию. Так, для природного газа состав рабочего топлива описывается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} & \text{CH}_4^p + \sum C_n \text{H}_m^p + \text{H}_2^p + \text{CO}^p + \text{CO}_2^p + \text{N}_2^p + \text{O}_2^p + \\ & + \text{SO}_2^p + \text{H}_2\text{O}^p + \text{NO}_x^p = 100 (\text{объемн. \%}) \end{aligned}$$

где CH_4^p и $\sum C_n \text{H}_m^p$ – содержание (по объему) метана и других углеводородов в рабочем топливе (объемн. %);

H_2^p ; CO^p ; CO_2^p ; N_2^p ; O_2^p ; SO_2^p ; H_2O^p ; NO_x^p – содержание различных газообразных составляющих рабочего топлива (объемн. %).

1.2. Основные теплотехнические характеристики технологического топлива

Ценность топлива определяется следующими характеристиками: теплотворной способностью или теплотой сгорания; жаропроизводительностью; температурой воспламенения; удобством сжигания; содержанием вредных примесей.

Кроме этого, технологическое топливо может характеризоваться следующими параметрами: температурой вспышки; реакционной способностью; расходом воздуха на горение; пределом воспламенения; плотностью; пористостью; вязкостью; температурой застывания; размерами кусков или дисперсностью частиц.

Теплотворная способность топлива.

Теплотворная способность топлива $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \right)$ – это макси-

мальное количество теплоты, которое может выделяться при полном сжигании 1 кг или 1 м³ топлива в холодном воздухе ($T_{\text{в}} = 273 \text{ К}$). От теплотворной способности зависит расход топлива на проведение заданной тепловой обработки материала в печи. Различают высшую и низшую теплотворную способность. Их значения зависят от содержания влаги в топливе.

Высшая теплотворная способность ($Q_{\text{в}}^p$) – это максимальное количество теплоты, выделенной при полном сгорании топлива с образованием воды.

Низшая теплотворная способность ($Q_{\text{н}}^p$) – это максимальное количество выделенной теплоты при полном сжигании топлива

с учетом поглощения теплоты на парообразование. При парообразовании происходит поглощение теплоты в количестве 2 512 кДж/кг (H_2O).

Низшая теплотворная способность топлива более реальна. В данном случае процесс должен происходить без конденсации влаги, а продукты сгорания должны выходить из печи с температурой не менее 373 К (273 °С).

При нормальных физических условиях Q_{H}^{P} и Q_{B}^{P} связаны между собой следующим выражением:

$$Q_{\text{H}}^{\text{P}} = Q_{\text{B}}^{\text{P}} - q_{\text{H}_2\text{O}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}},$$

где $q_{\text{H}_2\text{O}}$ – удельная теплота испарения влаги ($q = 2\,512$ кДж/кг);

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ – удельное содержание влаги в продуктах сгорания, полученных при сжигании 1 м³ или 1 кг топлива, приведенное к нормальным условиям (кг/м³; кг/кг).

Содержание балласта уменьшает теплотворную способность топлива и, соответственно, его жаропроизводительность. В газообразном топливе в качестве балласта чаще всего встречаются H_2O , N_2 и CO_2 . В жидком топливе – H_2O и сернистые соединения. В твердом топливе – вода, различные минеральные твердые и летучие соединения, оксиды и т. д. Летучая часть балласта топлива переходит в продукты сгорания, а твердая – образует золу при сжигании. Поэтому жидкие и твердые топлива характеризуются такими параметрами, как содержание влаги (W^{P}) и летучих (V^{P}), а также значением зольности (A^{P}).

2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ И РАСЧЕТЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

2.1. Характеристика процессов горения

Быстрое окисление топлива, сопровождаемое выделением большого количества теплоты и получением высокой температуры продуктов сжигания, называется горением топлива [1–3].

Процессы горения состоят из двух основных стадий: смешение топлива с воздухом (окислителем), горение топлива. В процессе горения образуется пламя, в котором протекают реакции горения составляющих топлива и выделение теплоты.

Процессы горения разделяют на гомогенные, гетерогенные и промежуточные. *Гомогенное* горение является характерным для газообразного топлива. *Гетерогенное* горение свойственно горению твердого топлива. Оно происходит на его поверхности. Примером *промежуточного* горения может служить горение жидкого топлива. При этом происходит его испарение и крекинг. Образуется трехфазная система: газы, жидкость (капли) и твердый остаток. Горение образовавшихся газов имеет гомогенный характер, а горение жидкости и твердого остатка – гетерогенный.

Горение является совокупностью одновременно протекающих процессов (физических и химических), влияющих на его интенсивность и характер. К этим процессам в первую очередь относятся: измельчение топлива; нагрев топлива до температуры воспламенения; термическое разложение и частичная газификация топлива; смешение топлива с воздухом или кислородом, необходимым для горения; окисление горючих составляющих топлива; удаление продуктов горения; теплообмен в зоне горения и с окружающей средой.

Гомогенное горение может протекать в кинетической и диффузионной областях. При кинетическом горении полное перемешивание топлива с воздухом осуществляется предварительно, и в зону горения попадает заранее подготовленная топливовоздушная смесь. При этом скорость реакции окисления топлива определяется скоростью горения. При диффузионном горении процессы перемешивания и горения не разделяются и протекают практически одновременно. В этом случае определяющую роль играет скорость процесса перемешивания топлива с воздухом, так как время перемешивания значительно больше времени, необходимого для протекания химических

реакций окисления. Таким образом, полное время протекания процесса при кинетическом горении практически равно времени собственно горения. При диффузионном горении полное время протекания процесса горения практически равно времени перемешивания.

При гетерогенном горении твердого топлива также различают кинетическую и диффузионную области. Кинетическая область имеет место в том случае, когда скорость диффузии в порах твердого топлива, т. е. скорость перемешивания, значительно больше скорости реакций собственного горения. Диффузионная область возникает в том случае, когда скорость диффузии значительно меньше скорости реакции горения. Пламя возникает только после достижения необходимого контакта между молекулами топлива и окислителя.

Следует отметить, что реакции горения достаточно хорошо изучены и известно, что они протекают с большой скоростью. На скорость реакций горения влияют концентрации реагирующих веществ, интенсивность газообмена, температура, давление, величина поверхности соприкосновения топлива с воздухом, присутствие катализаторов реакций горения.

В печах литейного производства топливо сжигают тремя основными методами, которые отличаются друг от друга по способам образования топливовоздушной смеси и аэродинамической структуре потоков. Сюда входят *факельное*, *вихревое* и *слоевое* горение. *Факельное* горение имеет место при сжигании газообразного, жидкого или твердого топлива, подаваемого в печное пространство в смеси с воздухом. При сжигании газообразного топлива возможна подача в печное или топочное пространство готовой газовой смеси. Факельное горение является основным методом сжигания топлива в пламенных печах литейных цехов.

Вихревое горение эффективно применяют для сжигания дробленых сортов каменного угля и для сжигания жидкого топлива. Вихревое движение позволяет резко повысить интенсивность перемешивания топливовоздушной смеси по сравнению с факельным горением и позволяет осуществлять сжигание топлива в меньших топочных объемах.

Слоевое горение является основным методом сжигания твердого топлива в шахтных печах (вагранках). Процессы и закономерности, имеющие место при горении топлива, объясняются теорией горения, основные положения которой рассмотрим далее.

2.2. Тепловая теория горения

Тепловая теория объясняет процесс горения с точки зрения теплового состояния процесса. Воспламенение и горение топлива зависит от процессов выделения и потерь теплоты. Воспламенение топлива наступает тогда, когда количество теплоты, выделяющейся при окислении топлива, равно или больше количества теплотоперь во внешнюю среду. Соответствующая этому температура называется температурой воспламенения топлива (рис. 2.1).

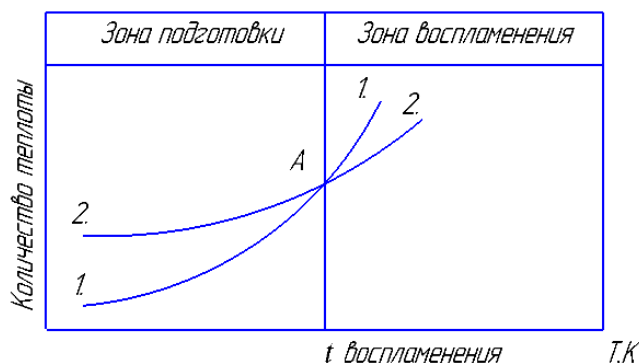


Рис. 2.1. Воспламенение топлива согласно тепловой теории

Изменение тепловыделения соответствует кривой 1, а изменение теплотоперь — кривой 2. В зоне подготовки воспламенения топлива температура его постепенно возрастает, но воспламенение не наступает, поскольку значительная часть теплоты теряется во внешнюю среду. В точке A система переходит в тепловое равновесие. Приход теплоты становится равным расходу, в результате чего создаются условия для воспламенения топлива. Воспламенение представляет собой мгновенно протекающий процесс, который может произойти при подводе некоторого излишка теплоты, т. е. при зажигании или самовоспламенении. В зависимости от конкретных условий кривые 1 и 2 могут быть самых различных форм. Следовательно, температура воспламенения не является физической или химической константой. Она только характеризует момент перехода от медленного протекания реакций окисления топлива к быстрому.

Согласно тепловой теории, процесс горения, начавшийся в результате местного воспламенения, распространяется в топливовоздушной смеси за счет передачи теплоты теплопроводностью от нагрева продуктов горения. Схема распространения горения в газозвушной смеси согласно тепловой теории показана на рис. 2.2.

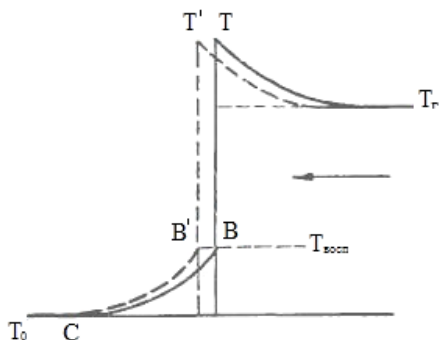


Рис. 2.2. Схема распространения горения в газозвушной среде

По вертикальной оси отложены значения температуры, а по горизонтальной – движение фронта горения в направлении, указанном стрелкой. Тепловое состояние слоя газозвушной смеси, прилежащего к зоне горения, изображено сплошной линией. Отрезок этой линии АВ в определенный период времени представляет собой поверхность горения газозвушной смеси. Холодные слои смеси, расположенные слева от линии АВ, нагреваются от температуры T_0 до температуры T воспламенения по кривой СВ. Этот нагрев происходит за счет передачи теплоты теплопроводностью от поверхности АВ.

При достижении температуры воспламенения, объем газозвушной смеси, прилегающий к поверхности АВ, воспламеняется. Температура в этом объеме мгновенно поднимается до температуры T_r (горения). Последующий отрезок времени цикл повторяется для поверхности А'В' очередного слоя смеси. На графике изображен штриховой линией.

По мере горения газозвушной смеси, рассматриваемый график как бы передвигается с определенной скоростью по направлению стрелки. Скорость перемещения фронта горения смеси называется скоростью распространения пламени. Эта скорость зависит от теп-

ловых свойств газовой смеси. Она прямо пропорциональна теплоте сгорания смеси и ее теплопроводности и обратно пропорциональна теплоемкости.

Большое влияние на скорость распространения пламени оказывает избыток или недостаток воздуха в газовой смеси. В любом из приведенных случаев скорость распространения пламени снижается. В связи с этим существуют так называемые пределы концентрации горючих газов. В некоторых газовой смеси вообще не воспламеняется.

На рис. 2.3 приведены зависимости скорости распространения пламени от содержания горючих газов в газовой смеси. Как следует из приведенного рисунка, для таких газов, как H_2 и CO , существует более широкая область воспламенения по сравнению с областью для CH_4 .

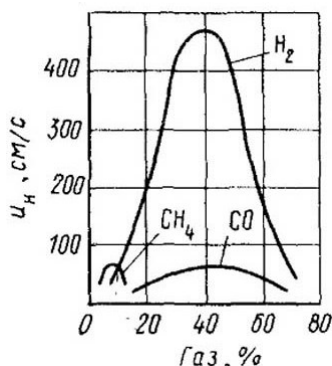


Рис. 2.3. Зависимость скорости распространения пламени от содержания горючих газов в газовых смесях

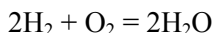
Расширение пределов воспламенения наблюдается при повышении концентрации кислорода в газовой смеси, повышении температуры и понижении давления. Добавка инертных газов к газовой смеси понижает скорость распространения пламени. Тепловая теория позволяет объяснить ряд закономерностей, имеющих место при горении топлива, однако она не может охватить все многообразие процесса горения. Поэтому была разработана цепная теория горения, которая, дополняя тепловую, объясняет процесс горения с точки зрения кинетики цепных реакций.

2.3. Цепная теория горения

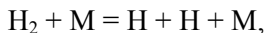
Изучение основных реакций горения показало, что действительный механизм этих реакций не соответствует простейшим химическим уравнениям, которыми они описываются.

Цепная теория дает возможность более полно понимать процесс горения. Согласно этой теории, механизм большинства гомогенных реакций, таких, как горение водорода, оксида углерода, метана и др., является цепным. В цепных реакциях ведущую роль играют активные промежуточные реакции, регенерируемые к концу каждого цикла. В качестве активных частиц промежуточных продуктов, возбуждающих цепное развитие, служат молекулы, которые обладают повышенным запасом тепловой или химической энергии, типа перекисей, и ненасыщенные молекулы в виде свободных атомов О, Н и радикалов типа гидроксила ОН. Доказательством важной роли активных частиц служат результаты спектроскопических опытов, показавших, что концентрация Н и ОН в пламени в несколько раз превышает концентрацию, обусловленную термической диссоциацией водяного пара при соответствующей температуре.

Для примера рассмотрим процесс горения водорода. Подробное исследование процесса горения водорода показывает, что реакция:

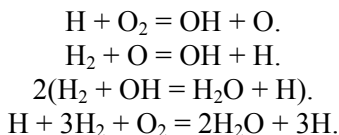


является лишь суммарной реакцией, которая описывает довольно сложную совокупность многих реакций. Необходимым первоначальным условием горения является процесс обычной термической диссоциации молекулы водорода.



где М – поверхность металла или огнеупора.

Затем идет последовательная цепь реакций с участием атомов водорода, кислорода и радикалов.



Таким образом, после завершения одного звена цепи каждый начальный атом водорода приводит к образованию трех новых атомов водорода (рис. 2.4).

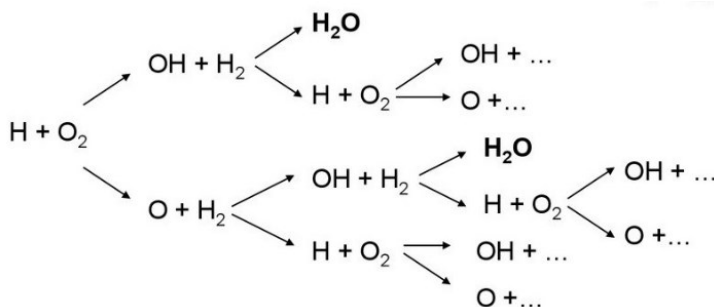


Рис. 2.4. Схема цепной реакции горения водорода

$\text{H} + \text{O}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{O}$ – необходимая энергия активации 75 кДж/моль;

$\text{O} + \text{H}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{H}$ – необходимая энергия активации 25 кДж/моль;

$\text{OH} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$ – необходимая энергия активации 75 кДж/моль.

Итоговое балансовое уравнение $\text{H} + 3\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 3\text{H} + 2\text{H}_2\text{O}$, т. е. вместо одного H появляются три, поэтому реакция самоускоряется со временем.

Исследование горения оксида углерода показало, что совершенно сухой оксид не горит в смеси с воздухом даже при нагреве газовой смеси до 1 400 °С. Горение оксида углерода возможно лишь при наличии небольших количеств водорода или водяного пара.

Горение твердых топлив.

Процессы горения твердых топлив относятся к гетерогенным процессам, и их делят на следующие стадии:

- подогрев и подсушка;
- тепловое разложение с выделением летучих и образованием коксового остатка;
- горение летучих;
- горение коксового остатка.

Летучие вещества играют важную роль при горении твердого топлива. Они выделяются из топлива при сравнительно невысоких температурах, перемешиваются с воздухом и воспламеняются первыми. Теплота, выделяемая при горении летучих, способствует по-

вышению температуры и дальнейшему развитию процесса горения. Горение углерода начинается уже после завершения выхода летучих, так как до этого кислород расходуется на горение летучих и не поступает к поверхности твердых частиц. Поэтому горение самого углерода длится дольше, и именно оно определяет время протекания всего процесса горения.

Горение жидких топлив.

Жидкие топлива сжигают в распыленном состоянии. Процесс сжигания жидкого топлива состоит из следующих частей:

- распыление;
- перемешивание с воздухом;
- подогрев и испарение;
- воспламенение;
- горение капли жидкого топлива.

Распыленное топливо, оказавшись в зоне высокой температуры, начинает испаряться. Около поверхности капли образуется паровоздушная смесь, которая воспламеняется первой. Испарение происходит тем интенсивнее, чем меньше размеры капли топлива, т. е. чем больше оно распылено.

Горение газообразных топлив.

После наступления воспламенения пламя распространяется за счет постоянной передачи теплоты от сгоревших порций топлива к новым порциям, поступающим на горение. Передача теплоты происходит благодаря теплопроводности и диффузии и значительно зависит от характера пламени. В случае, если пламя распространяется в неподвижной газокислородной смеси или смеси, движущейся ламинарно, то теплота распространяется за счет теплопроводности. Такой процесс называют нормальным горением. В случае турбулентного движения газокислительной смеси большую роль в распространении пламени играет турбулентная диффузия.

При определенных условиях распространение пламени происходит со значительной скоростью и имеет характер взрывной волны. Такое распространение пламени называют детонационным или просто детонацией.

Нормальное горение. После воспламенения горючей смеси образуется фронт горения. Фронт горения перемещается в направлении несгоревших порций смеси. Позади фронта горения находятся продукты горения, а впереди – невоспламененная горючая смесь. Благодаря

разности температур между продуктами горения и горючей смесью происходит передача теплоты теплопроводностью, которая, опережая фронт горения, обеспечивает подогрев смеси до температуры воспламенения. При горении газов фронт пламени представляет собой очень тонкий слой, который можно рассматривать как поверхность.

Расширение пределов воспламенения наблюдается при увеличении концентрации кислорода в газовой смеси, повышении температуры и снижении давления. Добавка инертных газов к газовой смеси снижает скорость распространения пламени. Для всех горючих газов существует оптимальное соотношение газа и воздуха. И при таких соотношениях скорость нормального горения достигает максимального значения.

Горение однородной смеси в турбулентном потоке. Этот вид горения более распространен в практике по сравнению с горением в спокойной, т. е. ламинарно движущейся среде. Процесс горения в ламинарном потоке рассматривают как усложненный вид ламинарного горения. В таком случае фронт горения сильно развит и искривлен в результате турбулентности потока. Скорость турбулентного горения зависит от турбулентности потока. Чем выше турбулентность потока, тем выше скорость горения. Показателем турбулентности потока является число Рейнольдса.

$$Re = V_{cp} \cdot l / \nu,$$

где V_{cp} – средняя скорость течения в поперечном сечении трубы;

l – характерный размер (диаметр трубы);

ν – коэффициент кинематической вязкости.

Диффузионное горение. Диффузионный метод сжигания газообразного топлива получил широкое распространение. При этом виде горения смешение и горение происходят в одном объеме. Первостепенную роль при диффузионном горении играет процесс смешения газа и воздуха. Диффузионное горение может проходить в ламинарном, турбулентном и переходном режимах. Ламинарный режим переходит в турбулентный при критических значениях числа Рейнольдса; так для водорода $Re = 1\,800\text{--}2\,200$, для природного газа $Re = 3\,200\text{--}4\,000$. Следует отметить, что в большинстве случаев диффузионное горение имеет турбулентный характер.

3. ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ПЕЧНЫХ ГАЗОВ

3.1. Статика и динамика газов. Понятие о механике газов

Механикой газов называют науку о законах движения и равновесия газов. В пламенных печах при горении топлива образуются продукты горения, обладающие высокой температурой. Эти продукты являются теплоносителями, передающими теплоту к нагреваемым изделиям и материалам [3–4, 6–7].

Передача теплоты от продуктов горения к нагреваемым предметам в топливных печах зависит от многих факторов, в том числе и от характера продуктов горения. Вследствие этого рациональная организация движения газов – одно из условий успешной работы печного агрегата. Не меньшее значение имеет характер движения газов в теплообменных аппаратах. Движение газов в печах, теплообменниках и т. д. подчиняется законам газовой механики. Кроме того, по законам газовой механики определяют сопротивления, оказываемые движущимся газам в печах, каналах, трубопроводах и т. п., в зависимости от которых выбирают дымососы, вентиляторы, дымовые трубы.

Движение газов в печах изучают с помощью законов движения жидкости. Известно, что объем жидкости в отличие от объема газа практически не зависит от давления и температуры. Если температура и давление движущегося газа постоянны или изменяются незначительно, то движение газа будет подчиняться законам движения жидкости. Имеющиеся практические данные позволяют утверждать, что давление газов в нагревательных печах меняется незначительно и априори может считаться постоянным. Последнее обстоятельство дает возможность, разбивая рабочее пространство печного агрегата на небольшие по длине участки, не учитывать влияние малых изменений температуры на объем газов. А это значит, что с некоторой долей приближения можно изучать движение газов в печах с привлечением законов движения жидкости.

В механике жидкостей широко используют представление о идеальной и реальной жидкостях. *Идеальной называется условная жидкость, в которой отсутствует внутреннее трение.* Введение этого понятия значительно облегчает математическое описание законов движения жидкости. Реальные жидкости обладают внутрен-

ним трением, что приводит к значительному усложнению теоретических и опытных работ по изучению процессов их движения.

По аналогии с жидкостью, различают *идеальные* и *реальные* газы. *Идеальными* называются условные газы, не имеющие вязкости. *Реальными* газами называются газы, обладающие вязкостью.

Зависимость объема и плотности газа от температуры описывается законом Гей-Люссака, а именно: *при постоянном давлении объем газа прямо пропорционален, а плотность обратно пропорциональна температуре*. Математические выражения будут иметь вид:

$$V_t = V_0(1 + \beta t); \quad \rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t},$$

где V_t и ρ_t – соответственно объем и плотность газа при t °С и давлении 101,3 кПа, м^3 и кг/м^3 ;

V_0 и ρ_0 – объем и плотность газа при температуре 0 °С и давлении 101,3 кПа;

β – температурный коэффициент объемного расширения, равный $1/273 \text{ К}^{-1}$.

Закон сохранения массы для движущегося потока газа выражается следующим образом: *количество и скорость газа, протекающего через какой-нибудь канал, связаны с поперечным сечением канала определенным соотношением*.

Скорость движения газа, м/с,

$$\omega = V/F,$$

где V – расход (объем) протекающего газа, $\text{м}^3/\text{с}$;

F – площадь поперечного сечения канала, м^2 .

При установившемся движении газа по какому-либо каналу расход массы газа, протекающего через любое сечение канала, будет одинаковым. Тогда $m_1 = m_2 = m_3 = \text{const}$, но $m = V\rho = F\omega\rho$, поэтому:

$$F_1\omega_1\rho_1 = F_2\omega_2\rho_2 = F_3\omega_3\rho_3 = \text{const}.$$

Если $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \text{const}$, то

$$F_1\omega_1 = F_2\omega_2 = F_3\omega_3 = \text{const}.$$

Последнее выражение является решением уравнения сплошности движения газа (жидкости).

При прохождении газа через каналы, имеющие сечение любой самой сложной формы, диаметр канала выражают через так называемый гидравлический диаметр.

Гидравлическим диаметром называется отношение учетверенной площади свободного сечения канала к его периметру:

$$d_{\text{гидр}} = 4F / L,$$

где F – площадь сечения канала, м^2 ;

L – внутренний периметр канала, м .

Для круглых труб $d_{\text{гидр}}$ равен их внутреннему диаметру:

$$d_{\text{гидр}} = 4F/L = 4\pi d^2/4\pi d = d.$$

3.2. Определение давлений

Покоящиеся и движущиеся газы обладают потенциальной и кинетической энергией. Эту энергию выражают в механике газов давлениями. Давление или напор – это сила, действующая на единицу площади. Различают абсолютное и избыточное давления. Избыточное давление – это разность между давлением в каком-либо объеме и в окружающей среде. Если давление в каком-либо объеме меньше давления в окружающей атмосфере, то его называют разрежением. Различают геометрическое, статическое, скоростное или динамическое давления. Измеряется давление в паскалях (Па).

Геометрическое давление $p_{\text{геом}}$ возникает в результате разности плотностей легкого газа и окружающего его тяжелого газа (рис. 3.1). Рассмотрим следующий пример.

Сосуд заполнен легким газом ($\rho_{\text{г}} < \rho_{\text{в}}$). Высота сосуда H . Внизу сосуд открыт и сообщается с атмосферой. Проводим две условные плоскости: I – I и II – II. Сверху на сосуд в плоскости I – I действует давление P_1 . В плоскости II – II сверху вниз действует давление p_1 совместно с давлением столба газа в сосуде. Снизу вверх на плоскость II – II действует давление P_2 , равное атмосферному p_1 , плюс давление окружающего столба воздуха высотой H . Разность давлений p_2 и p_1 представляет собой геометрическое давление столба легкого газа высотой H в плоскости II – II.

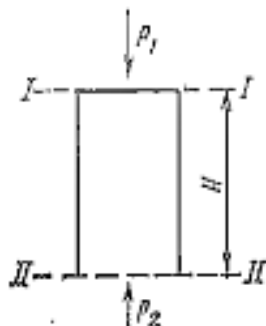


Рис. 3.1. Возникновение геометрического давления

$$P_{\text{геом}} = P_1 + H \rho_{\text{в}} g - p_1 - H \rho_{\text{г}} g = H (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}}) g.$$

Из уравнения можно сделать вывод, что геометрическое давление может быть как со знаком «+», так и со знаком «-». Если плотности окружающего газа и газа в сосуде одинаковы, то геометрическое давление в этом случае будет равно нулю. Геометрическое давление определяется расчетом.

Статическое давление $h_{\text{ст}}$ представляет собой разность давлений газа, заключенного в сосуд, и окружающего воздуха. Оно измеряется U-образным манометром, один конец которого соединен с атмосферой, а другой подсоединен к сосуду перпендикулярно к потоку газа (рис. 3.2).

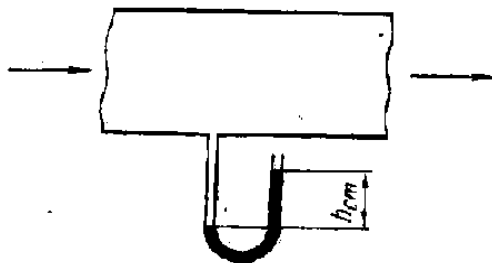


Рис. 3.2. Измерение статического давления

Скоростное или *динамическое* давление выражает зависимость кинетической энергии газового потока от скорости и плотности газа:

$$P_{\text{ск}} = \omega_t^2 \rho_t / 2 = \omega_0^2 \rho_0 (1 + \beta t) / 2,$$

где ω_t и ω_0 – действительная и условная (при 0 °С и 101,3 кПа) скорости газового потока.

Скоростное давление (рис. 3.3) измеряют дифференциальным манометром, одно колено которого расположено навстречу потоку газа (при этом определяется суммарное давление $P_{\text{ст}}$ и $P_{\text{ск}}$), а другое – перпендикулярно к нему (определяется только $P_{\text{ст}}$). Разность уровней жидкости в коленах манометра и составляет скоростное давление.

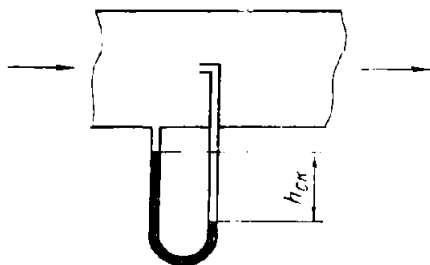


Рис. 3.3. Измерение скоростного давления

Потери давления $P_{\text{пот}}$ при движении газа образуются в результате трения газового потока о стенки канала и в результате местных сопротивлений (повороты, расширения, сужения и т. д.). На преодоление сопротивлений расходуется кинетическая энергия газа, выражаемая его скоростным давлением. Определение потери давления рассмотрим далее.

3.3. Уравнение Бернулли. Связь между давлениями

Уравнение Бернулли может быть сформулировано следующим образом: *для любого сечения трубопровода или канала, по которому протекает газ при установившемся движении, сумма геометрического, статического и скоростного давлений является величиной постоянной:*

$$P_{\text{геом.}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{ск}} = \text{const}$$

Все изложенное можно проиллюстрировать следующим примером (рис. 3.4).

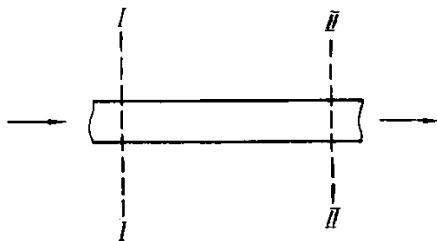


Рис. 3.4. Иллюстрация к уравнению Бернулли

По трубопроводу, расположенному горизонтально, движется идеальный газ. Согласно уравнению Бернулли, для идеального газа

$$P_{\text{геом1}} + P_{\text{ст1}} + P_{\text{ск1}} = P_{\text{геом2}} + P_{\text{ст2}} + P_{\text{ск2}} = \text{const},$$

т. е. суммы геометрического, статического и скоростного давлений в сечениях трубопровода I – I и II – II одинаковы.

При движении реального газа часть его энергии, а именно скоростное давление, затрачивается на преодоление сопротивления движению и переходит в потерянное – $P_{\text{пот}}$, т. е.

$$P_{\text{геом1}} + P_{\text{ст1}} + P_{\text{ск1}} = P_{\text{геом2}} + P_{\text{ст2}} + P_{\text{ск2}} + P_{\text{пот}} = \text{const}.$$

Последнее выражение отражает закон сохранения энергии применительно к движению реального газа, и его достаточно часто используют на практике. Однако для перехода к практическим расчетам необходимо определить потерянное давление.

3.4. Определение потерянного давления

Потери давления происходят в результате потерь энергии газового потока на трение $P_{\text{тр}}$ и местные сопротивления $P_{\text{м.с.}}$. Установлено, что $P_{\text{тр}}$ и $P_{\text{м.с.}}$ пропорциональны скоростному давлению.

Потери давления на трение:

$$P_{\text{тр}} = \lambda(l / d_{\text{гидр}}) \omega_0^2 \rho_0 (1 + \beta t) / 2,$$

где λ – коэффициент трения;

l – длина трубы, м;

$d_{\text{гидр}}$ – гидравлический диаметр канала, м.

Для практических расчетов λ принимают равным для кирпичных каналов 0,05–0,06; для металлических труб 0,02–0,03.

Потери давления на местные сопротивления:

$$P_{\text{м.с.}} = \xi \omega^2_0 \rho_0 (1 + \beta i) / 2,$$

где ξ – коэффициент местного сопротивления, определяемый опытным путем.

3.5. Истечение газов через отверстия

Истечение газов через отверстия наблюдается при выбивании газов через рабочие отверстия печного агрегата, работе форсунок, горелок и т. п.

Количество газа, истекающего через отверстия, зависит от давления, при котором происходит истечение, площади и формы поперечного сечения отверстия. Для определения количества газа используем уравнение давлений и запишем его в развернутом и преобразованном виде:

$$\begin{aligned} P_1(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}})g + (P_{\text{г}}^1 - P_{\text{в}}^1) + \omega^2_1 \rho_{\text{г}} / 2 = \\ = P_2(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}})g + (p_{\text{г}}^2 - p_{\text{в}}^2) + \omega^2_2 \rho_{\text{г}} / 2 = \text{const}, \end{aligned}$$

где $P_1(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}})g$; $P_2(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{г}})g$ – избыточные геометрические давления в сечениях I и II;

$(p_{\text{г}}^1 - p_{\text{в}}^1)$, $(p_{\text{г}}^2 - p_{\text{в}}^2)$ – избыточные статические давления в сечениях I – I и II – II;

$\omega^2_1 \rho_{\text{г}} / 2$, $\omega^2_2 \rho_{\text{г}} / 2$ – скоростное давление в сечениях I и II (рис. 3.4).

Рассмотрим некоторые случаи истечения несжимаемого газа через отверстие при постоянной температуре.

Отверстие с острыми кромками.

Представим себе, что из сосуда неограниченно больших размеров (давление газа в котором P_1) газ вытекает через отверстие сечением F в газовую среду с давлением P_2 . Требуется определить скорость истечения. Напишем уравнение давлений для сечений I – I и II – II, показанных на рис. 3.5.

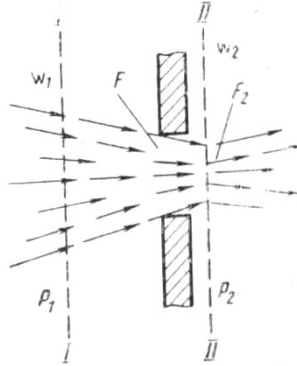


Рис. 3.5. Истечение газа через отверстие с острыми кромками

Температура газа постоянна, поэтому $P_{\text{геом}}^1 = P_{\text{геом}}^2$.

Потерями на трение в данном случае можно пренебречь. И для этого случая уравнение давлений будет иметь вид:

$$P_1 + \omega_1^2 \rho_1^r / 2 = P_2 + \omega_2^2 \rho_1^r / 2.$$

Так как сосуд имеет неограниченно большие размеры, то можно принять, что $\omega_1 = 0$. Если же $P_2 = P_0$, то получим

$$P_1 = P_0 + \omega_2^2 \rho_1^r / 2.$$

Выразим $P_2 - P_1 = P$, и тогда

$$\omega^2 = \frac{2\rho}{\gamma_{\text{мг}}}.$$

Сечение струи газа F_2 будет меньше сечения F благодаря сжатию струи. Отношение $F_2 / F = \epsilon$ называется коэффициентом сужения струи и имеет различные значения в зависимости от условий истечения. Для тонких стенок сосуда $\epsilon = 0,63$, для толстых $\epsilon = 1$.

Определим расход газа V в сечении II – II:

$$V = V_2 = \omega_2 F_2,$$

но $F_2 = \epsilon F$, и тогда расход газа, $\text{м}^3/\text{с}$,

$$V = \varepsilon F_2 \sqrt{\frac{2\rho}{\gamma_{\text{МГ}}}}.$$

Отверстие с цилиндрическим насадком.

Форма насадка и входных кромок при прочих равных условиях значительно влияет на количество истекающего газа. Рассмотрим случай истечения газа через цилиндрический насадок с острыми кромками (рис. 3.6)

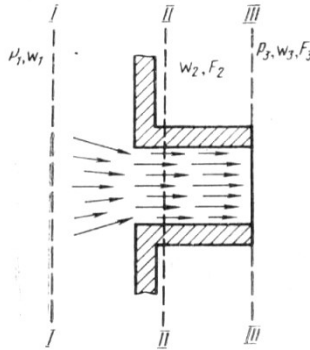


Рис. 3.6. Истечение газа через цилиндрический насадок с острыми кромками

В этом случае уравнение давлений для сечений I – I и III – III будет иметь вид:

$$P_1 = P_3 + \omega_3^2 \rho_t^r / 2 + (\omega_2 - \omega_3)^2 \rho_t^r / 2,$$

где $\omega_3^2 \rho_t^r / 2$ – скоростное давление в сечении III – III;

$(\omega_2 - \omega_3)^2 \rho_t^r / 2$ – потери давления на сжатие струи.

Из уравнения сплошности следует

$$\omega_2 F_2 = \omega_3 F_3.$$

Откуда $\omega_2 = \omega_3 F_3 / F_2$.

Подставим последнее выражение в уравнение давлений, и, преобразовав его, получим

$$P_1 - P_3 = (\omega_3^2 / 2) \cdot [1 + (F_3 / F_2 - 1)^2] \rho_t^r.$$

Принимая отношение $F_2 / F_3 = 0,63$, заменяем $P_1 - P_3 = p$, получаем скорость, м/с, и расход газа, м³/с,

$$\omega_3 = 0,85 \sqrt{\frac{2p}{\rho_{\text{гг}}}}; \quad V = 0,85 F_3 \sqrt{\frac{2p}{\rho_{\text{гг}}}}.$$

При истечении газа через цилиндрический насадок с закругленными кромками потери на сжатие струи отсутствуют (рис. 3.7).

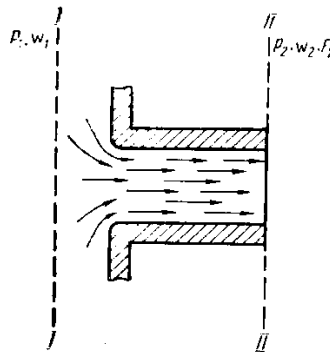


Рис. 3.7. Истечение газа через цилиндрический насадок с закругленными кромками

Уравнение давлений для сечений I – I и II – II в этом случае будет иметь вид

$$P_1 = P_2 + \omega_2^2 \rho_{\text{гг}} / 2.$$

Заменяя $P_1 - P_2 = P$, получим соответственно скорость (м/с) и расход газа (м³/с),

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{2p}{\rho_{\text{гг}}}}; \quad V = F_2 \sqrt{\frac{2p}{\rho_{\text{гг}}}}.$$

Расширяющийся насадок.

На рис. 3.8. представим истечение газов через диффузор или расширяющийся насадок.

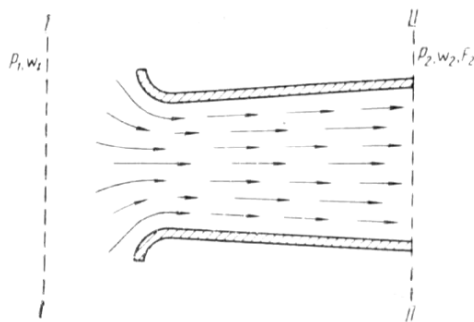


Рис. 3.8. Истечение газа через диффузор с закругленными кромками

В случае истечения газа через диффузор (расширяющийся насадок) с закругленными кромками на входе уравнение давлений для сечений I – I и II – II имеет вид

$$P_1 = P_2 + \omega^2 \rho_t^r / 2.$$

Выражая $P_1 - P_2 = P$, получим расход газа, м³/с:

$$V = F_2 \sqrt{\frac{2P}{\rho_t^r}}.$$

Следует отметить, что наибольший расход при одном и том же значении P наблюдается в случае диффузора с закругленными кромками на входе, так как в этом случае отношение $F_2 / F = 1$, а величина F_2 диффузора больше этой же величины насадки с закругленными кромками. Диффузор не должен иметь расширение более чем 7°, так как это соответствует естественному расширению струи газа. Диффузоры широко применяются в технических устройствах, таких, как инжекционные горелки, эжекторы для создания искусственной тяги и т. п.

Выбивание газов через открытые рабочие окна печей.

При нормальном режиме работы печного агрегата на его поде поддерживается атмосферное давление. По высоте печи это давление возрастает и достигает максимума под сводом (рис. 3.9).

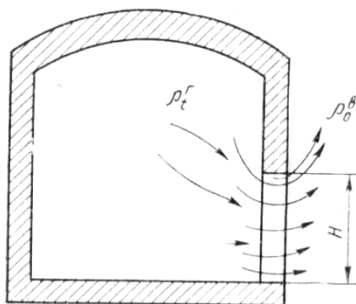


Рис. 3.9. Истечение газа через открытое окно печи

Количество газов, выбивающихся через окно печи, можно определить из выражения

$$V = \left(\frac{2}{3} \right) HB \sqrt{\frac{2gH(\rho_{\text{ов}} - \rho_{\text{мг}})}{\rho_{\Gamma}}},$$

где H и B – высота и ширина рабочего окна, м.

3.6. Движение газов в печах и сушилаx. Струйное движение газов

Движение газов в печах по природе его возникновения может быть свободным или вынужденным. Свободным называется такое движение, которое вызвано разностью плотностей газов, находящихся в печи. Вынужденным называется движение, вызванное внешними факторами (дымовой трубой, вентилятором, горелкой, форсункой и т. д.). В большинстве современных печей газы имеют вынужденное движение.

По характеру движение газов в печах, трубопроводах, различных каналах подразделяют на ламинарное (слоистое) и турбулентное (вихревое). Сказанное относится также и к жидкости.

При ламинарном движении элементарные струйки газа (жидкости) протекают параллельно одна другой (рис. 3.10, а). При турбулентном движении они движутся в направлении основного потока вихреобразно, неупорядоченно (рис. 3.10, б). При переходном режиме движение газов имеет промежуточный характер.

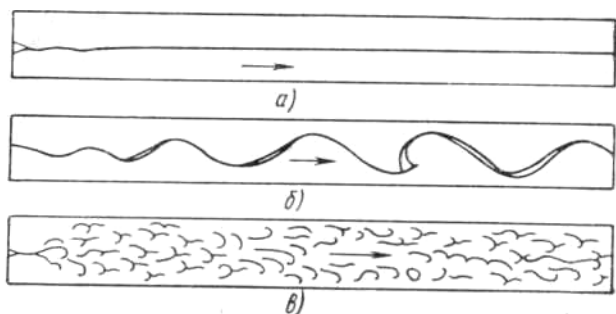


Рис. 3.10. Характер движения жидкости в трубе при ламинарном (а), переходном (б) и турбулентном (в) режимах

Показателем характера движения газа (жидкости) служит критерий Рейнольдса Re , который представляет собой безразмерный комплекс

$$Re = \omega \cdot d_{\text{гидр}} / \nu,$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости при температуре в $^{\circ}\text{C}$.

При $Re \leq 2\,300$ движение газа (жидкости) будет ламинарным, а при $Re \geq 10\,000$ – турбулентным. При $Re = 2\,300\text{--}10\,000$ режим движения будет переходным. Указанные значения Re безусловно справедливы только при движении газа (жидкости) по гладкому круглому трубопроводу. На практике значения Re имеют отклонения от указанного предела и иногда весьма значительные. Однако в большинстве технических расчетов движения газов и жидкостей в каналах используют указанные значения Re .

Движение газов в печах отличается большой сложностью. Неравномерность давлений в печи, вызванная разностью температур в печном объеме и влиянием газовых струй из форсунок и горелок, приводит к перемещению газа из мест большего давления в места с меньшим давлением или разрежением. Таким образом, возникает циркуляция в печном пространстве. Наряду с циркуляцией, в печах большого объема иногда имеют место «мертвые» зоны с очень малой скоростью циркуляции. На рис. 3.11, а, изображена схема движения газов в методической печи, а на 3.11, б, – в термической печи с подподовой топкой.

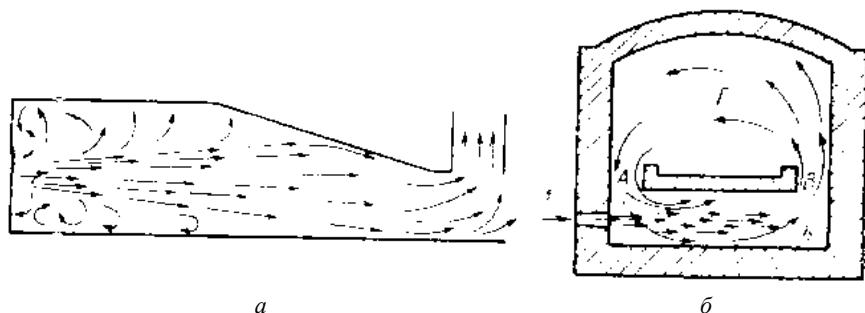


Рис. 3.11. Схема движения газов в:
а – методической печи, *б* – термической печи с подподовой топкой

В термической печи с подподовой топкой наблюдается интенсивная циркуляция газов. Она объясняется тем, что продукты горения покидают горелку или форсунку с большой скоростью, благодаря чему у корня факела образуется разрежение, которое распространяется на канал А. Продукты горения топлива проходят через топку Б и выходят через канал В в рабочую камеру Г, часть из них уходит в дымоотводную систему, а часть засасывается опять в топку Б через канал А.

Как отмечалось, в печах при нормальной их работе на поде поддерживается давление, равное атмосферному, так как, если давление в рабочей камере будет значительно выше или ниже атмосферного, то произойдет выбивание газов из печи или подсос холодного воздуха в печь. И то и другое является нежелательным. Практически в печах вследствие геометрического давления невозможно поддерживать давление, равное атмосферному, по всей высоте рабочей камеры. Поэтому стараются поддерживать атмосферное давление на уровне пода печи с тем, чтобы предотвратить подсос холодного воздуха в печь, так как подсос холодного воздуха менее желателен для работы печи, чем выбивание газов из нее. Необходимое давление поддерживается регулированием тяги из печи. На режим давлений печи оказывают влияние также расположение и размеры дымоходов. Схема расположения дымоходов зависит от назначения и конструкции печи. Размеры дымоходов выбирают исходя из того, чтобы условная (при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $101,3\text{ кН/м}^2$) скорость газов ω_0 в них не превышала $1\text{--}2\text{ м/с}$.

3.7. Движение газов в рабочем пространстве печей и сушил

Движение газов в рабочем пространстве печей и сушил разделяют на канальное и струйное.

Канальным называется движение, которое осуществляется за счет потенциальной энергии потока. Примером может быть движение газов в дымовой трубе за счет уменьшения геометрического давления или в горизонтальном канале за счет уменьшения статического давления.

Струйным называют движение, которое осуществляется за счет динамического воздействия струй.

Движение газов организуют, основываясь на свойствах свободного и вынужденного движения газов с учетом требований к тепловой работе печей и сушил. Например, для обеспечения равномерной температуры в печном агрегате топливо сжигают, используя большое количество форсунок или горелок, равномерно распределенных по печи. Вследствие энергичного перемешивания отдельных струй-факелов происходит выравнивание температуры в печном пространстве. Струи-факелы непосредственно не направляются на нагреваемые изделия во избежание их местного перегрева. Горелки и форсунки должны располагаться по возможности дальше от рабочих окон и других отверстий. Это необходимо для того, чтобы избежать подсоса холодного воздуха за счет разрежения, создаваемого в местах выхода струй-факелов. Во избежание выбивания нагретых газов и подсоса холодного воздуха давление на подине печей поддерживают близким к нулю. В нагревательных и термических печах окна для отсоса продуктов горения топлива располагают на уровне пода печи. Свойство ограниченных струй вызывать циркуляцию газов используют для выравнивания температуры в печном пространстве, а также для понижения температуры, развивающейся при горении топлива. Это понижение достигается за счет циркуляции охладившихся продуктов горения при контакте с нагреваемыми изделиями и присоединении их ко вновь образовавшимся продуктам горения. Такая многократная рециркуляция продуктов горения способствует более полному и равномерному нагреву изделий в печах и сушилах.

В нагревательных печах горелки и форсунки размещают непосредственно в рабочем пространстве печи. В печах для термообработки горелки или форсунки располагают в подподовых топках, чтобы избе-

жать местного перегрева изделий. Сушила, применяемые в литейных цехах, в основном отапливаются газообразным топливом. Вследствие сравнительно невысокой температуры сушки, горелки непосредственно в печном пространстве не устанавливаются. Газ сжигают в специальной топке, откуда с помощью дымососа его подают в рабочую камеру по раздаточным коробам и убирают с помощью отсасывающих коробов. Расположение коробов, размеры и число отверстий обеспечивают наиболее благоприятные условия для сушки изделий.

В электропечах обычной конструкции движение газов в процессе передачи теплоты не играет решающей роли. Однако в электропечах с контролируемой атмосферой характер движения атмосферы и герметичность самого печного агрегата имеют большое значение.

3.8. Устройства для создания тяги в печных агрегатах

Создание тяги в промышленных печных агрегатах может осуществляться как естественным, так и искусственным путем.

Естественная тяга создается с помощью дымовой трубы, высота и площадь поперечного сечения которой зависят от количества выбрасываемых газов и потерь давления при прохождении газов из печи через систему дымовых каналов, шиберов и т. п. устройств (рис. 3.12).

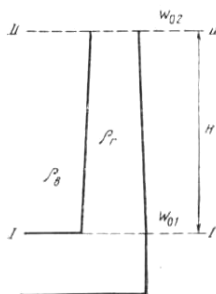


Рис. 3.12. Схема дымовой трубы

Высоту дымовой трубы H определяем из формулы

$$1,3 \Sigma P_{\text{пот}} = H (\rho_{\text{тв}} - \rho_{\text{тг}}) g - (\omega_{02}^2 - \omega_{01}^2) \rho_{0\text{г}} (1 + \beta t_{\text{ср.г}}) / 2 - \\ - \omega_{02}^2 \rho_{0\text{г}} (1 + \beta t_{2\text{г}}) / 2 - \lambda (H / d_{\text{ср}}) \omega_{0\text{ср}}^2 \gamma_{0\text{г}} (1 + \beta t_{\text{ср.г}}) / 2,$$

где $\Sigma P_{\text{пот}}$ – потери давления на пути газа от печи к трубе, Па;

1,3 – коэффициент увеличения $P_{\text{пот}}$ в случае форсированной работы печи;

$\rho_t^B, \rho_0^r, \rho_t^r$ – плотности воздуха и газа при 0 и t °С и 101,3 кПа, кг/м³;

g – ускорение свободного падения;

ω_1, ω_2 – условные скорости газа в сечениях I – I и II – II, м/с ($\omega_1 = 1,2$ –2 и $\omega_2 = 2,5$ –3 м/с);

$\omega_{0\text{cp}}$ – средняя условная скорость газа в трубе, м/с;

t_{cp}^r – средняя температура газа по высоте трубы, °С;

t_2^r – температура в сечении II – II, °С;

d_{cp} – средний диаметр трубы, м.

Рассмотрим, что характеризуют члены, входящие в представленное уравнение. Член $H(\rho_t^B - \rho_t^r)$ характеризует тягу, создаваемую трубой за счет геометрического давления. Остальные три члена правой части уравнения характеризуют потери давления в самой трубе и на выходе газа в атмосферу: член $\lambda(H/d_{\text{cp}})\omega_{0\text{cp}}^2\gamma_{0r}(1+\beta t_{\text{cp.r}})/2$ выражает потерю давления на трение в трубе; член $(\omega_2^2 - \omega_1^2)\gamma_{0r}(1+\beta t_{\text{cp.r}})/2$ – потерю давления на сужение трубы (высокие трубы строят обычно конусными для обеспечения прочности), а член $\omega_2^2\gamma_{0r}(1+\beta t_{2r})/2$ – потерю давления на выход газа из трубы за счет внезапного расширения струи газа.

Для практического применения приведенной формулы необходимо знать температуру газов у устья трубы (сечения II – II) и их среднюю температуру в трубе. Для этого предварительно определяют высоту трубы по приближенной формуле:

$$H_1 = (20-25)d_y,$$

где d_y – диаметр устья, который находят по скорости ω_2 и количеству газа.

Затем, используя полученное значение высоты и задавшись падением температуры газов на 1 м высоты (у кирпичных труб оно составляет 1,5–1,6 °С/м, у металлических без футеровки 3–4 °С/м высоты), определяют t_2^r и t_{cp}^r . Соотношение между d_y и $d_{\text{осн}}$ (сечения I – I и II – II) принимают $d_{\text{осн}} = 1,5d_y$.

Искусственную тягу создают с помощью нескольких систем, основными из которых являются отсасывание дымососом (вентилятором) и тяга косвенного действия. В качестве дымососов используют центробежные вентиляторы низкого давления. Дымососы из углеродистой стали работают до температуры 200–250 °С, а при 400–600 °С применяют дымососы с водоохлаждаемыми подшипниками и валами.

Тягу косвенного действия создают с помощью эжекторов.

Принцип действия эжектора (рис. 3.13) заключается в том, что эжектирующий газ, выходя из сопла 1 с большой скоростью, за счет вязкости и трения увлекает частицы эжектируемого газа 2, при этом создается разрежение в области, прилегающей к эжектору.

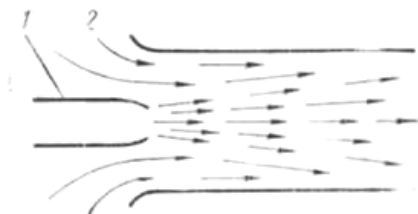


Рис. 3.13. Принцип действия эжектора

В литейных цехах для снабжения оборудования воздухом используют различные воздуходувные машины: вентиляторы, воздуходувки, компрессоры. Вентиляторы используют для обеспечения воздухом отдельных крупных печей и сушил, а также для перемешивания атмосферы в печах и сушилах. Воздуходувки используют в качестве общецеховых источников воздухоснабжения. Компрессоры применяют с целью получения воздуха высокого давления для пневматических механизмов, распыления мазута в форсунках и т. д.

3.9. Понятие о теории подобия

В промышленных печах и сушилах протекает большое количество тепловых и гидродинамических процессов, изучение которых непосредственно на действующих печах и сушилах затруднительно или невозможно. В таких случаях наиболее целесообразным методом изучения будет моделирование. При этом создаются лабораторные модели печей и сушил, в которых могут протекать процессы, подоб-

ные процессам, протекающим в действующих промышленных агрегатах. Подобие процессов в образцах и в моделях достигается при соблюдении определенных условий на основании теории подобия.

Термин подобия заимствован из геометрии. Зная условия геометрического подобия, можно решать ряд практических задач. Понятие подобия распространяется на любые физические явления. Так, *тепловое подобие – это подобие температур и тепловых потоков; гидродинамическое подобие – это подобие сил, вызывающих подобные движения* (например, двух подобных потоков газа).

Физические явления считаются подобными, если они одного и того же рода, качественно одинаковы и описываются математическими уравнениями одинаковых форм и содержания. Кроме того, должно быть соблюдено геометрическое подобие систем, в которых протекают рассматриваемые явления. При рассмотрении подобных явлений можно сопоставлять только однородные величины (температуру с температурой, скорость со скоростью и т. д.) в сходных точках пространства и в сходные моменты времени.

Для теплового подобия двух потоков газа необходимо, чтобы потоки были ограничены стенками геометрически подобной конфигурации, и чтобы во всем объеме системы были подобны скорость, вязкость, температура и другие физические величины, которые характеризуют явление.

Кроме постоянства отношений однородных величин имеются еще и дополнительные условия. Сущность этих условий заключается в том, что у подобных явлений существует равенство особых величин, называемых числами подобия, а именно безразмерных комплексов, составленных из величин, характеризующих явление.

У подобных явлений числа подобия равны, и, наоборот, если числа подобия равны, то явления подобны. В печах и сушилах гидродинамические процессы протекают наряду с процессами горения и теплообмена. Точный учет явлений горения и теплообмена выражается очень сложными математическими уравнениями и делает моделирование практически невозможным. Поэтому газ рассматривают как несжимаемую жидкость с постоянными физическими свойствами, движущуюся в закрытом русле. Уравнения, описывающие движение газа, приводят к безразмерному виду с помощью чисел подобия Рейнольдса (Re) и Эйлера (Eu).

Число Рейнольдса $Re = \omega d_{\text{гидр}} / \nu$ представляет собой отношение инерционных сил потока газа (жидкости), выражаемых скоростью ω , к силам внутреннего трения, выражаемым коэффициентом кинематической вязкости ν . Число Рейнольдса служит показателем характера движения газа и жидкости. Движение газа может быть ламинарным (слоистым) или турбулентным (вихревым). При ламинарном движении элементарные струйки газа протекают параллельно, при турбулентном они движутся в направлении основного потока вихреобразно или неупорядоченно.

При $Re \leq 2\,300$ движение газа (жидкости) ламинарное, при $Re \geq 10\,000$ – турбулентное. При промежуточных значениях чисел Re может быть ламинарное и турбулентное.

Число Эйлера представляет собой отношение изменения потенциальной энергии элемента газа в потоке при некотором его перемещении к удвоенной кинетической энергии этого элемента.

$$Eu = \Delta P / \rho \omega^2,$$

где ΔP – перепад давления, расходуемый на преодоление гидравлического сопротивления;

ρ – плотность;

ω – скорость.

Для соблюдения гидродинамического подобия необходимо соблюдение трех условий. Первое – геометрическое подобие образца и модели. Второе – равенство чисел Рейнольдса для образца и модели. Третье – подобие в местах входа и выхода, т. е. необходимо соблюдать подобие не только в пределах рабочего пространства, но и в тех участках печи и модели, через которые подают и отводят топливо, воздух и моделируемую среду. Соблюдение указанных условий обеспечивает равенство чисел Эйлера для образца и модели.

Теория подобия позволяет экспериментально изучать интересующие нас явления на модели, результаты записывать в виде математических уравнений в критериальной форме и распространять полученные зависимости на группу подобных явлений.

4. ОСНОВЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

4.1. Общие сведения

Теплопередача (теплообмен) – это процесс передачи тепла из одной части пространства в другую. Известно, что тепло может передаваться от более нагретых тел к менее нагретым (это одна из формулировок второго закона термодинамики).

При изучении процессов теплопередачи оперируют следующими основными величинами и их размерностями.

Количество тепла Q^* измеряют в джоулях (Дж), килоджоулях (кДж) или киловатт-часах (кВт · ч):

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ кДж} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Тепловой поток Q – это количество тепла, передаваемое за единицу времени, измеряют в ваттах (Вт), киловаттах (кВт):

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}; 1 \text{ кВт} = 1 \text{ кДж/с}.$$

Удельный тепловой поток q – это тепловой поток, отнесенный к единице поверхности. Его измеряют в Вт/м² или кВт/м².

Температура t – это термодинамическая характеристика точки пространства. Единицей температуры в СИ является кельвин (К). Допускается применять в качестве единицы измерения температуры градус по шкале Цельсия (°С). По величине один градус по шкале Цельсия (1 °С) равен одному градусу по шкале Кельвина (1 К).

Температурное поле – это совокупность значений температуры всех точек рассматриваемой среды в данный момент времени. Если температура поля t не зависит от времени и является только функцией координат поля $t = f(x, y, z)$, то поле называют *стационарным*. Если она меняется во времени $t = f(x, y, z, \tau)$, то поле называют *нестационарным*.

Геометрическое место точек тела, имеющих одинаковую температуру, называется *изотермической поверхностью*.

Количественной характеристикой того, насколько резко меняется температура на бесконечно малом участке тела (практически в точке), является *температурный градиент*:

$$\text{grad}(t) = \frac{dt}{dx} + \frac{dt}{dy} + \frac{dt}{dz}.$$

Температурный градиент – это вектор, перпендикулярный изотермической поверхности.

Если поле одномерное, то получаем:

$$\text{grad}(t) = \frac{dt}{dx}.$$

Закон Фурье устанавливает зависимость величины теплового потока, проходящего через площадку F , от температурного градиента и теплопроводности материала:

$$Q = -\lambda F \text{grad}(t),$$

где λ – коэффициент теплопроводности,

$$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \left(\frac{\text{К}}{\text{м}} \right)} = \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

При стационарном температурном поле количество теплоты, входящей в тело через более нагретые поверхности, равно теплоте, выходящей из него через менее нагретые поверхности: $Q_{\text{вх}} = Q_{\text{вых}}$.

При нестационарном поле теплота, входящая в тело, частично расходуется на его нагрев (так называемая аккумулированная теплота $Q_{\text{ак}}$), а другая выходит из него: $Q_{\text{вх}} = Q_{\text{ак}} + Q_{\text{вых}}$.

Теплопередача может осуществляться теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

Теплопроводность – это процесс передачи тепла внутри тел или между ними, обусловленный тепловым движением молекул и свободных электронов без заметного перемещения частиц тел.

Конвекция – это процесс переноса тепла при перемещении объемов жидкости или газа из более нагретых областей в менее нагретые.

Тепловое излучение – это процесс передачи энергии электромагнитными волнами, который возможен даже тогда, когда тела не соприкасаются между собой и разделены вакуумом.

В промышленных печах передача тепла осуществляется всеми тремя способами, но выбор способа зависит от конструкции печи.

4.2. Теплопроводность

4.2.1. Теплопроводность плоской однослойной стенки

В практике металлургической теплотехники частот встречаются случаи передачи тепла через плоскую стенку, когда температуры t_1 и t_2 на наружных поверхностях стенки с течением времени остаются неизменными, т. е. температурное поле стационарно (рис. 4.1, а) [1–3].

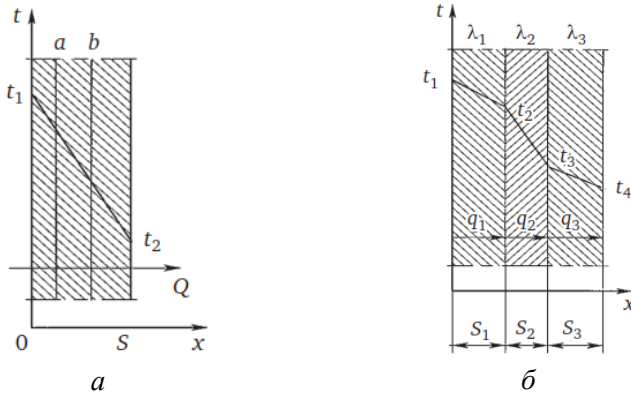


Рис. 4.1. Передача тепла через плоские стенки: а – однослойная стенка; б – трехслойная стенка

Если толщина стенки s значительно меньше ее высоты и ширины, а разность температур наблюдается только вдоль оси x , то тепловой поток Q направлен только вдоль этой оси.

Рассмотрим слой материала, расположенный между двумя сечениями a и b (см. рис. 4.1, а). Тепловой поток, входящий в этот слой через сечение a , должен быть равен тепловому потоку, выходящему из этого слоя через сечение b . В противном случае количество тепла в этом слое материала изменится, что приведет к изменению в нем температуры и нарушению стационарности. Поскольку сечения a и b были выбраны произвольно, можно заключить, что тепловой поток вдоль оси x постоянен. Поэтому в уравнении Фурье температура в стенке меняется по прямой линии:

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{Q}{\lambda F} = \text{const.}$$

Разделив переменные, проинтегрировав и заменив $(x_2 - x_1)$ на s , получим, Вт:

$$Q = \frac{\lambda \cdot F}{s} (t_1 - t_2).$$

Удельный тепловой поток будет равен, Вт/м²,

$$q = \frac{\lambda}{s} (t_1 - t_2).$$

4.2.2. Теплопроводность плоской многослойной стенки

Стенки в промышленных печах, как правило, многослойные. Например, наружный слой представляет собой кожух, выполненный из листовой стали. Второй слой – из теплоизоляционного материала, третий – из огнеупорных кирпичей. Пусть слои плотно прилегают друг к другу и имеют одинаковую температуру в месте контакта (рис. 4.1, б). Коэффициенты теплопроводности слоев равны λ_1 , λ_2 и λ_3 , а толщины соответственно S_1 , S_2 и S_3 . Температуры наружных поверхностей стенки равны t_1 и t_4 .

При стационарном температурном поле удельные тепловые потоки через каждый слой одинаковы: $q_1 = q_2 = q_3 = q$. Для каждого из слоев поток определится по стереотипным формулам:

$$q_1 = \lambda_1 (t_1 - t_2) / S_1; \quad q_2 = \lambda_2 (t_2 - t_3) / S_2; \quad q_3 = \lambda_3 (t_3 - t_4) / S_3.$$

Эта система из трех уравнений и трех неизвестных имеет решение, Вт/м²:

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3}};$$

$$t_2 = t_1 - \frac{q S_1}{\lambda_1}; \quad t_3 = t_2 - \frac{q S_2}{\lambda_2}.$$

Для стенки, состоящей из n слоев, удельный тепловой поток определится по формуле:

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{S_n}{\lambda_n}}.$$

4.3. Конвекция

Передача теплоты конвекцией обусловлена тепловым движением частиц среды, поэтому интенсивность этого процесса зависит от характера движения и физических свойств среды.

Для расчета теплового потока от твердого тела к жидкости (или наоборот) Ньютон предложил формулу, Вт:

$$Q_k = \alpha_k F(t - t_c),$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К);

t – температура поверхности теплоотдачи, °С;

t_c – температура среды, °С;

F – площадь поверхности контакта двух сред, м².

4.3.1. Конвекция при свободном движении

Свободная конвекция в неограниченном пространстве вызвана разной плотностью холодных и нагретых частиц среды.

Примером такой передачи тепла является взаимодействие наружной поверхности печи с окружающим воздухом. Характер движения воздуха по разным частям поверхности печи показан на рис. 4.2.

Движение воздуха вдоль днища печи носит ламинарный характер, струйки металла двигаются параллельно друг другу, не перемешиваясь между собой. Поэтому передача тепла от одного слоя к другому происходит путем диффузии частиц из горячих струй в более холодные. Этот процесс, как и все диффузионные процессы, характеризуется невысокой скоростью.

В отличие от теплопроводности перемещения частиц в этом случае происходят на значительные расстояния.

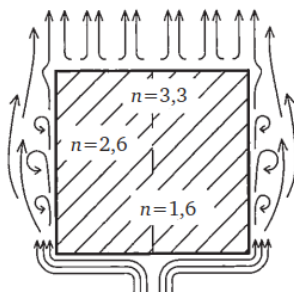


Рис. 4.2. Свободная конвекция с поверхностей печи

Движение вдоль нижней части боковых поверхностей печи также носит ламинарный характер, но затем толщина ламинарного слоя уменьшается, движение становится турбулентным, вихреобразным. Очевидно, что скорость теплопередачи при этом резко возрастает.

Возможность перемещения холодного воздуха к своду печи и отвода от нее нагретого значительно лучше, чем у днища. Поэтому передача со свода тепла происходит интенсивнее.

Во всех трех случаях значения коэффициента теплоотдачи вычисляют по формуле:

$$\alpha_K = n \sqrt[4]{t - t_c},$$

где n – коэффициент, зависящий от положения поверхности в пространстве. Для горизонтальной поверхности, обращенной вниз, он равен 1,6; для вертикальной поверхности 2,6 и для горизонтальной поверхности, обращенной вверх, 3,3.

4.3.2. Конвекция при вынужденном движении

При вынужденном движении теплоотдача конвекцией зависит главным образом от характера и скорости движения. В связи со сложностью этого процесса практические рекомендации по вычислению коэффициента теплоотдачи α_K можно давать только для каждого отдельного случая теплоотдачи, характерного для промышленных печей.

Для вычисления коэффициента теплоотдачи обычно используют критерии гидродинамического и теплового подобия.

Для обеспечения подобия двух явлений необходимо равенство безразмерных инвариантов подобия.

Первый из них – число Нуссельта (Nu) – вычисляют по формуле:

$$Nu = \alpha_K d_{\text{гидр}} / \lambda.$$

Число Nu характеризует теплообмен на границе стенка – газ. В задачах конвективного теплообмена это число является искомой величиной, так как зная ее, легко вычислить коэффициент теплоотдачи α_K .

Число Рейнольдса (Re) показывает соотношение сил инерции и сил вязкости в потоке газа или жидкости и служит показателем характера движения. Число Re вычисляют по формуле:

$$Re = W d_{\text{гидр}} / \nu,$$

где $d_{\text{гидр}}$ – гидравлический диаметр канала;

ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

При $Re \leq 2\,300$ движение газа (жидкости) ламинарное, при $Re \geq 10\,000$ – турбулентное, а при $2\,300 < Re < 10\,000$ – смешанное.

Число Прандтля (Pr) характеризует отношение количества теплоты, выделяемой в данной точке потока вследствие вязкой диссипации, к количеству теплоты, отводимой от нее путем теплопроводности:

$$Pr = \nu / a.$$

5. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА ИЗЛУЧЕНИЕМ В ПЕЧАХ

Электромагнитное излучение происходит при квантовом переходе атомов и молекул вещества из стационарного состояния с большей энергией в стационарное состояние с меньшей энергией [3–7].

Поскольку эти явления перехода могут происходить с различными по природе частицами и при любых температурах выше абсолютного нуля, излучаемые при этом электромагнитные волны имеют различную длину. Тепловое поле включает в себя видимые лучи (свет) с длиной волны λ от 0,4 до 0,8 мкм и часть инфракрасного спектра с длиной волн от 0,8 до 40 мкм. При температуре выше 3 500 °С тепловая энергия передается в ультрафиолетовом диапазоне излучения.

Излучение непрозрачных твердых тел происходит только с их поверхностного слоя толщиной от 0,0005 до десятых долей миллиметра. Излучение некоторых жидкостей, газов и стекла является объемным.

Тепловой поток излучения – это количество тепла, излучаемое в единицу времени $Q_{\text{и}}$, Вт.

Поверхностная плотность теплового потока – это тепловой поток излучением, отнесенный к единице поверхности $q_{\text{и}}$, Вт/м².

Суммарное излучение с поверхности тела по всем длинам волн спектра называют интегральным, или полным потоком излучения $Q_{\text{и}}$. Излучение, испускаемое произвольной поверхностью по всем возможным направлениям пространства в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, называют монохроматическим Q_{λ} .

Твердые тела могут поглощать, пропускать или отражать тепловые лучи.

Сумма поглощенного $Q_{\text{погл}}$, отраженного $Q_{\text{отр}}$ и пропущенного $Q_{\text{проп}}$ твердым телом тепловых потоков равна падающему на него потоку $Q_{\text{и}}$:

$$Q_{\text{и}} = Q_{\text{погл}} + Q_{\text{отр}} + Q_{\text{проп}}.$$

Разделив левую и правую части на $Q_{\text{и}}$, получим:

$$Q_{\text{погл}} / Q_{\text{и}} + Q_{\text{отр}} / Q_{\text{и}} + Q_{\text{проп}} / Q_{\text{и}} = 1,$$

или

$$A + R + D = 1,$$

где A , R и D – безразмерные величины, называемые соответственно коэффициентами поглощения, отражения и пропускания (или поглощательной, отражательной и пропускательной способностями тела).

Если $A = 1$, то $R = D = 0$, и весь падающий поток поглощается телом. Такое тело называют абсолютно черным.

Если $R = 1$, то $A = D = 0$, и весь падающий поток отражается телом. Такое тело называют абсолютно белым.

Если $D = 1$, то $A = R = 0$, и весь падающий поток пропускается телом. Такое тело называют абсолютно прозрачным.

Реальные тела занимают промежуточное положение между абсолютно черными, белыми и прозрачными. Для них характерны значения, отличные от единицы. Такие тела в теории теплового излучения называют серыми телами.

5.1. Основные законы теплового излучения

Закон Стефана-Больцмана.

Зависимость плотности потока излучения от температуры впервые была экспериментально установлена И. Стефаном в 1879 г., и позднее (в 1884 г.) она была получена теоретически Л. Больцманом. Поверхностная плотность теплового потока излучения абсолютно черного тела ($q_{и0}$) пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$q_{и0} = \sigma_0 T^4,$$

где σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный $5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$. Эта величина чрезвычайно мала, а T^4 очень велика, поэтому в технических расчетах чаще используют формулу, $\text{Вт}/\text{м}^2$:

$$q_{и0} = C_0 (T / 100)^4,$$

где C_0 – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела, равный $5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$. Для серых тел закон Стефана-Больцмана записывают в виде, $\text{Вт}/\text{м}^2$:

$$q_{и0} = C (T / 100)^4,$$

где C – коэффициент лучеиспускания серого тела: $C = \varepsilon \cdot C_0$.

Степень черноты тела ($\varepsilon = C / C_0$) всегда меньше единицы, Вт/м²:

$$q_{и0} = \varepsilon C_0(T / 100)^4,$$

Закон Кирхгофа.

Отношение лучеиспускательной способности какого-либо серого тела к его поглотительной способности одинаково для всех тел, находящихся при одинаковой температуре, и равно излучательной способности черного тела при той же температуре.

Применительно к поверхностным плотностям тепловых потоков закон Кирхгофа можно выразить следующим образом:

$$q_{и} / A = q_{и1} / A_1 = q_{и2} / A_2 = q_{и3} / A_3 \dots = q_{и0} = C_0(T / 100)^4,$$

отсюда следует

$$q_{и} = A C_0(T / 100)^4.$$

Сопоставив уравнения, видим, что $A = \varepsilon$ и что степень черноты численно равна коэффициенту поглощения данного тела.

Поскольку эти величины равнозначны, обе они обозначаются символом ε .

Закон Ламберта.

Лучистый поток d^2Q_β , посылаемый элементарной площадкой dF в телесный (пространственный) угол $d\varphi$, пропорционален величине этого угла и поверхности площадки $dF_{\text{вид}}$, видимой в направлении оси $d\varphi$ (рис. 5.1):

$$dQ_\beta = b_0 dF \cos \beta d\omega, \text{ Вт},$$

где b_0 – яркость черной площадки, равная полусферической плотности излучения q_0 , деленной на π .

Чтобы определить долю лучистого потока dQ_{1-2} , уходящего с поверхности F_1 и попадающего на поверхность F_2 (рис. 5.2), подставим в уравнение выражение для телесного угла ω . Круглой площадке площадью $dF_2 \cos \beta_2$ соответствует телесный угол $d\omega_1 = dF_2 \cos \beta_2 / r^2$.

Тогда

$$dQ_{1-2} = \frac{b_{01}}{r^2} \cos \beta_1 \cos \beta_2 dF_1 dF_2.$$

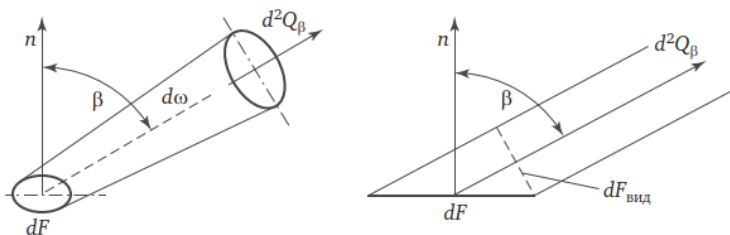


Рис. 5.1. Иллюстрация к закону Ламберта

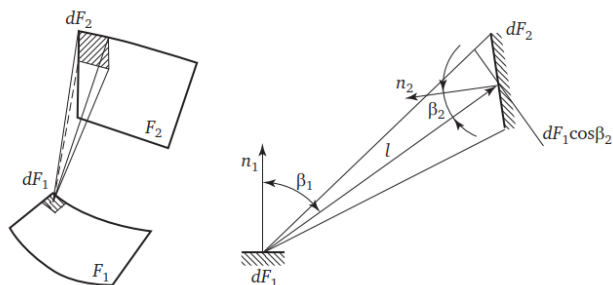


Рис. 5.2. Схема лучистого теплообмена между двумя произвольно расположенными поверхностями

Величину искомого потока, Вт, определим интегрированием этого выражения по поверхностям F_1 и F_2 :

$$Q_{1-2} = b_{01} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{1}{l^2} \cos \beta_1 \cos \beta_2 dF_1 dF_2.$$

Величину потока с поверхности F_2 на F_1 вычисляют по аналогичной формуле.

6. ОГНЕУПОРНЫЕ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

При сооружении печей литейного производства наряду с обычными строительными материалами применяют материалы, предназначенные для работы при высоких температурах в условиях воздействия расплавленных металлов и шлаков, и активных газовых атмосфер. Это керамические материалы (огнеупорные и теплоизоляционные), а также жаростойкие металлы и сплавы, используемые для изготовления узлов и деталей, работающих при высоких температурах и несущих механические нагрузки [3–10].

Огнеупорные керамические материалы применяют также для изготовления электрических нагревателей сопротивления.

Огнеупорными называют материалы, способные противостоять продолжительному воздействию высоких температур (свыше 1000 °С), а также физико-химических процессов, протекающих в печах. Большинство огнеупорных материалов – это физически сложные и химически неоднородные системы с кристаллической и стекловидной фазами. Кристаллы состоят из огнеупорных окислов, таких, как Al_2O_3 , SiO_2 , MgO и т. п., имеющих высокую температуру плавления. В большинстве огнеупорных материалов огнеупорные кристаллы отделены друг от друга стекловидной фазой, однако в некоторых материалах они образуют кристаллический сросток. Сущность производства большинства огнеупорных материалов заключается в превращении мелкодробленой массы исходных огнеупорных материалов в монолит огнеупорного изделия при температурах, более низких, чем температура плавления основных огнеупорных составляющих исходной массы.

Огнеупорные материалы делят на изделия, имеющие определенную форму (кирпичи, фасонные изделия разной сложности, крупноблочные), и неформованные материалы (порошки, массы, бетонные смеси, мартелы и др.).

6.1. Классификация огнеупорных материалов

Установлено шесть основных признаков классификации огнеупорных материалов: химико-минералогический состав, огнеупорность, плотность, способ формования, термическая обработка, форма и размеры.

По химико-минералогическому составу огнеупорные материалы делят на: кремнеземистые, алюмосиликатные (низко, средне- и высокоглиноземистые), магнезиальные, магнезиально-известковые, магнезиально-шпинелидные, магнезиально-силикатные, углеродистые, карбидкремниевые, цирконистые, окисные и неокислородные.

Внутри каждого типа выделены группы, отличающиеся по содержанию определяющих компонентов.

По огнеупорности: огнеупорные материалы бывают огнеупорные (1 580–1 770 °С), высокоогнеупорные (1 770–2 000 °С) и высшей огнеупорности (свыше 2 000 °С).

По плотности: особо плотные (с открытой пористостью до 3 %), высокоплотные (3–10 %) и далее вплоть до легковесных (45–85 %) и ультралегковесных (свыше 85 %).

По способу формования: пластично-формованные, сухоформованные, шликерно-литые, термопластично-прессованные, горячепрессованные, плавлено-литые и пиленые.

По термической обработке: обжиговые и безобжиговые.

По форме и размерам: прямые и клиновые нормальных размеров, фасонные простые, сложные, особо сложные, фасонные крупноблочные массой свыше 60 кг и специальные промышленного и лабораторного назначения.

Область применения огнеупорных материалов определяется их физическими и рабочими свойствами.

Физические свойства огнеупорных материалов.

Пористость и плотность взаимосвязаны; чем выше пористость, тем ниже плотность, и наоборот. Пористость выражают в процентах. Различают пористость кажущуюся или открытую, при которой поры сообщаются с атмосферой; пористость кажущуюся закрытую, при которой поры расположены внутри изделия и не сообщаются с атмосферой, и пористость общую, равную сумме двух первых. Повышенная пористость является причиной повышенной газопроницаемости и пониженной шлакоустойчивости и механической прочности.

Газопроницаемость, находящуюся в прямой зависимости от наличия открытых сквозных пор в изделии, определяют коэффициентом газопроницаемости.

Удельная теплоемкость [кДж/(кг·К)] имеет особое значение для печей периодического действия: чем меньше удельная теплоем-

кость огнеупорных материалов, тем меньше потери теплоты на разогрев футеровки до рабочей температуры.

Теплопроводность [Вт/(м·К)] зависит от природы материала, его пористости, температуры и состояния. Зависимость теплопроводности от температуры описывается формулой

$$\lambda_t = \lambda_0 \pm bt,$$

где b – эмпирический коэффициент;

t – температура, °С.

Теплопроводность большинства огнеупорных материалов увеличивается с повышением температуры.

Электрическая проводимость имеет большое значение для футеровки электрических печей. Подавляющее большинство огнеупорных материалов неэлектропроводны. Их электрическое сопротивление тем выше, чем меньше посторонних примесей в огнеупорном материале. Исключение составляют углеродистые, графитовые и карборундовые изделия.

Магнитная проводимость μ представляет собой отношение абсолютной магнитной проводимости материала к магнитной проводимости вакуума. Чистые огнеупорные материалы являются диамагнитными, т. е. для них $\mu < 1$.

Тепловое расширение при нагреве зависит от природы материала и температуры. Для компенсации теплового расширения в кладке футеровки печи предусматривают зазоры (температурные швы), закрывающиеся по мере разогрева футеровки.

Рабочие свойства огнеупорных материалов.

Огнеупорность является свойством материала противостоять переходу в пластичное или жидкотекучее состояние при высоких температурах. Огнеупорность определяют следующим образом. Из испытуемого материала по ГОСТу изготавливают пироскопы, имеющие форму треугольных усеченных пирамид. Пироскоп в вертикальном положении помещают на подставке в печь и нагревают. С повышением температуры пироскоп размягчается и наклоняется. Температуру, при которой верхний конец пироскопа коснется подставки, называют огнеупорностью данного материала. Пироскоп наклоняется постепенно, так как огнеупорный материал представляет собой многокомпонентную систему и при нагреве ее компоненты размягчаются и расплавляются последовательно, начиная с более легкоплавких.

Деформация под нагрузкой при высоких температурах определяет способность огнеупорных материалов противостоять одновременному воздействию высоких температур и нагрузке на сжатие. Для испытания изделия изготавливают образец высотой 50 мм и диаметром 36 мм. Образец помещают в печь, сжимая под давлением 0,2 МПа, и нагревают. Температуру отмечают при деформации образца 4 и 40 %. Температуру, соответствующую деформации 4 %, называют температурой начала деформации, а температуру, соответствующую деформации 40 %, называют температурой конца деформации.

Температура начала деформации под нагрузкой характеризует строительную прочность огнеупорного материала. Огнеупорные материалы в печах испытывают напряжения сжатия, не превышающие, как правило, 0,2 МПа, поэтому температура начала деформации под нагрузкой практически равна максимальной температуре применения огнеупорного материала.

Различные материалы при высоких температурах ведут себя по-разному. На их деформацию влияют следующие основные факторы: а) наличие или отсутствие прочного кристаллического сростка огнеупорного компонента. Например, высокая температура начала деформации динасовых огнеупорных изделий объясняется прочным огнеупорным сростком кристаллов SiO_2 . В структуре шамотных огнеупорных изделий отсутствует огнеупорный кристаллический сросток, огнеупорные элементы разобщены легкоплавкой фазой, в результате температура начала их деформации ниже, чем у динасовых огнеупорных изделий; б) наличие примесей-плавней: чем их больше, тем ниже температура начала деформации под нагрузкой; в) плотность огнеупорного материала: чем выше плотность, тем больше сопротивление деформации под нагрузкой.

Шлакоустойчивость – свойство огнеупорных материалов противостоять химическому и физическому воздействию шлаков в условиях плавильных и раздаточных печей. Химическое воздействие определяется реакциями, протекающими между огнеупорным материалом и шлаком, а физическое – размывающим действием шлаков по отношению к огнеупорному материалу. Оба эти фактора действуют одновременно. Огнеупорные материалы, так же, как и шлаки, могут быть кислыми, основными и нейтральными. Соответственно подбирают материал для футеровки: при кислых шлаках – кислые огнеупорные материалы; при основных шлаках – основные огнеупорные материалы.

На шлакоустойчивость значительно влияет температура печи. С ростом температуры повышается скорость химических реакций взаимодействия шлаков с огнеупорными материалами, одновременно увеличивается жидкотекучесть шлаков, что также увеличивает их разрушающее действие на огнеупорные материалы.

Смачиваемость огнеупорного материала шлаком значительно влияет на шлакоустойчивость. Чем меньше смачиваемость, тем выше шлакоустойчивость огнеупорного материала.

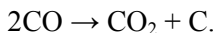
Физические свойства огнеупорного материала тоже влияют на его шлакоустойчивость. Чем больше плотность и меньше пористость огнеупорного материала, тем он более шлакоустойчив.

Термическая стойкость – свойство огнеупорных материалов противостоять резким изменениям температуры, не разрушаясь и не растрескиваясь. Термическая стойкость определяется числом водяных теплосмен. При этом огнеупорный кирпич на 50 мм вводят торцом в печь с температурой 1 300 °С, а затем погружают на ту же глубину в проточную холодную воду (водяная теплосмена). Так повторяют до потери 20 % массы образца. Термическая стойкость огнеупорного материала зависит от многих факторов. Она повышается при увеличении теплопроводности и уменьшается с ростом теплового расширения. Форма и размер огнеупорного изделия также влияют на его термическую стойкость; она тем ниже, чем сложнее форма изделия и больше его размер.

Сопротивление истиранию и удару имеет значение для вагранок, тигельных индукционных печей и т. п. Прочность огнеупорных материалов на истирание устанавливают с помощью истирающих кругов. При испытании определяют, насколько меньше становится масса образца. Сопротивление истиранию обусловлено твердостью основного огнеупорного компонента и материала, цементирующего отдельные зерна кристаллов основного огнеупорного компонента. При низких температурах огнеупорные материалы имеют низкое сопротивление удару. При высоких температурах ударная нагрузка компенсируется размягченным слоем, который образуется на поверхности огнеупорного материала, обращенной в рабочее пространство печи.

Сопротивление воздействию рабочей атмосферы – важное свойство огнеупорных материалов. Газовая атмосфера, заполняющая печное пространство, может быть окислительной, восстановительной и нейтральной.

Окислительной атмосфере хорошо противостоят все огнеупорные материалы, за исключением углеродистых. Восстановительную атмосферу хорошо выдерживают огнеупорные материалы, не содержащие большого количества окислов железа. Окислы железа при температуре 450–600 °С являются катализаторами реакции



Эта реакция приводит к осаждению в порах огнеупорных изделий сажистого углерода и разрушению кладки.

В печах с контролируемой атмосферой применяют смеси газов CO , H_2 , CH_4 , H_2O , N_2 , имеющие в основном восстановительный характер. Этим газам также хорошо противостоят огнеупорные материалы, содержащие минимальное количество окислов железа.

В сушилах содержится повышенное количество водяных паров, которым хорошо сопротивляются плотные огнеупорные изделия.

Плавильная пыль при высоких температурах действует аналогично шлакам.

Все огнеупорные материалы хорошо противостоят действию нейтральной атмосферы.

6.2. Кремнеземистые огнеупорные материалы

Эти материалы используют в природном виде и в виде огнеупорных изделий. Природные кремнеземистые материалы – жильный кварц, кварциты, песчаники – содержат 96–99 % SiO_2 . Огнеупорные изделия – кварцевое стекло и динасовые – содержат SiO_2 не менее 93 и 80 % соответственно.

Для понимания особенностей службы и изготовления кремнеземистых огнеупорных материалов рассмотрим схему модификаций SiO_2 и их термические превращения.

Кремнезем SiO_2 известен в восьми модификациях: кварц α и β ; тридимит α , β и γ ; кристобалит α и β ; кварцевое стекло.

Стабильными модификациями являются кварц α и β , тридимит α и кристобалит α .

На рис. 6.1 вертикальными стрелками обозначены превращения, протекающие с большой скоростью, а горизонтальными – превращения, протекающие с небольшой скоростью.

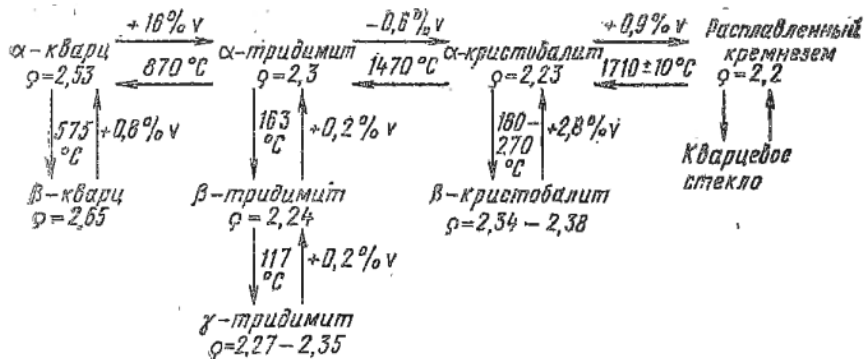


Рис. 6.1. Схема превращений модификаций SiO_2

На схеме приведены также изменения объема материала при превращениях. Для получения огнеупорных материалов необходим максимальный переход модификаций кварца в тридимит, который обладает наименьшим тепловым расширением, наибольшей прочностью сроска кристаллов и наибольшей шлакоустойчивостью. Наибольшие объемные изменения (16 %) при повышении температуры наблюдаются при переходе кварца α в тридимит α .

Лучшие по качеству природные кварциты – цементные и кристаллические кварциты. Цементные кварциты – это твердые породы, состоящие из зерен кварцевого песка, связанных кварцевым цементом. Цемент состоит из зерен вторичного кварца размером $0,001-0,003$ мм. Содержание цемента 15–80 %. Кристаллические кварциты – это породы, состоящие из сплошной массы кварцевых зерен, не содержащих цемента или содержащих его в очень небольших количествах.

Из них изготавливают футеровку тигельных индукционных печей. Наиболее ценными считаются кварциты с плотной структурой.

Основу кварцитов составляет кварц β . Природными кварцитами после соответствующей обработки футеруют печи. Так, из молотого кварцита изготавливают тигли индукционных печей.

В плавильных печах в основном применяют динасовый огнеупорный материал (динас), содержащий не менее 93 % SiO_2 и изготовленный из кремнезема на известковой связке посредством обжига, при котором кремнезем переходит в тридимит и кристобалит.

Процесс изготовления динаса состоит из следующих основных этапов:

1) смешения размолотых кварцитов с известковым молоком и небольшим количеством плавня-минерализатора. Известковое молоко добавляют для придания массе пластичности, необходимой при формовке. Плавень-минерализатор способствует переходу одной кристаллической модификации SiO_2 в другую в процессе обжига;

2) формовки массы для получения фасонных изделий;

3) сушки для удаления физически связанной влаги и придания определенной прочности кирпичам-сырцам, обеспечивающей возможность их транспортирования и обжига;

4) обжига при температуре 1 430 °С. В процессе обжига происходит превращение исходных кристаллических модификаций SiO_2 в тридимит α . Так как внутрикристаллические превращения сопровождаются объемными изменениями обжигаемых изделий, достигающими 3,5–5 %, то нагрев при обжиге и последующее охлаждение производят постепенно по специально разработанным графикам.

Динас после обжига состоит примерно из 70 % тридимита α . Кристаллы SiO_2 составляют кристаллический сросток, пронизывающий все изделие. При охлаждении динаса после обжига опять происходят внутрикристаллические превращения с резким изменением объема изделия. Особенно опасны эти превращения при температурах ниже 700 °С. Основные свойства динаса следующие:

огнеупорность, °С – 1 690–1 710;

температура начала деформации под нагрузкой (не менее), °С – 1 620–1 690;

плотность, т/м³ – 1,8–2;

предел прочности при сжатии, МПа – 17–34;

пористость (не более), % – 21–23.

Динас хорошо противостоит действию кислых шлаков и имеет низкую стойкость по отношению к основным шлакам. Динас обладает низкой термической стойкостью – выдерживает одну-две водяные теплосмены. Футеровка из динаса хорошо работает при высоких температурах, если ее не охлаждать ниже 700 °С. Изделия из динаса характеризуются большим увеличением объема при нагревании и охлаждении, связанным с термическим расширением изделия и модификационными изменениями SiO_2 .

Разработана технология изготовления высокоплотного динаса (98 % SiO_2 , пористость 14 %), который отличается повышенной шлакоустойчивостью. Динасом футеруют своды мартеновских печей, где он подвергается воздействию высоких температур и пыли. Брызги шлака и плавильная пыль взаимодействуют с динасом свода. При этом образуются легкоплавкие силикаты, снижающие стойкость свода. В этих условиях более устойчив высокоплотный динасовый кирпич. Динасом также футеруют своды дуговых сталеплавильных печей. Он находится примерно в тех же условиях, что и в сводах мартеновских печей, но подвергается воздействию больших температурных перепадов. В дуговых печах в период кипения и рафинирования металла температура достигает 1 700–4 800 °С. Температура свода около электродов выше, чем на периферии. Кроме того, дуговые печи более продолжительное время по сравнению с мартеновскими работают при повышенных температурах.

Для сводов дуговых печей применяют электродинас, по качеству приближающийся к высокоплотному.

Динасовые огнеупорные изделия применяют также в бессемеровских конвертерах.

6.3. Алумосиликатные огнеупорные материалы

К алумосиликатным относятся огнеупорные материалы, состоящие в основном из Al_2O_3 и SiO_2 и небольшого количества примесей FeO , CaO , Na_2O и т. д. В зависимости от содержания Al_2O_3 они подразделяются на следующие группы:

- полукислые (не менее 28 % Al_2O_3);
- шамотные (28–45 % Al_2O_3);
- муллитокремнеземистые (45–52 % Al_2O_3);
- муллитовые (72–90 % Al_2O_3);
- корундовые (свыше 90 % Al_2O_3).

Диаграмма состояния системы из чистых окислов Al_2O_3 – SiO_2 дает представление о фазовом составе и свойствах алумосиликатных огнеупорных материалов в зависимости от соотношения в них окислов (рис. 6.2).

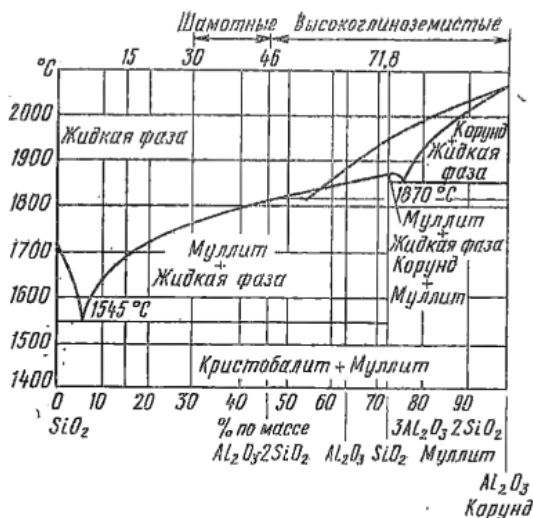


Рис. 6.2. Диаграмма состояния $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

Температуры плавления Al_2O_3 2 050 °С и SiO_2 1 710 °С. При смеси окислов, содержащих 95 % SiO_2 и 5 % Al_2O_3 , образуется эвтектика с температурой плавления 1 545°С; при 79 % Al_2O_3 и 21 % SiO_2 образуется вторая эвтектика с температурой плавления 1 870 °С.

Для всех составов рассматриваемой системы, содержащих 5,5–72 % Al_2O_3 , единственной твердой фазой, устойчивой до температуры 1 910 °С, является муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). При содержании более 72 % Al_2O_3 устойчивыми твердыми фазами являются муллит и корунд. При содержании 72–78 % Al_2O_3 и более муллит образует с корундом твердый раствор. По мере дальнейшего увеличения содержания Al_2O_3 (79–100 %) температура плавления возрастает, достигая 2 050 °С.

Шамотными называют огнеупорные материалы, содержащие 30–45 % Al_2O_3 и изготовленные из огнеупорных глин. Огнеупорные глины имеют огнеупорность не ниже 1 580 °С и содержат не менее 95 % минерала каолинита $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Шамотные огнеупорные материалы стандартизованы по основным свойствам, размерам и внешнему виду. Их свойства:

огнеупорность, °С – 1 580–1 750;

температура начала деформации под нагрузкой, °С – 1 250–1 400;

предел прочности при сжатии, МПа – 19–50;

пористость, % – 30;

термическая стойкость (число водяных теплосмен) 10–15;

усадка при 1 200–1 400 °С, % – 0,7–1.

Шамотные огнеупорные материалы отличаются низкой температурой начала деформации под нагрузкой, заметной усадкой при высоких температурах, значительной пористостью и удовлетворительной термостойкостью.

Шамотные огнеупорные материалы имеют низкую химическую стойкость по отношению к основным и удовлетворительную по отношению к кислым расплавленным шлакам. Применение их в высокотемпературных плавильных печах ограничено. Однако их низкая стоимость и возможность получения из местного сырья способствуют широкому использованию шамотных материалов для изготовления печей, температура в которых не превышает 1 350 °С и где они не контактируют с расплавленными шлаками. Шамотными огнеупорными материалами футеруют шахты вагранок, воздухоподогреватели для вагранок, ковши для металла, нагревательные и термические печи, дымоходы и дымовые трубы.

Муллитокремнеземистые, муллитовые, муллитокорундовые и корундовые огнеупорные материалы содержат 49–90 % Al_2O_3 и выше. Эти огнеупорные материалы называют высокоглиноземистыми. С увеличением содержания Al_2O_3 повышается качество огнеупорных материалов: огнеупорность, термическая стойкость, механическая прочность, плотность, шлакоустойчивость.

Интенсификация режимов работы плавильных печей, печей для выдержки и раздачи металла предъявляет все более высокие требования к огнеупорным материалам в отношении их стойкости к агрессивным расплавам, механическим нагрузкам, воздействию газовых и других сред при высоких температурах. Этим требованиям во многих случаях удовлетворяют высокоглиноземистые огнеупорные материалы, в основном муллитокорундовые и корундовые. Основным сырьем для производства муллитокорундовых и корундовых огнеупорных материалов служит окись алюминия в виде технического глинозема и электрокорунда.

Электрокорунд бывает двух видов: белый с 97–99 % Al_2O_3 и нормальный с 91–93 % Al_2O_3 . Из белого электрокорунда изготавливают корундовые огнеупорные изделия и массы. Для изготовления высокоглиноземистых изделий с меньшим содержанием Al_2O_3 в качестве

сырья используют бокситовые породы и дистен-силиманитовый концентрат. Бокситы и бокситовые глины, представляющие собой породу переходного типа между бокситами и огнеупорными глинами, содержат более 45 % Al_2O_3 . Дистен-силиманитовый концентрат содержит не менее 57 % Al_2O_3 .

Для футеровки индукционных канальных печей используют плотные корундовые изделия, изготавливаемые из электроплавленного белого корунда; технического глинозема, кварцевого песка; дистен-силиманитового концентрата; ортофосфорной кислоты (рис. 6.3).

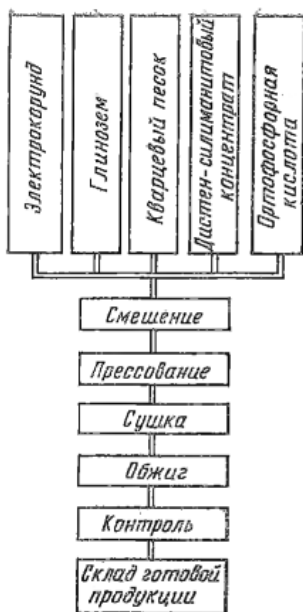


Рис. 6.3. Схема изготовления корундовых изделий

Глинозем, кварцевый песок и дистен-силиманитовый концентрат совместно тонко размалывают в соотношении: 46 % глинозема, 17 % кварцевого песка, 37 % дистен-силиманитового концентрата.

Полученную смесь добавляют к электрокорунду и перемешивают из расчета 70 % электрокорунда и 30 % смеси. После этого добавляют ортофосфорную кислоту в количестве 6 % сверх 100 % сухой смеси. Ортофосфорную кислоту вводят в качестве связующего.

Влажность полученной массы составляет 3 %. Прессование сырых изделий осуществляют на гидравлическом прессе под давлением 100 МПа.

После прессования изделия подвергают сушке при температуре 160–180 °С до остаточной влажности не более 1 %. Высушенные изделия обжигают при температуре 1 700 °С в туннельных печах. Общая продолжительность обжига 100–130 ч. Обожженные изделия после контроля поступают на склад готовой продукции.

Высокоглиноземистые огнеупорные материалы широко применяют в металлургии, в том числе для доменных, мартеновских и высокотемпературных нагревательных печей. Корундовые огнеупорные материалы отличаются высокой устойчивостью к жидким металлам и шлакам. Они обладают высокой термической устойчивостью и механической прочностью.

Корундовыми огнеупорными изделиями футеруют индукционные канальные печи для выдержки и перегрева чугуна. Они имеют следующие свойства:

Al_2O_3 , % – 90;

SiO_2 (не более), % – 8;

температура начала деформации под нагрузкой, °С – 1 700;

предел прочности при сжатии, МПа – 100;

пористость, % – 16.

6.4. Магнезиальные огнеупорные материалы

К ним относятся огнеупорные материалы: магнезитовые (периклазовые) с содержанием не менее 90 % MgO и магнезитовые (периклазовые) на различных связках с содержанием свыше 80 % MgO . Магнезитовые (периклазовые) огнеупорные материалы с содержанием не менее 90 % MgO применяют в виде изделий и в виде порошка. Сырьем для производства магнезитовых изделий служит природный магнезит, который почти полностью состоит из MgCO_3 .

При нагревании до 600–700 °С MgCO_3 разлагается с образованием MgO :



В результате получают мелкие кристаллы MgO , которые при высокой температуре спекаются (рекристаллизуются) в кристаллические сростки. Свойства магнезитового огнеупорного материала:

MgO (не менее), % – 90;

огнеупорность, °C – 2 000;

температура начала деформации под нагрузкой °C – 1 550–1 660;

предел прочности при сжатии, МПа – 44–57;

термическая стойкость (число водяных теплосмен) – 1–2.

Материалы обладают высокой огнеупорностью и температурой начала деформации под нагрузкой. Кроме того, они имеют хорошую химическую стойкость по отношению к основным и железистым шлакам и расплавленным металлам. Качество магнезитовых изделий резко ухудшается при попадании на их поверхность влаги.

При нагревании магнезитовые изделия значительно расширяются.

Магнезитовыми изделиями футеруют плавильные печи, ванны, своды и выпускные отверстия. Периклаз (MgO) в виде порошка применяют для футеровки индукционных канальных плавильных печей. При хранении и транспортировании огнеупорных материалов необходимо исключить попадание на них воды. Кладку магнезитовых огнеупорных изделий желательно проводить насухо или на обезвоженной смоле.

6.5. Магнезиально-известковые огнеупорные материалы

Наибольшее распространение получили доломитовые огнеупорные материалы. Доломитовыми называются огнеупорные материалы, состоящие из MgO и CaO . Доломитовые огнеупорные материалы являются заменителями магнезитовых. Сырьем для производства доломитовых огнеупорных материалов служит природный минерал доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. В природном доломите содержится 21,9 % MgO и 30,4 % CaO . Доломитовые огнеупорные материалы выпускают в виде порошка (металлургический доломит) для наварки и заправки подин сталеплавильных печей и в виде формованных изделий. Они хорошо противостоят действию основных шлаков, отличаются хорошей термической стойкостью. Ниже даны свойства доломитовых огнеупорных материалов:

MgO , % – 30–40;

CaO , % – 60–45;

огнеупорность, °С – 1 800–2 000;

температура начала деформации под нагрузкой, °С – 1 550–1 700;

предел прочности при сжатии, МПа – 19–98;

термическая стойкость (число водяных теплосмен) – 20.

Основной недостаток доломитовых огнеупорных материалов по сравнению с магнезитовыми – пониженная влаغوшлакоустойчивость.

6.6. Магнезиально-шпинелидные огнеупорные материалы

К ним относятся магнезитохромитовые, хромомагнезитовые, хромитовые и шпинельные огнеупорные материалы. *Магнезитохромитовые и хромомагнезитовые* огнеупорные материалы изготавливают из смеси, состоящей из 30–70 % магнезитового порошка и 70–30 % хромита. Обычно шихта для приготовления хромомагнезитовых огнеупорных изделий содержит 40–50 % магнезитового порошка. В процессе обжига при температуре 1 560 °С образуются высокотемпературные соединения типа шпинелей $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ и форстерита $\text{Mg} \cdot \text{SiO}_4$.

Магнезитохромитовые огнеупорные изделия повышенной термической стойкости с содержанием $\text{MgO} > 60\%$ изготавливают из шихты, содержащей до 65 % магнезитового порошка и 35 % хромита. Из такой шихты в результате обжига при температуре 1 650–1 700 °С получают магнезитохромитовые огнеупорные изделия, имеющие повышенную термическую стойкость. Они обладают высокими огнеупорностью (2 300 °С) и температурой начала деформации под нагрузкой (до 1 670 °С) и повышенной термической стойкостью. Магнезитохромитовыми изделиями успешно футеруют своды сталеплавильных печей, своды и поды нагревательных печей.

Хромомагнезитовые огнеупорные изделия содержат 40–60 % Cr_2O_3 ; их применяют там же, где и магнезитохромитовые с учетом их меньшей термической стойкости.

Хромитовые огнеупорные изделия содержат менее 40 % MgO и свыше 25 % Cr_2O_3 . Сырьем для изготовления служат хромит и магнезит. Минерал хромит $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ в чистом виде содержит 32,1 % FeO и 67,9 % Cr_2O_3 . Из хромита изготавливают небольшое количество огнеупорных изделий и применяют его сравнительно редко.

Шпинельные огнеупорные материалы в основном состоят из минерала $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, называемого шпинелью, и содержат 25–40 % Al_2O_3 и 55–70 % Al_2O_3 . Шпинель $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ является огнеупорным соединением с температурой плавления 2 035 °С.

Шпинельные огнеупорные материалы имеют высокую огнеупорность (1 900 °С) и температуру начала деформации под нагрузкой (до 1 800 °С), хорошую термическую стойкость и удовлетворительную стойкость к основным шлакам. Применяются для футеровки отдельных элементов плавильных печей.

6.7. Углеродистые огнеупорные материалы

Углеродистые графитированные материалы содержат свыше 98 % С, углеродистые неграфитированные (угольные) – свыше 85 % С и углеродсодержащие – 5–70 % С. Сырьем для производства служат графит, антрацит, кокс, каменноугольная смола, огнеупорная глина и кварцевый песок. Графит – природный материал, графит лучших месторождений содержит 70–97 % С. Температура плавления графита 3 800 °С, температура начала деформации под нагрузкой 2 000 °С. Графит характеризуется хорошей шлакоустойчивостью и теплопроводностью, но легкой окисляемостью. Из углеродистых (угольных) материалов изготавливают электроды дуговых печей.

Углеродсодержащие огнеупорные материалы изготавливают из смеси: 20–60 % графита, 40–10 % шамота или кварца, 40–30 % огнеупорной глины. Изделия формуют из пластичных или полусухих масс. Во избежание окисления углерода изделия обжигают в керамических капсулах с засыпкой коксовой мелочью. Температура обжига зависит от состава шихты и назначения изделий. Так, тигли обжигают при температуре 900–1000 °С, а разливочные пробки и стаканы – при 1 300–1 350 °С. Изделия характеризуются следующими свойствами:

С, % – 20–25;

огнеупорность, °С – 2 000;

температура начала деформации под нагрузкой, °С – 1 400–1 600;

предел прочности при сжатии, МПа – 12–29;

пористость, % – 28;

термическая стойкость (число водяных теплосмен) – до 45.

Изделия имеют удовлетворительную шлакоустойчивость против основных и кислых шлаков и повышенную теплопроводность. Изделия широко применяют в литейном производстве при плавке и разливке металла.

6.8. Карбидокремниевые огнеупорные материалы

Карбидокремниевые материалы подразделяют на содержащие 70–90 % SiC и 20–70 % SiC. Карбид кремния (карборунд SiC) получают из чистого кварцевого песка и измельченного кокса в электрических печах сопротивления при температуре 2 000–2 200 °С. Чистый кристаллический карбид кремния состоит из 69,1–69,8 % Si и 27,7–30 % C. Карбид кремния хрупок и легко размельчается. При нагреве до температуры 2 300 °С карбид кремния, не размягчаясь и не расплавляясь, разлагается на Si и C. В присутствии кислорода он интенсивно окисляется при температуре 1 700 °С.

Рекристаллизованные карбидокремниевые изделия с содержанием SiC > 90 % изготовляют из измельченного карбида кремния и небольшого количества временной связки, которая выгорает или разлагается при невысоких температурах. Из полученной увлажненной массы формуют изделия под давлением 50–100 МПа. Отформованные изделия сушат и обжигают при температуре 2 300 °С в коксовой засыпке. Во время обжига карбид кремния рекристаллизуется, т. е. отдельные кристаллические зерна спекаются в сплошной кристаллический монолит.

Карбидокремниевые изделия на связке изготовляют из измельченного карбида кремния на какой-нибудь минеральной связке (глине, ферросилиции, кварците и др.). Массу, состоящую из измельченного карбида кремния и связки, формуют и обжигают. Качество карбидокремниевых изделий повышается при замене глинистой связки кварцем или ферросилицием. При содержании в шихте более 85 % SiC ее обжигают без доступа воздуха в муфелях с кварцевой или коксовой засыпкой. Температура обжига зависит от содержания в шихте SiC: чем больше SiC, тем выше температура обжига. Карбидокремниевые изделия характеризуются высокой огнеупорностью, механической прочностью, теплопроводностью, электропроводимостью, хорошо противостоят воздействию металлов и шлаков. Рекристаллизованные

карбидокремниевые изделия имеют более высокие показатели, чем изделия на связке. Ниже приведены свойства карбидокремниевых изделий:

SiC, % – 50–92;

огнеупорность, °С – 1 820–1 860;

температура начала деформации под нагрузкой, °С – 1 650–1 860;

предел прочности при сжатии, МПа – 39–58;

пористость, % – 11–26;

термическая стойкость (число водяных теплосмен) – 50–100;

объемная масса, т/м³ – 2,1–2,6.

Из карбида кремния изготавливают изделия, которые должны иметь высокую огнеупорность в сочетании с высокой механической прочностью, теплопроводностью, электропроводимостью. Карбидокремниевые огнеупорные изделия выпускают в виде кирпичей, плит, труб, электронагревателей, муфелей и т. д., а также в качестве направляющих, по которым проталкивают поддоны в печах для термической обработки и изготовления радиационных труб.

6.9. Цирконистые огнеупорные материалы

Главная составляющая цирконистых материалов – двуокись циркония ZrO_2 . Различают материалы: циркониевые (бадделеитовые) с содержанием свыше 90 % ZrO_2 , бадделеитокорундовые (свыше 30 % ZrO_2 и до 65 % Al_2O_3) и цирконовые на различных связках с разными добавками (свыше 35 % ZrO_2 и свыше 18 % SiO_2). Двуокись циркона в природном состоянии встречается редко. Небольшое распространение в природе имеет минерал циркон, в котором содержится 67,3 % ZrO_2 и 32,9 % SiO_2 . Циркон – химически стойкий материал. Он растворяется лишь в плавиковой кислоте.

Чистый циркон (концентрат) – высококачественное сырье для производства огнеупорных материалов. Цирконистым огнеупорным материалам свойственны постоянство объема при нагреве, высокая температура начала деформации под нагрузкой, хорошая термическая стойкость и шлакоустойчивость. Огнеупорные материалы, изготовленные из концентрата циркона, имеют огнеупорность до 1 800–2 300 °С. Они входят в состав масс, применяемых для набивки сифонов вагранок. Изделия из цирконовых огнеупоров применяют в лабораторных печах. Область их применения ограничена в связи с небольшим объемом производства.

6.10. Легковесные огнеупорные материалы

Легковесные огнеупорные материалы характеризуются высокими огнеупорностью и теплоизоляционными свойствами. Теплоизоляционные свойства обеспечиваются за счет высокой пористости: чем меньше размеры пор и больше их число, тем выше теплоизоляционные свойства. Легковесные огнеупорные материалы выпускают в виде кирпича и фасонных изделий. Они легко поддаются обработке резанием. В то же время из-за достаточно высокой механической прочности их применяют для кладки стен, футеровки заслонок и т. д. Замена обычных огнеупорных материалов легковесными уменьшает потери теплоты через стены печей.

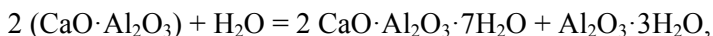
В нашей стране выпускают шамотные, диасовые, высокоглиноземистые и другие легковесные огнеупорные материалы. Температура применения их до 1 500–1 550 °С.

Применение легковесных огнеупорных материалов повышает экономичность работы печей за счет уменьшения потерь теплоты через стены печей и сокращения времени разогрева печей до рабочей температуры из холодного состояния.

6.11. Огнеупорные бетоны и растворы

Огнеупорные бетоны готовят из трех составляющих: цемента (портландцемента, глиноземистого), заполнителя и воды.

Глиноземистый цемент состоит из 45–55 % Al_2O_3 , 48–35 % CaO , 7–8 % SiO_2 и до 5,5 % остальных окислов. Такой цемент используют для бетонов, работающих при температурах 900–1 300 °С; для более высоких температур применяют высокоглиноземистый цемент, содержащий до 60–70 % Al_2O_3 . Заполнителями служат огнеупорные материалы. При 900–1 300 °С используют шамот, при 1 300–1 500 °С хромомagneзит. Для более огнеупорных бетонов применяют высокоглиноземистые заполнители. Глиноземистый цемент, реагируя с водой по реакции



затвердевает и связывает всю массу в единое целое. При нагреве от 400 до 900 °С прочность бетона снижается вследствие процессов де-

гидратации. При температуре 900–1000 °С в бетоне образуется жидкая фаза, способствующая процессу обжига и повышению его прочности. В результате обжига между зернами огнеупорного заполнителя образуются огнеупорные соединения $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и другие, цементирующие всю массу бетона. Для футеровки индукционных плавильных тигельных печей и печей с отъемными индукционными единицами широко применяют огнеупорные набивки – разновидность огнеупорного бетона. Заполнителями служат различные огнеупорные материалы MgO (периклаз), Al_2O_3 (корунд), муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), муллитокорунд и т. п. В качестве связующих служат глиноземистый цемент, огнеупорная глина и др. Набивные элементы футеровки приобретают необходимые качества после сушки и обжига, как правило, непосредственно в печи.

Для придания огнеупорной массе необходимой пластичности при набивке иногда применяют органические связующие или жидкое стекло. Тигли индукционных печей набивают кварцитами. Для горячего ремонта футеровок печей используют торкрет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маляров, А. И. Печи литейных цехов : учебное пособие для вузов / А. И. Маляров. – М. : Машиностроение, 2014. – 256 с.
2. Моргунов В. Н. Печи литейных цехов. Характеристика, анализ, классификация : учебное пособие / В. Н. Моргунов. – Пенза : Изд-во пенз. гос. ун-та, 2009. – 179 с.
3. Долотов, Г. П. Печи и сушила литейного производства : учебник для техникумов / Г. П. Долотов, Е. А. Кондаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1984. – 232 с.
4. Волочко, А. Т. Алюминий: технологии и оборудование для получения литых изделий / А. Т. Волочко, М. А. Садох. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 387 с.
5. Юдкин, А. К. Плавка чугуна в вагранках. / А. К. Юдкин. – М. : Машиностроение, 1989. – 328 с.
6. Мариенбах, Л. М. Печи в литейном производстве / Л. М. Мариенбах. – М. : Машиностроение, 1964. – 356 с.
7. Кривандин, В. А. Металлургические печи / В. А. Кривандин, В. Л. Марков. – М. : Metallurgia, 1977. – 464 с.
8. Электрошлаковый переплав. Раздел курса «Специальные процессы электроплавки» / сост. Е. А. Казачков, А. Д. Чепурной. – Мариуполь : ПГТУ, 1995. – 82 с.
9. Латаш, Ю. В. Электрошлаковый переплав / Ю. В. Латаш, Б. И. Медовар. – М. : Metallurgia, 1970. – 240 с.
10. Павлов, В. А. Спецэлектрометаллургия сталей и сплавов : учебное пособие / В. А. Павлов, Е. Ю. Лозовая, А. А. Бабенко. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 168 с.

Учебное издание

ПЕЧИ ЛИТЕЙНЫХ ЦЕХОВ

Пособие

для студентов специальности

6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование

и производство материалов и изделий из них»

профилизаций «Машины и технология литейного производства»,

«Аддитивные технологии в литейном производстве»

В 2 частях

Часть 1

С о с т а в и т е л и:

САДОХА Мечислав Антонович

РОВИН Сергей Леонидович

РУДНИЦКИЙ Фёдор Иванович

Редактор *А. С. Козловская*

Компьютерная верстка *А. В. Степанкиной*

Подписано в печать 06.03.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 2,92. Тираж 100. Заказ 550.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.