

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Институт повышения квалификации
и переподготовки

Кафедра «Металлургия и технологии обработки материалов»

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

ПОСОБИЕ

для слушателей специальности переподготовки
1-42 01 71 «Металлургическое производство
и материалобработка»
заочной формы обучения

Гомель 2022

УДК 669.041(075.8)
ББК 34.303-51я73
Р24

*Рекомендовано кафедрой «Металлургия и технологии
обработки материалов» ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 9 от 19.10.2021 г.)*

Составитель *В. А. Жаранов*

Рецензент: декан факультета автоматизированных и информационных систем
ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц. *И. И. Сутормя*

Р24 **Расчет** и проектирование металлургических печей : пособие для слушателей специальности переподготовки 1-42 01 71 «Металлургическое производство и материалообработка» заоч. формы обучения / сост. В. А. Жаранов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2022. – 151 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Дана классификация печей, рассмотрены тепловая работа и конструкции нагревательных устройств, энергосбережение и экологические требования при эксплуатации печей.

Для специальности 1-42 01 71 «Металлургическое производство и материалообработка» ИПКиП.

УДК 669.041(075.8)
ББК 34.303-51я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2022

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ПРИНЦИПЫ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧЕЙ.....	7
1.1 Классификация печей по принципу теплогенерации.....	7
1.2 Классификация печей по технологическому назначению и по режиму работы.....	11
1.3 Теплотехника печей металлургического производства.....	13
1.4 Классификация огнеупоров и теплоизоляционных материалов ..	15
1.4.1 Классификация огнеупорных изделий	15
1.4.2 Классификация теплоизоляционных материалов.....	17
1.5 Теплотехнические характеристики огнеупорных и теплоизоляционных материалов	18
1.5.1 Теплотехнические характеристики огнеупорных материалов ..	18
1.5.2 Теплотехнические характеристики теплоизоляционных материалов	22
1.5.3 Новые материалы, которые используются в металлургических печах	23
1.6 Кладка печи. Конструкции сводов, окон и вспомогательных узлов печи, их назначение.....	24
2 ТОПЛИВО И ЕГО СЖИГАНИЕ В ПЕЧАХ.....	26
2.1 Теплота сгорания.....	27
2.2 Принципы сжигания топлива	29
2.3 Организация процесса сжигания топлива	29
2.4 Длина факела	31
2.4.1 Факторы, влияющие на длину факела. Калибр горелки. Выбор типа горелочного устройства с точки зрения нагрева.....	32
2.5 Устройства для сжигания газообразного и жидкого топлива. Классификация сжигающих устройств. Устройства для сжигания топлива: горелки, форсунки	36
2.5.1 Горелки типа "труба в трубе", конструкции ДМетИ, инжекционные и другие. Требования, которые предъявляются к горелкам и форсункам	36

2.5.2 Новое поколение горелок: регенеративные, рекуперативные и рекуперативно-горелочные блоки	41
3 УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ.....	44
3.1 Тепловой баланс печей	45
3.1.1. Тепловой баланс печи непрерывного действия	45
3.2 Вторичные материальные и энергетические ресурсы.....	47
3.2.1 Классификация вторичных энергоресурсов.....	47
3.3 Направления снижения удельного расхода топлива в печах	50
3.3.1 Схемы использования теплоты уходящих газов в печах. Принципы утилизации теплоты	50
3.4 Система испарительного охлаждения печей.....	53
3.5 Испарительное охлаждение	54
3.6. Способы и устройства полезного использования тепла отходящих газов (ВЭР) плавильных и нагревательных печей.....	57
3.6.1 Рекуперация тепла на вагранках 3 – 5 т/ч	60
3.6.2.Использование ВЭР обжиговых печей.....	64
4 РЕКУПЕРАТОРЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ	68
4.1 Схемы рекуператоров: прямоток, противоток, перекрёстный ток	68
4.1.1 Теплообмен и температурные поля в рекуператорах.....	69
4.1.2 Схема расчёта рекуператора.....	73
4.2 Промышленные рекуператоры. Типовые конструкции рекуператоров металлургических печей: керамический рекуператор, металлический петлевой рекуператор, блочный рекуператор и др. ...	73
4.3 Характеристики регенераторов. Схема работы регенеративной системы отопления печей. Достоинства и недостатки регенераторов	77
4.4 Конструкции регенераторов. Насадка регенераторов. Условия эксплуатации регенераторов	79
5 КОНСТРУКЦИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ	82
5.1 Классификация электрических печей.....	82
5.1.1 Печи сопротивления.....	82
5.1.2 Дуговые печи	85
5.1.3 Плазменные печи.....	89

5.1.4 Электронно-лучевые установки.....	92
5.1.5 Оптические печи.....	93
5.2 Электрическая дуга как источник тепловой энергии.....	95
5.3 Электрооборудование дуговых печей.....	99
5.4 Современные технологии интенсификации плавки в дуговых печах сталеплавильного производства.....	107
5.4.1 Способы подачи кислорода и углеродистых порошков в рабочее пространство печи.....	110
5.4.2 Оконные фурмы.....	112
5.4.3 Стеновые фурмы.....	115
5.4.4 Кислородные фурмы для дожигания СО в рабочем пространстве дуговой печи.....	123
5.4.5 Глубинная продувка металла.....	125
5.4.6 Применение газокислородных горелок.....	128
5.4.7. Оценка эффективности использования альтернативных источников тепла при электроплавке.....	132
5.5 Пример расчёта дуговой печи ёмкостью 120 тонн.....	135
5.5.1 Описание технологии выплавки низкоуглеродистых марок стали.....	135
5.5.2 Назначения основных элементов печи.....	137
5.5.3 Определение емкости и расчет геометрических размеров рабочего пространства печи.....	142
ЛИТЕРАТУРА.....	150

ВВЕДЕНИЕ

Промышленная печь – это агрегат для тепловой обработки материалов, а именно, для их нагрева с целью осуществления какого-либо технологического процесса. В металлургических печах производят нагрев до высокой температуры с целью получения металлов и сплавов – чугуна, стали, ферросплавов, цветных металлов, а также для придания металлическим или огнеупорным изделиям требуемых механических свойств. На металлургических предприятиях высокотемпературные печи являются основным технологическим оборудованием.

Печи делят на пламенные и электрические. По технологическому назначению печи делят на следующие виды:

- 1) печи для удаления влаги из материала, например, сушильные печи;
- 2) нагревательные печи, например, нагревательные колодцы и методические печи;
- 3) обжиговые печи, например печи для обжига известняка;
- 4) плавильные печи, например вагранки;
- 5) печи для разложения (диссоциации) и возгонки материалов, например, коксовые печи.

Для нагрева материалов необходимо снабжать печь энергией в форме теплоты и передавать теплоту нагреваемым материалам. Теплотехнический процесс генерации теплоты в печи и передачи её материалам составляет сущность тепловой работы печи.

Технологический процесс может происходить в рабочем пространстве печи одновременно с теплотехническим, как, например, при выплавке металла, обжиге огнеупоров, при термообработке отливок. В другом случае технологический процесс следует за теплотехническим и происходит вне печи, например, при нагреве слитков и заготовок перед обработкой давлением: прокаткой, ковкой, прессованием.

Современные печи представляют собой разнообразные по конструкции, сложные тепловые агрегаты. Они состоят из собственно печи и вспомогательного оборудования. Металлургическая печь включает в себя рабочее пространство и устройства для генерации теплоты: горелки, форсунки, фурмы в топливных печах и электроды, резисторы в электрических печах. В состав вспомогательного оборудования входят устройства для утилизации теплоты и очистки уходящих из печи дымовых газов, вентиляторы, дымососы, трубопроводы с клапанами и задвижками, дымовые трубы, контрольно-измерительные приборы и устройства для управления печью.

1 ПРИНЦИПЫ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧЕЙ

1.1 Классификация печей по принципу теплогенерации

Генерация теплоты в печи происходит путём превращения химической или электрической энергии в теплоту. В зависимости от источника тепловыделения печи делятся (рисунок 1) на топливные, автотенные и электрические.



Рис. 1. Основные признаки, характерные для печей и принятые за основу их классификации.

Топливные печи. В топливных печах источником теплоты является химическая энергия твёрдого, жидкого или газообразного топлива. Теплота выделяется в результате сгорания топлива. Теплоносителями являются газообразные продукты сгорания топлива – дымовые газы.

Топливные металлургические печи подразделяются на два класса: пламенные и слоевые. Рабочее пространство пламенных печей в малой степени заполнено обрабатываемым материалом. Основной объем рабочего пространства заполнен пламенем и дымовыми газами, передающими теплоту материалу. Современные пламенные печи работают на газообразном или на жидком топливе - мазуте. Для сжигания газообразного топлива служат горелки, для сжигания мазута – форсунки. К классу пламенных печей относятся сталеплавильные печи, печи для плавки медных концентратов на штейн, печи для рафинирования меди, разнообразные печи прокатного и кузнечнопрессового производства: нагревательные колодцы, методические, кольцевые, роликовые печи, печи с выкатным подом, вращающиеся трубчатые печи для обжига сыпучих материалов.

Известны три разновидности слоевых топливных печей: с плотным, "кипящим" и со взвешенным слоем обрабатываемого материала.

В вертикальных шахтных печах с плотным слоем (рисунок 2) шихта, в состав которой может входить и твёрдое кусковое топливо, расположена по всему объёму печи и медленно опускается сверху вниз. Горячие газы – продукты горения топлива – движутся через слой между кусками шихты снизу вверх, т. е. в противотоке. Шахтные печи с плотным слоем шихты широко распространены в металлургии. К ним относятся доменные печи, вагранки, печи для производства извести путём обжига известняка, печи никелевых и свинцовых заводов.

В печах с "кипящим" слоем под действием движущихся снизу вверх газов размельчённая шихта, в состав которой может входить и размельчённое топливо, разуплотняется. Отдельные частицы шихты потоком газов поднимаются над слоем подобно кипящей жидкости. Иногда вместе с воздушным дутьём снизу в печь подают газообразное топливо. В цветной металлургии печи с «кипящим» слоем применяют для обжига сульфидных концентратов различных материалов, для сушки глинозёма. В печах со взвешенным слоем обрабатывают материалы, доведённые до пылевидного состояния. Каждая частица материала находится во взвешенном состоянии под действием потока газов, идущего снизу вверх, и движется вместе с потоком. Применяют в этих печах размолотое и газообразное топливо. Их используют в цветной металлургии для плавки сульфидов цветных металлов.



Рис. 2. Череповецкий металлургический комбинат. Доменная печь № 5 «Северянка»

Автогенные печи. Источником теплоты в этих печах является тепловой эффект экзотермических реакций окисления и горения ряда элементов, содержащихся в обрабатываемых материалах. В черной металлургии примером автогенных печей являются кислородные, сталеплавильные конвертеры и двухванные сталеплавильные печи. В них при продувке жидкого чугуна кислородом происходит окисление углерода и ряда других элементов с выделением теплоты. Этот процесс не требует расхода топлива.

В цветной металлургии при производстве материалов из сульфидного сырья основным источником теплогенерации является процесс выгорания серы, содержащейся в сульфидах.

Электрические печи. По способу преобразования электрической энергии в теплоту можно выделить три класса печей, применяемых в металлургии: электродуговые, индукционные и печи сопротивления.

В дуговых печах используется принцип пропускания электрического тока через газовый промежуток между двумя электродами. Под действием электрического напряжения газ между электродами ионизируется и становится электропроводным. При этом в газовом промежутке возникает электрическая дуга, представляющая собой яркосветящуюся смесь электронов, положительных ионов, атомов и молекул. Дуга является зоной, в которой энергия электричества пре-

образуется в теплоту, при этом температура дуги составляет от 3000 до 20000 К.

В индукционных печах используется свойство переменного электрического тока создавать вокруг проводника переменное магнитное поле. Если поместить в такое поле нагреваемое тело, являющееся проводником, то в нем будут индуцироваться вихревые токи. Энергия вихревых токов преобразуется в теплоту, которая выделяется внутри нагреваемого тела.

Работа так называемых печей сопротивления (рисунок 3) основана на действии закона Джоуля-Ленца, согласно которому при протекании тока в проводнике выделяется теплота, пропорциональная его электрическому сопротивлению. В печах сопротивления можно использовать постоянный и переменный ток.



Рис. 3. Пример конструкции промышленной печи сопротивления

В металлургии электрические печи применяют для выплавки стали, производства ферросплавов, для нагрева металла перед обработкой давлением и при термической и термохимической обработке металлоизделий.

1.2 Классификация печей по технологическому назначению и по режиму работы

По технологическому назначению металлургические печи разделяют на плавильные и нагревательные. Плавильные печи служат для получения и переплавки металлов.



Рис. 4. Классификация плавильных печей

В этих печах материалы, как правило, изменяют своё агрегатное состояние. Плавильные печи могут быть чугуноплавильными, сталеплавильными, медеплавильными и т. д.

Нагревательные печи служат для нагрева материалов без изменения их агрегатного состояния. Нагревательные печи применяют в металлургии для обжига огнеупорных изделий, известняка, магнезита, для сушки литейных форм, руды, песка, для придания металлу пластических свойств перед обработкой давлением, для термической обработки металла с целью изменения его структуры и механических свойств.

По режиму работы печи можно разделить на два класса: непре-

рывного и периодического (циклического) действия.

К печам непрерывного действия (см. рисунок 5) относятся рудовосстановительные дуговые печи, шахтные слоевые печи, печи "кипящего" и взвешенного слоя, туннельные печи для обжига огнеупорных изделий, трубчатые вращающиеся печи, такие печи прокатного производства, как методические печи с шагающими подом или балками, кольцевые и роликовые печи. В этих печах технологический процесс идёт непрерывно, материалы, как правило, перемещаются от загрузочных устройств к устройствам для выпуска готовой продукции.



Рис. 5. Классификация печей по принципу действия и конструктивному исполнению.

К печам периодического действия относятся сталеплавильные дуговые печи, конвертеры, нагревательные колодцы, садочные камерные печи с выкатным и с неподвижным подом, применяемые в кузнечнопрессовом производстве и в термических цехах и отделениях. Эти печи работают циклами. Цикл состоит из последовательных операций загрузки шихты или изделий, их тепловой обработки и затем выпуска или выгрузки готовой продукции.

Между циклами проводят подготовительные и текущие ремонтные работы, как, например, заправка подины дуговой сталеплавильной печи или нагревательного колодца, разогрев печи перед началом следующего рабочего цикла.

1.3 Теплотехника печей металлургического производства

Разберём основные элементы печей на примере камерной нагревательной печи (рисунок 6).

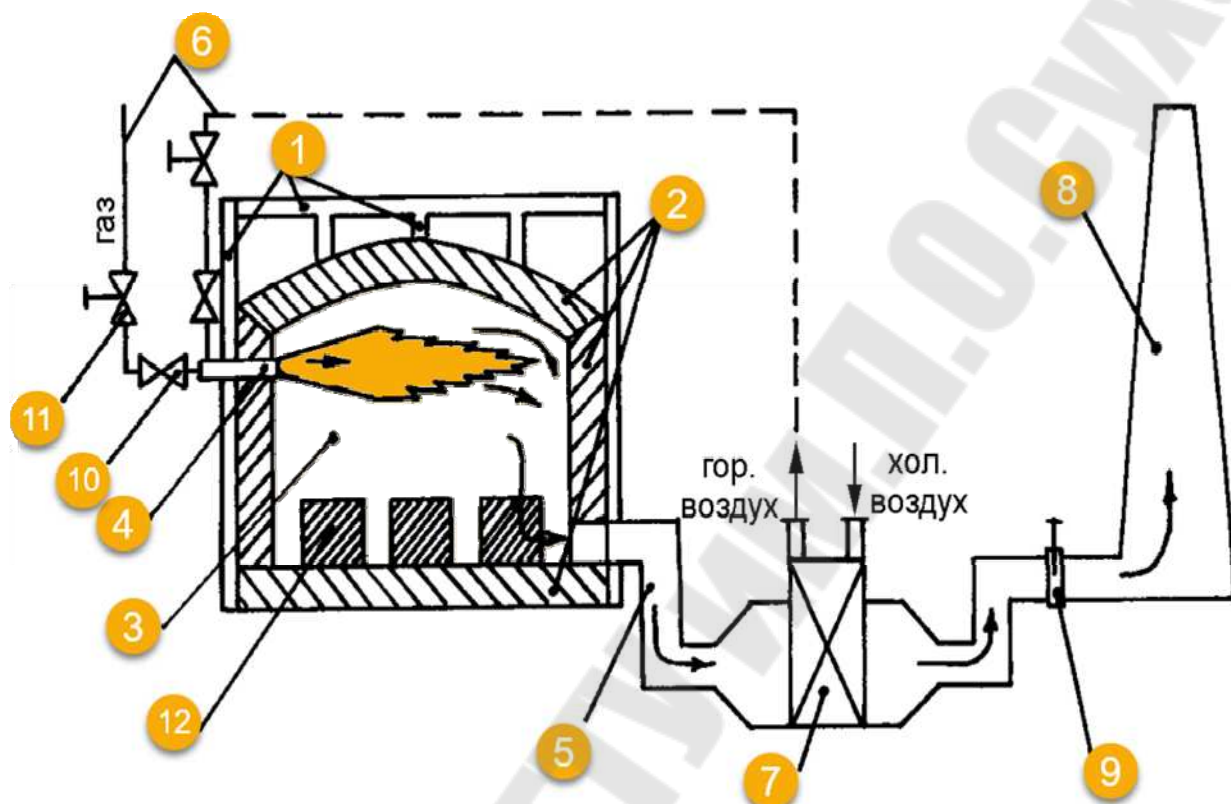


Рис. 6. Основные элементы печи: 1 - металлический каркас; 2 - футеровка (свод, стены, подина); 3 - рабочее пространство печи; 4 - горелка; 5 - бора (дымоходы); 6 - газозухопроводы; 7 - теплообменник; 8 - дымовая труба; 9 - дымовой шибер; 10 - дроссели; 11 - задвижки; 12 - нагреваемый материал

1) металлический каркас – устройство для фиксации элементов печи при её разогреве;

2) футеровка (огнеупорная кладка) – ограждение высокотемпературной зоны, состоящее из стен, свода и подины. Служит для отделения рабочей камеры от окружающего пространства и для уменьшения тепловых потерь. Уменьшение тепловых потерь позволяет получать высокую температуру внутри печи;

3) рабочее пространство печи – замкнутый объем, в котором располагается нагреваемый материал;

4) тепловырабатывающие устройства – устройства для подачи энергии в рабочее пространство печи и преобразования её в теплоту. Устройства для сжигания газообразного и пылевидного твёрдого топ-

лива называются горелками, для сжигания жидкого топлива – форсунками, для сжигания твёрдого топлива в слое – топками. Устройства для преобразования электрической энергии в теплоту называются термоэлектрическими нагревателями (ТЭНы);

5) борова (дымоходы) – дымоотводящие каналы. Служат для удаления продуктов горения из рабочего пространства печи в дымовую трубу;

6) газозовоздухопроводы – трубопроводная система для подачи газа и воздуха к горелкам;

7) теплообменник – устройство для нагрева воздуха и топлива за счёт теплоты, уносимой продуктами горения из рабочего пространства печи (рекуператор или регенератор), а также за счёт сжигания дополнительного топлива (воздухонагреватель доменной печи). В рекуператоре дым передаёт теплоту воздуху (газу) через тонкую керамическую или металлическую разделительную стенку. Дым и воздух (газ) находятся в рекуператоре одновременно. В регенераторе дым и воздух (газ) движутся по одним и тем же каналам: сначала пропускают дым, и теплота передаётся от дыма керамической насадке, а затем пропускают воздух (газ), который принимает теплоту от насадки. Нагрев воздуха (газа) в теплообменнике позволяет получить высокую температуру в рабочем пространстве печи и снизить расходы топлива;

8) дымовая труба – устройство для удаления дыма из рабочего пространства печи в атмосферу. Дымовая труба выполняет две функции: теплотехническую (создание необходимого разрежения) и экологическую (рассеивание вредных выбросов);

9) дымовой шибер – устройство с центральным элементом в виде пластины для регулирования давления дыма в рабочем пространстве печи путём перекрытия поперечного сечения борова. В период максимальной подачи топлива в печь шибер находится в верхнем крайнем положении, т. е. максимально открыт. Шибер служит также для отключения печи от дымовой трубы во время ремонтов печи;

10) дроссели и 11) задвижки – устройства для регулирования расхода газов. Дроссель – устройство для плавного регулирования расхода воздуха и газа через горелки. Задвижка – устройство для отключения газозовоздухопроводов от печи на время её ремонта;

12) нагреваемый материал;

13) тягодутьевые устройства: вентиляторы, компрессоры, дымо-сосы. Служат для подвода к печи газа и воздуха и отвода от печи дыма на дымовую трубу.

Перечисленные основные элементы присущи большинству известных печей. В отдельных печах встречаются дополнительные элементы. Например, перекидные в печах регенеративного типа, транспортирующие устройства для перемещения подины в кольцевых, роликовых печах и печах с шагающими балками и другие устройства.

1.4 Классификация огнеупоров и теплоизоляционных материалов

Огнеупорные изделия применяют для строительства рабочего пространства и других элементов печей, работающих в условиях высоких температур и воздействия агрессивных сред – расплавов, окалины, газов. Чтобы уменьшить потери теплоты, футеровку печи по толщине делают, как правило, комбинированной: рабочий слой выполняют из огнеупорных, наружный слой – из теплоизоляционных изделий.

1.4.1 Классификация огнеупорных изделий

Применяемые в промышленности огнеупоры делят на изделия, которым при изготовлении придаётся определенная форма (кирпичи, фасонные изделия, крупные блоки) и неформованные материалы (бетоны, торкрет-массы, мертели).

В основу классификации огнеупорных изделий положено шесть основных признаков: 1) химико-минеральный состав, 2) огнеупорность, 3) пористость, 4) способ формования, 5) термическая обработка, 6) форма и размеры.

1. По химико-минеральному составу изделия делят на следующие группы, зависящие от содержания оксидов (%), определяющих их свойства:

а) кремнезёмистые: динасовые ($\text{SiO}_2 \geq 93$); кварцевые ($\text{SiO}_2 \geq 85$);

б) алюмосиликатные: полукислые ($\text{SiO}_2 < 85$), шамотные (Al_2O_3 28-45), муллитокремнезёмистые (Al_2O_3 45-62), муллитовые (Al_2O_3 62-72), муллитокорундовые (Al_2O_3 72-90);

в) глинозёмистые – корундовые ($\text{Al}_2\text{O}_3 > 90$);

г) магнезиально-периклазовые (магнезитовые) ($\text{MgO} \geq 85$);

д) магнезиальноизвестковые: периклазоизвестковые (магнезитодоломитовые) (MgO 35-75; CaO 15-40); известковопериклазовые (доломитовые) (MgO 10-50; CaO 45-85);

е) периклазохромитовые ($\text{MgO} > 60$; Cr_2O_3 5-20); хромитопериклазовые (MgO 40-60; Cr_2O_3 15-35); хромитовые ($\text{MgO} < 40$; $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 30$);

ж) периклазошпинельные ($\text{MgO} > 40$; Al_2O_3 5-55); шпинельные (MgO 25-40; Al_2O_3 55-70);

з) магнезиальносиликатные: периклазофорстеритовые (MgO 65-85; $\text{SiO}_2 > 7$); форстеритовые (MgO 50-65; SiO_2 25-40); форстеритохромитовые (MgO 45-60; SiO_2 20-30; Cr_2O_3 5-15);

и) углеродистые с огнеупорной основой С (углеродсодержащие, неграфитированные, графитшамотные);

к) карбидокремниевые с огнеупорной основой SiC (карбидокремниевые, карбидокремнийсодержащие);

л) цирконовые с огнеупорной основой ZrO_2 (цирконовые, циркониевые);

м) окисные с огнеупорной основой Al_2O_3 , TiO_2 , BeO , HfO_2 (корундовые, титановые, берилловые, гафниевые);

н) неокислородные (нитридные, боридные, сульфидные).

На заводах применяют ещё техническую классификацию, в соответствии с которой все огнеупоры разделяются на три группы:

а) кислые (в составе преобладает оксид SiO_2);

б) нейтральные (содержащие высокий процент С или Cr_2O_3);

в) основные (с преобладающим содержанием основных оксидов (MgO , CaO)).

2. По огнеупорности все огнеупоры разделяют на три группы:

а) огнеупорные (огнеупорность 1580-1770 °С);

б) высокоогнеупорные (огнеупорность 1770-2000 °С);

в) высшей огнеупорности (огнеупорность >2000 °С).

3. По пористости:

а) особоплотные (с открытой пористостью до 3 %);

б) высокоплотные (3-10 %);

в) плотные (10-16 %);

г) уплотнённые (16-20 %);

д) среднепористые (20-30 %);

е) повышеннопористые (30-45 %);

ж) легковесные (с общей пористостью 45-85 %);

з) ультралегковесные (с общей пористостью > 85 %).

4. По способу формования:

а) пластичноформованные;

б) полусухого формования из масс малопластичных или из порошков с добавкой связующего материала, изготовленные путём механического, гидравлического или вибрационного прессования; при изготовлении крупных блоков применяется пресстрембование;

в) плавленные литые из расплава, получаемого обычно путём электроплавки;

г) литые, изготовленные путём литья из жидкого шликера в специальные формы (пеноизделия);

д) термопластичнопрессованные, изготовленные прессованием из шихты, в состав которой введены термопластичные добавки (парафин, воск и т.п.);

е) горячепрессованные;

ж) изготовленные горячим прессованием из масс, нагретых до пластичного состояния;

з) пиленные из естественных горных пород или из специально изготовленных блоков;

и) волокнистые, полученные путём расщепления расплава струёй острого перегретого пара.

5. ПО ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ:

а) обожжённые, обжигаемые в печах в процессе изготовления изделий;

б) безобжиговые, не подвергавшиеся обжигу до употребления в кладку;

в) плавленные, подвергнутые отжигу после отливки;

г) горячепрессованные.

6. ПО ФОРМЕ И РАЗМЕРАМ РАЗЛИЧАЮТ:

а) простые изделия (прямые и клиновые нормальных, малых и больших форматов);

б) фасонные – простые, сложные, особо сложные и крупноблочные (массой > 60 кг);

в) специальные – промышленного и лабораторного назначения (тигли, трубки, наконечники и т.п.).

Неформованные огнеупорные материалы классификации, установленной ГОСТом, не имеют.

1.4.2 Классификация теплоизоляционных материалов

Теплоизоляционные материалы делят по ряду признаков на следующие группы:

по огнеупорности – на огнеупорные, выдерживающие рабочую температуру 800 °С, и неогнеупорные, которые могут быть использованы только при температурах ниже 800 °С;

по происхождению – на естественные и искусственные;

по форме и способу применения – теплоизоляционные материалы выполняются в виде изделий (кирпичей, листов и т.д.) или в виде неформованных материалов (засыпки, ваты, волокон и др.).

К огнеупорным естественным теплоизоляционным материалам относятся: диатомит, инфузорная земля, трепел и вермикулит.

К искусственным теплоизоляционным материалам относятся пористые легковесные огнеупоры и изделия из различных волокон. Легковесные изделия могут изготавливаться из шамота, динаса, диатомита, высокоглиноземистого сырья и т.п. Для получения легковесных огнеупоров с высоким процентом равномерно распределённой пористости применяют три различных способа: 1) выгорающих добавок; 2) пеноспособ; 3) химический.

1.5 Теплотехнические характеристики огнеупорных и теплоизоляционных материалов

1.5.1 Теплотехнические характеристики огнеупорных материалов

Огнеупорность определяется как температура $T_{огн}$, при которой происходит деформация стандартного образца в форме усечённой пирамиды при отсутствии механического и физико-химического воздействия. Огнеупорные изделия подразделяют на три группы: средней огнеупорности (огнеупорные) – $T_{огн}$ до 1770 °С; высокой огнеупорности (высокоогнеупорные) $T_{огн}$ от 1770 °С до 2000 °С, высшей огнеупорности – $T_{огн}$ – выше 2000 °С. Предельная рабочая температура службы огнеупоров в условиях эксплуатации T_{max} значительно ниже, чем $T_{огн}$.

В таблице 1 приведены свойства наиболее широко используемых печных огнеупоров. Все огнеупоры характеризуются такими важными эксплуатационными показателями, как термостойкость, шлакоустойчивость, строительная прочность, изменение объёма при нагреве, которые определяют их применение для строительства элементов печей.

Термостойкостью называют способность огнеупоров выдерживать циклическое изменение температур при нагреве и охлаждении, так называемые теплосмены. Термостойкость характеризуют числом теплосмен до потери 20% первоначальной массы огнеупора в результате образования трещин и скалывания.

Шлакоустойчивость характеризует способность огнеупора выдерживать воздействие жидкого шлака и металла, окалины, газов.

Рассмотрим характеристики и область применения некоторых печных огнеупоров.

Динас содержит более 93% SiO_2 и относится к кремнезёмистым, кислым огнеупорам. Обладает высокой строительной прочностью, высокой температурой начала деформации под нагрузкой и соответственно рабочей температурой службы 1650–1700 °С. Устойчив к воздействию кислых расплавов и газовых сред, но не выдерживает контакта с основными расплавами металлов и их оксидов. Термостойкость динаса по стандартной методике не превышает 1-2 водяных теплосмен. Однако, если колебания температуры происходят в области значений выше 300 °С и особенно выше 600 °С, то термостойкость динаса исключительно высока.

Динас широко применяют для изготовления высокотемпературной части насадки доменных воздухонагревателей и регенераторов нагревательных колодцев, которая не охлаждается ниже 600 °С, для кладки распорных сводов.

Шамот относится к алюмосиликатным огнеупорам, содержащим кроме SiO_2 до 45% Al_2O_3 . Обладает более высокой термостойкостью (10-20 водяных теплосмен), но низкой шлакоустойчивостью. Наиболее широко применяется в печестроении при температурах до 1350 °С для строительства стен, сводов, не контактирующих с оксидами металлов, для низкотемпературной части регенеративной насадки. Не выдерживает истирающего действия при высоких температурах.

Муллит и корунд относятся к высокоглинозёмистым алюмосиликатным огнеупорам. По мере увеличения содержания Al_2O_3 повышается их рабочая температура службы, прочность и постоянство объёма при разогреве. Термостойкость превышает 150 водяных теплосмен. Применяются вместо шамота в условиях более высоких температур: муллит – до 1650 °С, корунд – до 1800 °С. Плавленные корундовые изделия обладают высокой шлакоустойчивостью и выдерживают давление и истирающее действие металла и шихты. Применяются в установках внепечной обработки стали, в монолитных подинах методических нагревательных печей, в качестве насадки шариковых регенераторов.

Периклаз (или магнезит) содержит не менее 85% MgO . Температура начала размягчения под нагрузкой значительно ниже огнеупорности. Максимальная рабочая температура 1700 °С. Термостойкость изделий невысока и составляет 1-2 водяных теплосмены.

Таблица 1

Свойства огнеупоров, наиболее широко используемых в печах

	Группа огнеупоров	Главные хим. компоненты в % (мас.)	$T_{огн}, ^\circ\text{C}$	$T_{max}, ^\circ\text{C}$	Плотность – $\rho, \text{т/м}^3$	Коэф. теплопроводности – $\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при 100°C	Уд. теплоёмкость – $c, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ при 100°C
1	Динасовые	$\text{SiO}_2 \geq 93$	1690-1720	1650-1700	1,84-1,97	1,3	0,86
2	Шамотные	$30 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 45$	1580-1750	1200-1400	1,83-1,95	0,9	0,9
3	Муллитовые	$62 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 72$	1600-1800	1600-1650	2,34-2,52	1,2	0,86
4	Корундовые	$\text{Al}_2\text{O}_3 > 90$	1950-2000	1650-1800	2,89-3,12	2,1	0,83
5	Смолодоломитовые	$50 < \text{MgO} < 85$ $10 < \text{CaO} < 45$	1800-1900	1300-1400	2,7-2,8	3,4	0,96 при 1000°C
6	Периклазовые (магнезитовые)	$\text{MgO} \geq 85$	2200-2400	1650-1700	2,6-2,8	4,5	1,08
7	Периклазохромитовые	$\text{MgO} \geq 60$ $5 \leq \text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 20$	2000	1650-1700	2,95-3,04	2,5	1,0
8	Хромитопериклазовые	$40 \leq \text{MgO} \leq 60$ $15 < \text{Cr}_2\text{O}_3 < 35$	1920-2000	1700	2,9-3,15	2,0	$1,8 \div 1,15$ (20- 1000°C)
9	Циркониевые	$\text{ZrO}_2 > 50,$ $\text{SiO}_2 > 25$	2000-2300	1900-2000	3,48-3,83	1,4	0,64
10	Карбидокремниевые	$\text{SiC} > 70$	2000	1800-2000	2,35-2,54	9,3 при 1000°C	0,97

Шлакоустойчивость по отношению к основным расплавам – металлам и шлакам, богатым оксидами металлов и известью, исключительно высока. Поэтому магнезитовые кирпичи используются для кладки элементов печей черной и цветной металлургии, которые контактируют с расплавами металлов и основных шлаков. Магнезитовый порошок используют для заполнения швов при кладке подин плавильных печей.

Периклазохромитовые и хромитопериклазовые огнеупоры содержат в качестве основы MgO и хромит Cr_2O_3 . Свойства этих огнеупоров существенно отличаются от периклазовых и зависят от соотношения хромита и магнезита. Максимальная термостойкость

соответствует отношению $\text{Cr}_2\text{O}_3:\text{MgO} = 30:70$. Шлакоустойчивость выше при содержании хромита 20 %. В сводах сталеплавильных печей наибольшую стойкость имеют изделия с содержанием хромита 20-30 %. Они изнашиваются из-за образования трещин и сколов, к которым приводят термические напряжения, возникающие при колебании температуры в рабочем пространстве печи.

Смолодоломитовые безобжиговые огнеупоры содержат в качестве основы MgO и CaO , а также углерод в виде смоляной связки в количестве 2-4 %. Они применяются для футеровки конвертеров. Известь CaO взаимодействует с силикатами конвертерного шлака, благодаря чему на поверхности футеровки образуется гарниссаж, препятствующий проникновению шлака в футеровку.

Углеродистые огнеупоры изготавливаются из доступного сырья – графита, кокса – с высокой температурой плавления ≥ 3500 °С. Они не смачиваются расплавами и поэтому устойчивы против них, имеют высокую термостойкость, но начинают окисляться в продуктах горения топлива при температуре ≥ 600 °С. Поэтому их используют для службы в восстановительной среде: в электрических печах для производства ферросплавов, алюминия, свинца, в лещади доменных печей, в качестве припаса для разливки металлов, для изготовления электродов дуговых плавильных печей.

Карбидкремниевые огнеупоры содержат в качестве главного компонента SiC – карборунд. Они покрыты защитной плёнкой SiO_2 , поэтому не окисляются как углеродистые. Имеют высокую прочность, износостойчивость, термостойкость. Устойчивы против нейтральных и кислых расплавов, нестойки против основных. Применяются для изготовления трубок керамических рекуператоров, огнеупорных муфелей.

Неформованные огнеупоры применяют для изготовления монолитных футеровок из огнеупорного бетона и набивных масс. Огнеупорный бетон представляет собой смесь огнеупорного наполнителя (бой огнеупорных изделий) с размером частиц от 0,5 до 70 мм, вяжущего и добавок. В качестве вяжущего используют твердеющие в холодном состоянии огнеупорные цементы (глинозёмистый, магнезиальный), жидкое стекло, фосфатные связки на основе ортофосфорной кислоты H_3PO_4 . Добавки могут регулировать скорость схватывания и твердения, улучшать пластические свойства, уменьшать усадку.

Широко распространены динасовые бетонные блоки и панели для стен нагревательных колодцев, глинистокварцитовые массы для на-

бивной футеровки ковшей. Применяют монолитную футеровку стен и сводов нагревательных печей из жидкого (литого) бетона с креплением её к металлическому каркасу печи с помощью анкерных кирпичей, распределённых по площади стен и свода.

Защитные гарниссажи образуются на рабочей поверхности ограждения плавильных, шахтных и дуговых печей из спекающихся или расплавленных материалов при интенсивном охлаждении стен печи водой или воздухом. В плавильных печах цветной металлургии гарниссаж является эффективным средством защиты, а иногда и замены футеровки.

1.5.2 Теплотехнические характеристики теплоизоляционных материалов

Для тепловой изоляции металлургических печей применяются три вида изделий: 1) легковесные пористые огнеупорные кирпичи: шамот-легковес, динас-легковес, диатомитовый и другие; 2) теплоизоляционные засыпки; 3) изделия в виде плит, ваты, войлока, картона, изготовленные на основе керамического волокна в смеси со связующим материалом, так называемые волокнистые огнеупоры. Волокнистые огнеупоры являются относительно новыми теплоизоляционными материалами.

Легковесные огнеупорные кирпичи обладают большой пористостью и поэтому меньшей плотностью и теплопроводностью, чем обычные огнеупорные кирпичи (таблица 2). Марка кирпича в таблице 2 расшифровывается так: Д – динас, Ш – шамот, Л – легковес, числа после тире означают плотность. Чем меньше плотность кирпича, тем лучше его теплоизоляционные свойства, но ниже максимальная рабочая температура.

По сравнению с обычными огнеупорами шамот-легковес и другие легковесы имеют более низкую прочность, шлакоустойчивость и термостойкость. Их можно применять не только для теплоизоляционного слоя футеровки, но и для рабочего слоя, в термических печах. Диатомитовый кирпич применяют только для наружного слоя тепловой изоляции стен и свода нагревательных печей.

В качестве засыпок используются, в основном, естественные теплоизоляционные материалы: диатомит, инфузорная земля, трепел и вермикулит. Первые три материала имеют состав $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Диатомит – продукт разложения водорослей, имеет рыхлую землистую структуру. Применяют в виде порошка или изделий, изготовленных на глинистой связке: плотность изделий 500, 600 и 700 кг/м³,

коэффициент теплопроводности соответственно равен 0,18, 0,21, 0,27 Вт/(м·К). Коэффициент теплопроводности засыпки из диатомита колеблется в пределах 0,12-0,16 Вт/(м·К). Предельная температура применения диатомитовых изделий 1000 °С, засыпки 900 °С.

Таблица 2

Свойства легковесных огнеупорных изделий

№ п/п	Тип и марка изделия	Плотность – ρ , т/м ³	$T_{\text{раб}}$, °С	Коэф. теплопроводности – λ , Вт/(м·К)	Уд. теплоёмкость – c , кДж/(кг·К) в интервале 0-1400 °С
1	Динас ДЛ-1,2	1,2	1500	$0,58+0,38 \cdot 10^{-3} \cdot t$	1,19
2 3 4	Шамот ШЛ-1,3 ШЛ-0,9 ШЛ-0,4	1,3 0,9 0,4	1350 1200 1100	$0,47+0,14 \cdot 10^{-3} \cdot t$ $0,29+0,20 \cdot 10^{-3} \cdot t$ $0,06+0,14 \cdot 10^{-3} \cdot t$	1,19 1,17 1,17
5	Диатомитовый кирпич	0,5	1000	0,15 (при $t=350$ °С)	1,0

Инфузорная земля является продуктом разложения животных организмов; применяют чаще в виде порошка.

Трепел – продукт выветривания горных пород, пористый материал с низкой теплопроводностью; применяют в виде порошка или изделий. По свойствам изделия из трепела близки к диатомитовым.

Вермикулит — это разновидность слюды, имеющая способность при нагреве значительно увеличивать свой объем. Используют вермикулит в виде засыпки или в виде плит. Применяется до температуры 700-900 °С. В обожжённом виде носит название – зонолит. Предельная температура применения зонолита 1000-1100 °С. Коэффициент теплопроводности вермикулита и зонолита 0,1 Вт/(м·К).

К неогнеупорным изоляционным материалам относится асбест. Асбест является водным силикатом магния состава $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, имеет волокнистое строение, пористый. Применяют в виде крошки для засыпки или в виде изделий – шнура, картона, плит, ткани и ваты.

1.5.3 Новые материалы, которые используются в металлургических печах

В таблице 3 представлены некоторые виды волокнистых огнеупорных изделий и их свойства. Волокнистые плиты, как и шамот-

легковес, применяют для изготовления не только изоляционного, но и рабочего слоя футеровки термических печей с целью снижения потерь теплоты в рабочем пространстве печи. При этом уменьшаются два вида потерь: на аккумуляцию теплоты футеровкой и теплопроводностью через футеровку в окружающую среду.

Таблица 3

Виды волокнистых огнеупорных изделий

№ пп	Тип и марка изделия	Толщина, мм	Плотность – ρ , т/м ³	$T_{\text{раб}}^{\text{max}}$, °С	Коэф. теплопроводности – λ , Вт/(м·К) при 600 °С	Уд. теплоёмкость – c , кДж/(кг·К)
1	Плита ШПГТ-450	100	0,45	1300	0,2	1,0
2	Вата МКРР-130	15; 20	0,13	1250	0,22	1,0
3	Войлок МКРВЦ-150	15; 20	0,15	1400	0,14	1,0
4	Фетр МКРВЦФ-130	15; 20	0,13	1400	0,18	1,0

1.6 Кладка печи. Конструкции сводов, окон и вспомогательных узлов печи, их назначение

Ограждение печей из огнеупорных и теплоизоляционных материалов называется кладкой или футеровкой. Футеровка является ответственной частью всех промышленных печей. От её службы зависит надёжность работы печи и длительность кампании. Элементами футеровки являются под, стены и свод.

Кладка должна быть, по возможности, непроницаемой для расплавленных металлов и шлаков, а также для печных газов.

В зависимости от требуемой тщательности работы кладку разделяют на категории, для каждой из которых допустимая толщина шва строго регламентирована:

а) особо тщательная, со швами толщиной не более 1 мм – для футеровки плавильных печей в местах возможного контакта с жидкой средой;

б) тщательная, со швами толщиной не более 2 мм – для футеровки, подвергающейся истирающему воздействию и для нагревательных печей с температурой до 1400 °С;

в) обыкновенная, со швами толщиной не более 3 мм – для футеровки, не контактирующей с жидким металлом и шлаком, и для нагревательных печей с температурой до 1200 °С;

г) простая, со швами толщиной до 4 мм – для выполнения нижних слоёв пода.

Рабочий слой футеровки в местах, где требуется наибольшая плотность, выкладывают особенно тщательно со швами не более 0,5 мм. При кладке борцов допускается шов толщиной до 5 мм, а при наружной облицовке печи красным или изоляционным кирпичом толщину шва принимают равной 8-10 мм. Кирпич в кладке может располагаться по-разному – на плашку, на торец или на ребро (рис. 1.2) с обязательным смещением швов (с перевязкой). Это делает кладку более устойчивой и плотной. Огнеупорный слой кладки с теплоизоляционным обычно не перевязывают, так как они имеют разные коэффициенты термического расширения, что при нагреве кладки может привести к её разрушению.

Для компенсации термического расширения кладки в ней предусматривают температурные швы, размеры которых зависят от рабочей температуры и от применяемого для кладки материала. Ширина термических швов колеблется в пределах от 5 до 15 мм на 1 м кладки.

2 ТОПЛИВО И ЕГО СЖИГАНИЕ В ПЕЧАХ

Преобразование химической энергии топлива в теплоту происходит в процессе горения, который представляет собой цепную реакцию окисления горючих элементов топлива. Горение топлива – химическая реакция соединения горючих элементов топлива с окислителем при высокой температуре, сопровождающийся интенсивным выделением теплоты. В качестве окислителя используют кислород воздуха.

Продукты горения топлива в печах должны быть газообразными и безвредными для человека и природы. До недавнего времени считалось, что этим требованиям удовлетворяют два химических элемента – углерод (С) и водород (Н), а также их химические соединения – углеводороды. К настоящему времени выяснилось, что без – вредным топливом является только водород, в результате горения которого образуются пары воды. Продукт горения углерода CO_2 , десятилетиями накапливаясь в атмосфере, создаёт вокруг земли "парниковый эффект", изменяющий климатические условия, что может привести к экологической катастрофе. Мировое сообщество осознало эту опасность и с 90-х годов прошлого века принимает меры по сохранению объёма использования углеродного топлива на существующем уровне.

Процессы горения разделяют на 2 группы:

1). гомогенное горение – горение газообразных горючих (характеризуется системой "газ + газ");

2). гетерогенное горение – горение твёрдых и жидких горючих (характеризуется системой "твёрдое тело + газ" или "жидкость + газ").

Процесс горения может протекать с разной скоростью – от медленного до мгновенного. Медленное горение – самовозгорание твёрдого топлива при его хранении на складах. Мгновенное горение представляет собой взрыв. В теплоэнергетических установках практическое значение имеет такая скорость реакции, при которой происходит устойчивое горение, т. е. при постоянной подаче в зону горения топлива и окислителя. При этом соотношение концентрации топлива и окислителя должен быть определенным. При нарушении этого соотношения (богатая смесь, бедная смесь) скорость реакции снижается и уменьшается тепловыделение на единицу объёма.

Горение – это в основном химический процесс, т. к. в результате его протекания происходит качественные изменения состава реагирующих масс. Но в то же время химическая реакция горения сопро-

вождается различными физическими явлениями: перенос теплоты, диффузионный перенос реагирующих масс и др.

2.1 Теплота сгорания

Это наиболее важная характеристика топлива.

Теплота сгорания показывает, какое количество теплоты выделяется при полном сгорании единицы топлива. Для твёрдого и жидкого топлива такой единицей служит 1 кг, для газообразного – 1 м³ при нормальных условиях. Единица измерения теплоты сгорания – Дж/м³ или кратные единицы кДж/кг, кДж/м³, МДж/кг, МДж/м³. Используют также внесистемную единицу ккал/кг и ккал/м³ (1 ккал = 4,187 кДж).

Твёрдое и жидкое топливо содержит следующие элементы: углерод (С), водород (Н), кислород (О), азот (N), серу (S), а также золу (А) и влагу (W). Содержание каждого элемента измеряется в % массы. Различают органическую, горючую, сухую и рабочую (влажную) массу топлива. В таблице 4 представлен их элементарный состав и обозначение (индекс).

Газообразное топливо состоит из смеси газов, содержание которых измеряют в % объёма. Различают составы сухого и влажного (рабочего) газа.

Теплоту сгорания обычно относят к 1 м³ влажного (рабочего) газа и к 1 кг влажного (рабочего) твёрдого и жидкого топлива. Её обозначают Q_p. В зависимости от агрегатного состояния H₂O в продуктах горения теплота сгорания топлива может быть высшей или низшей.

Если H₂O в продуктах горения находится в виде водяного пара, то теплота сгорания будет низшей, так как она не включает теплоту конденсации пара 2257 кДж/кг. В высшую теплоту сгорания включают теплоту конденсации пара, образовавшегося при горении единицы топлива, и теплоту, выделяемую водой при охлаждении её от 100 °С до ~ 40 °С при атмосферном давлении. Поэтому разница между 1 кг H₂O. Температура дымовых газов, уходящих из металлургических печей, превышает 100 °С, поэтому пар в них не конденсируется.

Таблица 4

Элементарный состав твёрдого и жидкого топлива

Индекс	С	Н	N	О	S	А	W
О	органическая масса						
Г	горючая масса						
С	сухая масса						
Р	рабочая (влажная масса)						

Кокс – твёрдое топливо для доменных печей - производится на коксохимических предприятиях путём термической обработки (коксования) каменного угля в коксовых печах (батареях). Каменный уголь нагревают до 800°C без доступа воздуха, при этом из него выделяются смолы, газообразные вещества (летучие), и в печи остаётся кокс – твёрдый остаток в виде отдельных кусков. Теплота сгорания кокса зависит от количества золы и влаги. В среднем она равна 29,3 МДж/кг.

Природный газ поступает на предприятия с помощью компрессорных установок по газопроводам. Он содержит 92-98% метана (СН₄) и имеет высокую теплоту сгорания 33-38 МДж/м³. Наиболее бедным газообразным топливом является **доменный газ**, который получают при выплавке чугуна. В его составе только третья часть объёма содержит горючие вещества, в основном СО.

Основной вид жидкого металлургического топлива – мазут. Это продукт перегонки нефти. Его привозят на металлургические предприятия с нефтеперегонных заводов в железнодорожных цистернах, из которых сливают в цеховые мазутохранилища. По содержанию горючих веществ мазут относится к богатым видам топлива. Теплота сгорания мазута составляет 40-42 МДж/кг.

Условное топливо. На металлургических предприятиях для отопления печей используют разные виды топлива. Для эквивалентного учёта и сопоставления расходов топлива с различной теплотой сгорания было предложено вести учёт расхода топлива не в м³ газа или в кг мазута, кокса, а в кг условного топлива, теплота сгорания которого равна $Q_{\text{усл.т}} = 29,3$ МДж/кг. Это равносильно тому, что учёт будут вести по количеству теплоты топлива Q в мДж, израсходованной на производство продукции, но в более осязаемой форме – в килограммах или тоннах условного топлива.

Температура горения топлива. Если бы вся теплота, которая выделяется при полном сгорании топлива, шла только на нагрев образующихся продуктов сгорания, то они могли бы нагреться до максимальной для данного топлива температуры, которую называют калориметрической. По этой условной температуре, которую определяют расчётным путём, судят, пригодно ли данное топливо для применения в данной печи. При этом учитывают, что действительная температура продуктов сгорания может достигнуть не более 65-75% калориметрической, так как часть теплоты сразу же при горении топлива отдаётся

в печи продуктами сгорания нагреваемым материалам и огнеупорному ограждению (футеровке).

2.2 Принципы сжигания топлива

Чтобы топливо и кислород вступили в реакцию, они должны быть предварительно перемешаны и смесь должна иметь температуру воспламенения. Скорость комплексного процесса определяется наиболее медленным звеном. Химические реакции, как правило, протекают с большой скоростью. Перемешивание молекул и горючего происходит медленнее, чем горение.

Имеют место два способа сжигания топлива – факельный и слоевой. По факельному способу сжигается газообразное, жидкое и пылевидное топливо. По слоевому методу сжигают твёрдое топливо. В большинстве печей топливо сжигается факельным способом. Слоевого способ используется в доменной и агломерационной печи, вагранках, паровых котлах небольшой мощности.

2.3 Организация процесса сжигания топлива

Факел, в отличие от обычной струи, рассмотренной в механике газов, представляет горящую струю. Проще всего под длиной факела $L_{\text{фак}}$ подразумевать, расстояние от горелки, на котором практически заканчивается полное горение топлива.

Факел образуется при смешении газового и воздушного потоков. По месту встречи и характеру перемешивания потоков различают 3 метода сжигания газов:

1 метод. Газ и воздух встречаются вне горелочного устройства (в рабочем пространстве печи) и перемешиваются в рабочем пространстве печи в процессе горения. Воздух и газ могут быть нагреты до высокой температуры. Длина факела зависит от многих факторов. Желательно, чтобы длина факела $L_{\text{фак}}$ была меньше длины рабочего пространства печи. Этот метод используется в горелках типа "труба в трубе".

2 метод. Газ и весь воздух, необходимый для полного горения топлива, перемешиваются друг с другом до вылета в рабочее пространство печи. Это возможно, если температура образующейся смеси меньше температуры воспламенения, тогда газ не может гореть внутри горелочных устройств, если скорость распространения пламени меньше скорости истечения смеси. Длина факела весьма мала и способ называют беспламенным или бесфакельным. Этот метод используется в инжекционных и скоростных горелках.

3 метод. Предварительное перемешивание газа с частью воздуха, необходимого для полного сжигания топлива. Окончательное перемешивание смеси с остальной частью воздуха в рабочем пространстве печи в процессе горения. Регулируя процесс предварительного перемешивания, можно управлять длиной факела. Этот метод используется в большинстве горелок, типа горелок нагревательных колодцев, плоскопламенных и др. Подобные горелки применяются и в кухонных плитах.

Факельное сжигание. Различают ламинарный и турбулентный факел. При ламинарном факеле контакт горючего с кислородом воздуха происходит на поверхности струи. Внутренние слои газа не соприкасаются с кислородом. В ламинарном факеле по его сечению можно выделить две зоны: зону горючего газа и зону продуктов сгорания. На границе зон происходит горение топлива. Таким образом, имеет место послойное включение слоёв газа в процесс горения. Фронт горения постепенно приближается к оси струи.

При турбулентном факеле отсутствует послойное выгорание газа в струе. Внешний вид и структура факела определяется свойством турбулентной струи захватывать окружающую среду, перемешиваться с этой средой и проталкивать её вперёд. Поэтому турбулентная струя газа после вылета из сопла горелки – устройств для сжигания газообразного топлива – приобретает форму конуса. По своей структуре турбулентная струя представляет совокупность хаотично перемещающихся макрочастиц, объединённых в одно целое силами вязкости и общим направлением движения. Значения критерия Рейнольдса, при котором начинается переход от ламинарного факела к турбулентному, зависит от природы газа и диаметра сопла. Хорошо развитый турбулентный факел имеет место при $Re_{кр} > 8000-10000$. Для водорода $Re_{кр} = 3000$.

При поджигании турбулентной струи горючего газа процесс горения начинается на поверхности струи. Образующиеся здесь продукты сгорания вовлекают в своё движение макрочастицы воздуха и вместе с ними проникают вглубь струи. Таким путём постепенно очаги горения возникают и внутри струи. Процесс горения из поверхностного превращается в объёмный. Вследствие хаотичности турбулентного перемешивания очаги горения в каждом элементарном объёме факела возникают дискретно. Они то появляются, то исчезают. При зрительном восприятии большого числа близко расположенных и дискретно появляющихся очагов горения в объёме факела они

сливаются воедино и турбулентный факел представляется в виде сплошной конусной струи горящего газа.

2.4 Длина факела

Ламинарные факелы не встречаются в практике работающих печей. Между тем, теория турбулентного факела разработана для факела, развивающегося в неограниченной неподвижной воздушной среде или движущейся со скоростью W_v .

Часто для определения длины факела используются закономерности изотермической струи. Путь, на протяжении которого газовая струя захватывает для горения стехиометрическое количество воздуха L_v^d , И.Д. Семикин назвал длиной пути захвата $L_{зах}$. В конце пути захвата смесь весьма неоднородна. Свободный кислород находится в периферийных слоях, а горючий газ сосредоточен в центральном ядре факела. Для завершения процесса полного горения требуется определенный дополнительный путь – длина пути перемешивания $L_{пер}$. Общая длина факела равна

$$L_{фак} = L_{зах} + L_{пер}. \quad (2.1)$$

Длина захвата $L_{зах}$ определяется из формулы для расчета расхода газа в свободной затопленной струе по известной величине смеси газа и захваченного воздуха

$$\frac{m_{см}^{зах}}{m_0} = \frac{m_{газ} + m_{воз}^{гор}}{m_{газ}} = 1 + \frac{L_v^d \cdot \rho_{в0}}{\rho_{г0}} = 3,16 \cdot \frac{L_{зах}}{d_0} \quad (2.2)$$

в виде:

$$L_{зах} = \frac{1}{0,316} \cdot d_0 \cdot \left(1 + \frac{L_v^d \cdot \rho_{в0}}{\rho_{г0}} \right) = 3,16 \cdot d_0 \cdot \left(1 + \frac{L_v^d \cdot \rho_{в0}}{\rho_{г0}} \right), \quad (2.3)$$

где L_v^d – объем воздуха для сжигания 1 м^3 газа при нормальных условиях ($t_v = t_r = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_v = P_r = 760 \text{ мм рт. ст.}$); $\rho_{в0}$ – плотность воздуха при нормальных условиях; $\rho_{г0}$ – плотность топлива при нормальных условиях.

Далее, считая, что диаметр струи изменяется по длине струи по линейному закону, по известной величине $L_{зах}$ определится диаметр струи (факела) в конце пути захвата

$$d_{зах} = b \cdot L_{зах} = b \cdot 3,16 \cdot d_0 \cdot \left(1 + \frac{L_v^d \cdot \rho_{в0}}{\rho_{г0}} \right), \quad (2.4)$$

где $b = 2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2)$; α – угла раскрытия факела.

Известно, что влияние внешней среды на осевой участок газовой струи зависит от диаметра струи таким образом, что вихрь на поверхности струи с диаметром d_L достигнет оси струи через $L_{\text{пер}} = V \cdot d_L$, т.е. длина пути перемешивания определится по формуле $L_{\text{пер}} = V \cdot d_{\text{зах}}$. Тогда

$$L_{\text{фак}} = L_{\text{зах}} \cdot (1 + V \cdot b) = 3,16 \cdot d_0 \cdot \left(1 + \frac{L_B^D \cdot \rho_{B0}}{\rho_{r0}}\right) \cdot (1 + V \cdot b). \quad (2.5)$$

При практическом значении угла раскрытия факела $\alpha_{\text{пр}} = 24^\circ$ получим $b = 2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2) = 0,425$ и величине $V \approx 6$ окончательно получим

$$L_{\text{фак}} = 11 \cdot \left(1 + \frac{L_B^D \cdot \rho_{B0}}{\rho_{r0}}\right) \cdot d_0. \quad (2.6)$$

Формально длина факела зависит от теплоты сгорания топлива и диаметра сопла горелки. При большой тепловой мощности полезно дробление факела, но на длине захвата нужно исключить слияние факелов.

2.4.1 Факторы, влияющие на длину факела. Калибр горелки. Выбор типа горелочного устройства с точки зрения нагрева

Номинальная относительная длина факела – это расстояние от выходного сечения горелки, измеренное в калибрах выходного отверстия, до точки, где концентрация CO_2 на оси факела составляет 95 % от максимально возможной при номинальной тепловой мощности и при коэффициенте расхода воздуха $n = 1$.

На длину факела влияют следующие основные факторы:

- 1) диаметр газового сопла;
- 2) теплота сгорания топлива;
- 3) концентрация кислорода в обогащенном воздухе;
- 4) скорость выхода газа из горелки;
- 5) скорость воздушного потока;
- 6) избыток воздуха, подаваемого для горения;
- 7) температура газа;
- 8) температура воздуха;
- 9) соприкосновение факела с плоскостью;
- 10) угол встречи потоков газа и воздуха;
- 11) расстояние между факелами.

Рассмотрим отдельные факторы более подробно.

1. Диаметр газового сопла.

Сравнение факелов можно проводить при постоянной скорости истечения газа, когда изменяется тепловая мощность горелки, и при одной и той же тепловой мощности горелки, но тогда будет изменяться скорость истекающего газа, что усложняет сравнение. На рис. 2.5 представлены факелы коксового газа, истекающего из сопел различных диаметров с одной и той же скоростью. Вершины факелов образуют прямую линию, что подтверждает достоверность формулы (2.6): длина факела пропорциональна диаметру газового сопла d_0 . Следует учитывать, что одновременно увеличивается мощность горелки.

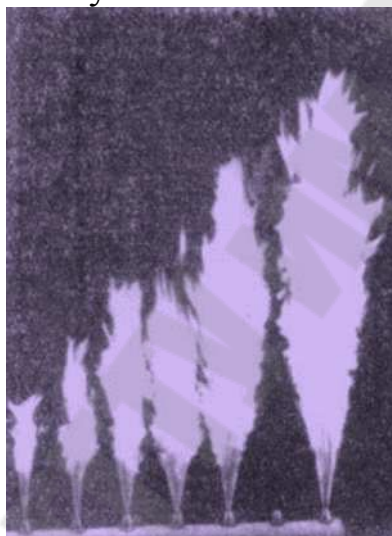


Рис. 7. Фотографии зависимости длины факела от диаметра сопла

2. Теплота сгорания топлива.

Чем выше теплота сгорания топлива, тем больше воздуха требуется для его сжигания, и тем больше, согласно (2.6), будет длина факела. Процесс вовлечения воздуха в горящую струю – процесс энергетический, потому на длину факела влияет не объёмная теплота сгорания топлива Q_H^p [Дж/м³], а массовая теплота сгорания Q_H^p [Дж/кг]. Так, объёмная теплота сгорания CO составляет 3050 кДж/м³, что выше объёмной теплоты сгорания водорода, составляющей 2575 кДж/м³. Но $\rho_{CO} = 1,25$ кг/м³ и $Q_{H(CO)}^p = 2440$ кДж/кг, а у водорода $\rho_{H_2} = 0,0893$ кг/м³ и $Q_{H(H_2)}^p = 28800$ кДж/кг. Для CO имеем $L_B^A = 2,3$ м³ возд. / м³ газа; для H₂ – $L_B^A = 2,38$ м³ возд. / м³ газа. Расчёт по формуле (2.6) приводит к следующим результатам: $L_{фак(CO)} = 40 \cdot d_0$, $L_{фак(H_2)} = 407 \cdot d_0$.

Длина факела у водорода очень большая, хотя химическая особенность водорода способствует быстрому ходу реакции горения. Эту особенность H_2 отметили многие исследователи факельного процесса – одному кг H_2 требуется захватить много воздуха на пути $L_{зах}$.

3. Концентрация O_2 в воздухе.

Чем больше процент O_2 в воздухе, тем меньше воздуха потребуется для горения, тем легче и быстрее вовлечь в струю нужное количество O_2 . Следовательно, длина пути захвата $L_{зах}$, а соответственно $d_{зах}$, $L_{пер}$ и $L_{фак}$ уменьшаются.

Таким образом, сокращение длины факела при сжигании газа с обогащённым воздухом или даже с чистым кислородом обязано не сколь химии процесса, сколь механике газов, т.е. физике процесса.

Влияние факторов 4-11 на длину факела не нашло отражения в формуле (2.6) и потому используются экспериментальные данные для решения поставленных вопросов.

4. Скорость выхода газа из горелки.

Как показано ранее, с увеличением скорости истекающего газа (в турбулентной области) длина факела медленно возрастает (относительно возрастания длины ламинарного факела). На одной и той же длине захват воздуха растёт пропорционально скорости газа за счёт увеличения турбулентности потока и длина факела перестаёт зависеть от тепловой мощности горелки.

5. Скорость воздушного потока.

Практическое сжигание газа в печах связано с подачей вентиляторного воздуха в горелку. Воздух из воздушного кольца может истекать с различной скоростью. Общая идея процесса перемешивания газовых сред состоит в том, что количество движения двух потоков определяет течение процесса. Чем больше количества движения участвует в процессе перемешивания, тем интенсивнее происходит процесс перемешивания. С этой точки зрения, ввод дополнительного количества движения с воздухом должен привести к укорочению длины факела, что подтверждается и экспериментом.

6. Избыток воздуха, подаваемого для горения.

Избыток воздуха при сохранении площади воздушного кольца в горелке может привести к некоторому сокращению длины факела из-за увеличения скорости воздуха. Дожигание "хвоста" факела идёт в

условиях снижающейся концентрации кислорода. Ясно, что подача воздуха с некоторым небольшим избытком совершенно необходима, чтобы наверняка исключить недожог топлива в печи.

7. Температура газа.

Подогрев газа с соответственным увеличением скорости гипотетически эквивалентен уменьшению диаметра горелки d_0 при постоянной тепловой мощности горелки на холодном газе. По этой причине длина факела сокращается.

Это явление можно объяснить следующим образом. Химическая теплота остаётся постоянной, а скорость вылета газа и, следовательно, количество движения возрастает, отчего перемешивание потоков газа и воздуха ускоряется.

8. Температура воздуха.

С увеличением температуры воздуха скорость воздуха увеличивается, перемешивание газа и воздуха ускоряется, и длина факела уменьшается.

9. Соприкосновение факела с плоскостью.

При соприкосновении струи газа с плоскостью факел деформируется, он становится шире и тоньше.

Струя газа, уширяясь при встрече с плоскостью, одновременно лишается некоторого фронта для захвата кислорода. Уширение факела способствует его укорочению, а прекращение снабжения его кислородом со стороны плоскости вызывает его удлинение. В конечном итоге, при наличии таких противоречивых факторов, длина факела существенно может и не измениться.

10. Угол встречи потоков газа и воздуха.

При встрече потоков газа и воздуха под углом, что имеет место при практическом сжигании газа в промышленных печах, происходит явление удара со всеми вытекающими отсюда последствиями. Потоки сплющиваются, расширяются, дробятся на отдельные пряди. Более слабый поток деформируется сильнее.

Чем больше скорости потоков, тем сильнее действие удара. Удар струи о струю способствует перемешиванию газов за счёт появления макротурбулентности крупных вихрей. Это ведёт к укорочению факела, но связано с потерей стройности движения, т.е. аэродинамиче-

ских качеств факела. Угол встречи 45° при равенстве скоростей газа и воздуха может сократить длину факела вдвое.

В тех случаях, когда аэродинамические качества важнее, чем длина факела (например для факела в мартеновской печи), применение больших углов вредно. Для сокращения длины факела лучше увеличить скорость воздуха и уменьшить угол встречи потоков, поскольку большой угол встречи разрушает факел.

11. Расстояние между факелами.

При близком расположении друг к другу факелы мешают подходу кислорода. При расширении струй они сливаются друг с другом. Если этот контакт произошёл раньше, чем закончился захват нужного количества воздуха для горения, то дальнейшее получение кислорода затрудняется, так как факелы из отдельных превращаются в один общий. В результате слияния потоков длина общего факела резко возрастает. Если воздух и газ подаются параллельными потоками с большими скоростями при котором длина захвата меньше длины слияния потоков, то длина суммы всех факелов практически не отличается от длины отдельного факела.

2.5 Устройства для сжигания газообразного и жидкого топлива. Классификация сжигающих устройств. Устройства для сжигания топлива: горелки, форсунки

Важнейшим элементом топливной печи являются устройства для сжигания газа или мазута. Устройства для сжигания газа называют горелками, для распыливания и сжигания мазута – форсунками. И те и другие состоят из собственно горелки (форсунки) и огнеупорного горелочного туннеля, через который смесь воздуха и топлива поступает в печь.

2.5.1 Горелки типа "труба в трубе", конструкции ДМетИ, инжекционные и другие. Требования, которые предъявляются к горелкам и форсункам

1. Горелки для сжигания газа

Процесс сжигания топлива состоит из трех операций: смешивание топлива с воздухом, подогрев компонентов горения до температуры воспламенения и собственно химическая реакция горения. Самая медленная операция – смешивание компонентов горения. В зависимости от её организации различают конструкции газовых горелок: 1) с предварительным смешиванием газа с воздухом внутри корпуса горелки и 2) без предварительного смешивания.

К горелкам с предварительным смешиванием относятся инжекционные (рисунок 8 а). В таких горелках воздух засасывается (инжектируется) в корпус под воздействием струи газа, выходящей с большой скоростью из газового сопла. Эти горелки не нуждаются в вентиляторах, а при работе на холодном воздухе и в воздухопроводах. К таким горелкам подводят только газ, их называют однопроводными в отличие от двухпроводных (или дутьевых) горелок, к которым подводят не только газ, но и воздушное дутьё по воздухопроводам. В корпусе-смесителе горелки происходит предварительное смешивание газа с воздухом. Газовоздушная смесь нагревается и сгорает в пределах длины горелочного туннеля. В печи нет видимого пламени. Поэтому инжекционные горелки называют беспламенными.

Скорость выхода смеси из носика горелки в туннель должна быть больше скорости распространения пламени в готовой для горения смеси во избежание обратного «проскока» пламени в корпус горелки, что может привести к его прогару, если горелку своевременно не отключить. «Проскоки» пламени при малых расходах газа делают узким диапазон регулирования расходов газа в этих горелках.

Подачу газа в горелку по сравнению с максимальной расчётной уменьшают не более, чем в 2-3 раза. Во избежание «проскоков» нельзя подогреть воздух и газ до высокой температуры, близкой к температуре воспламенения.

Преимуществом инжекционных горелок является полное сжигание газа с небольшим коэффициентом расхода воздуха, близким к единице, вследствие хороших условий смешивания компонентов горения.

На рисунках 8б, 8в, 8г представлены конструкции двухпроводных горелок без предварительного перемешивания. Смесь газа с воздухом образуется вне корпуса горелки, в туннеле и в рабочем пространстве печи. По мере смешивания происходит горение в видимом факеле. Поэтому такие горелки называют факельными.

Горелки типа "труба в трубе" с почти параллельными потоками газа и воздуха (см. рисунок 8б) отличаются длинным пламенем ввиду медленного перемешивания параллельных потоков. Газовая труба расположена по оси горелки, воздух проходит по кольцевому зазору между наружной и внутренней трубами. Эти горелки применяются для сжигания газов с низкой и с высокой теплотой сгорания.

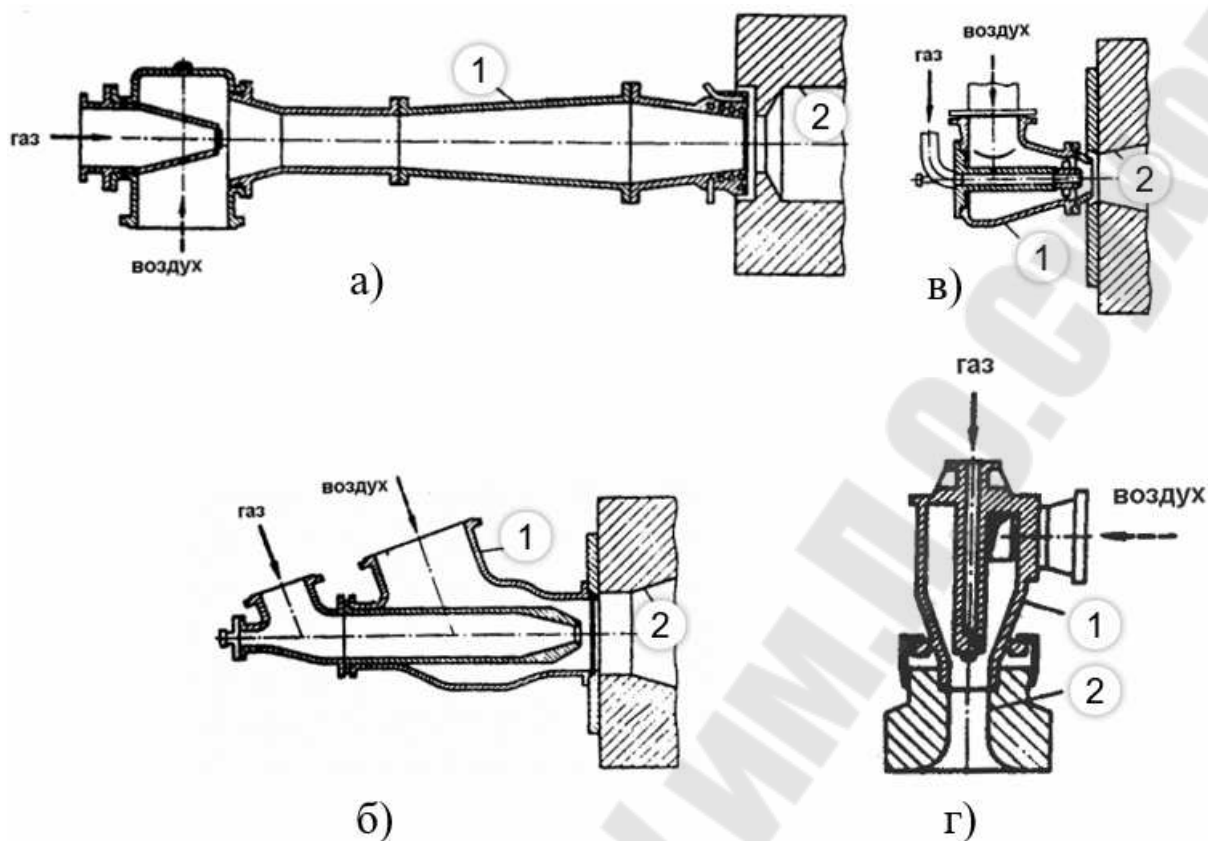


Рис. 8. Виды газовых горелок: *а* – инжекционная горелка с предварительным смешиванием газа с воздухом; *б* – дутьевая типа «труба в трубе» без предварительного смешивания; *в* – дутьевая для природного газа с закруткой воздуха; *г* – дутьевая сводовая плоскопламенная с закруткой воздуха и газа; 1 – собственно горелка; 2 – огнеупорный туннель.

Дутьевые горелки для сжигания природного газа низкого давления типа ГНП (см. рисунок 8в) имеют улучшенное смешивание по сравнению с горелками «труба в трубе» и более короткий видимый факел. С этой целью перед выходным отверстием для воздуха установлены лопатки для закручивания воздушного потока, а наконечник для выхода газа делают сменным: с одним центральным выходным отверстием или с несколькими расположенными под углом к потоку воздуха.

Все перечисленные дутьевые и инжекционные горелки устанавливают, как правило, в стенах печей. В своде печи устанавливают плоскопламенные горелки (см. рисунок 8г). Газ подают по трубе, расположенной вертикально по оси горелки. Поток воздуха закручивают направляющим винтом или благодаря смещённому от оси (тангенциальному) его подводу. Газ закручивают, применяя косые прорезы в наконечнике газовой трубы. Выходя из горелки, закрученная газовоз-

душная смесь прижимается к стенкам огнеупорного туннеля, имеющего форму граммофонной трубы. Пламя размыкается и направляется вдоль свода печи под прямым углом к оси горелки, приобретая форму плоского диска. Достоинство плоскопламенных горелок заключается в том, что горение происходит на поверхности огнеупорной футеровки свода. Раскалённый свод, имеющий большую излучательную способность, чем дымовые газы, передаёт металлу, нагреваемому в печи, большой лучистый тепловой поток. Плоскопламенные горелки рассчитывают на работу с природным, коксовым и с различными смесями газов.

Для большинства дутьевых горелок расход газа без ухудшения работы горелки можно изменять в 3-4 раза. Все конструкции газовых горелок перед применением в печах проходят государственные испытания и получают сертификат с указанием допустимого режима эксплуатации: диапазона расходов газа, давления газа и воздуха, коэффициента расхода воздуха.

2. Форсунки для сжигания мазута (рисунок 9)

В качестве жидкого топлива для отопления печей в металлургии используют, как правило, высоковязкие топочные мазуты. Мазуты характеризуются: 1) вязкостью, 2) температурой вспышки и 3) температурой воспламенения, 4) температурой застывания. Температурой вспышки называют температуру, при которой пары мазута в смеси с воздухом загораются при поднесении огня. Она находится в пределах 70-150 °С в зависимости от состава мазута. Температура вспышки значительно ниже температуры воспламенения, при которой жидкий мазут воспламеняется произвольно, без воздействия огня. Температура воспламенения мазутов в среднем равна 500-600 °С. Температура застывания равна 5-25 °С.

Для удобства транспортирования и распыливания в форсунках вязкость мазута снижают путём подогрева до температуры на 15-20 °С ниже температуры вспышки. Мазут перед сжиганием подвергают распыливанию, чтобы увеличить площадь контакта капель с кислородом воздуха. В металлургии для сжигания мазута применяют форсунки высокого и низкого давления с паровым и воздушным распыливанием. Распыливание происходит в результате взаимодействия струй мазута и распылителя, движущихся с разными скоростями. В форсунках низкого давления распылителем является идущий на горе-

ние вентиляторный воздух с давлением 5-20 кПа, при котором обеспечивается скорость его истечения 80-100 м/с.

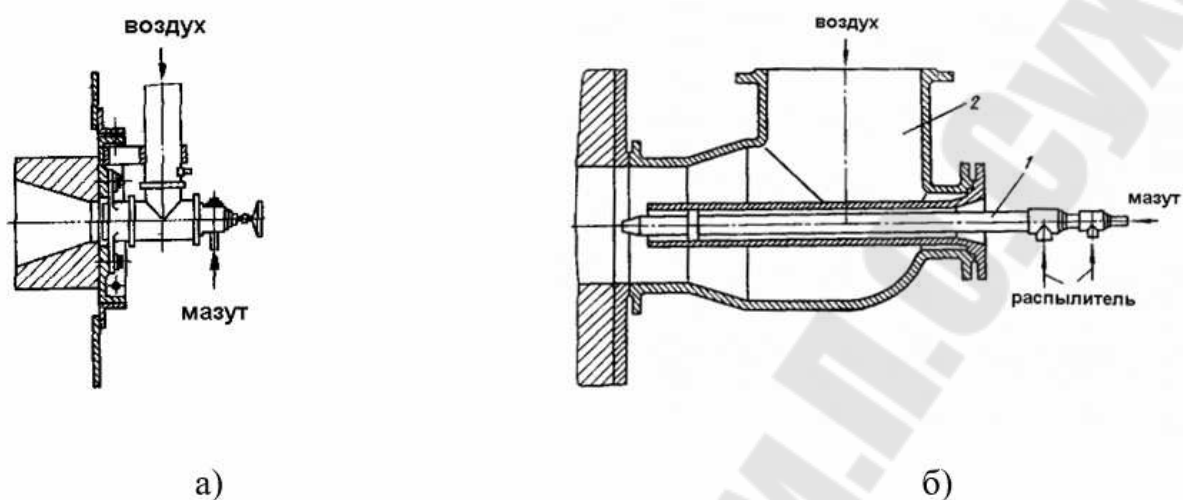


Рис. 9. Виды мазутных форсунок: а – форсунка низкого давления; б – форсунка высокого давления; 1 – собственно форсунка; 2 – форсуночная коробка

Мазут обычно истекает со скоростью ~ 10 м/с. Достоинство форсунок низкого давления в том, что они не нуждаются в подводе распылителя высокого давления. Их применяют на небольших металлургических печах. Качество распыливания и сжигания лучше, а пределы регулирования расхода мазута выше в форсунках высокого давления. В них распылитель – компрессорный воздух или водяной пар – подают в небольших количествах, но с большой скоростью. Необходимое давление воздуха 400-600 кПа, удельный расход 1,0-1,5 кг/кг мазута, пар может быть сухой насыщенный или перегретый с температурой 200-300 °С под давлением 700-900 кПа, удельный расход пара 0,8-1,0 кг/кг мазута. Скорость истечения распылителя составляет сотни метров в секунду.

Форсунки высокого давления могут иметь большую пропускную способность. Их применяют на крупных металлургических печах. На рисунке 9 б показана установка на печи форсунки высокого давления в форсуночной коробке, через которую подают вентиляторный воздух, необходимый для сжигания мазута. На рисунке 9а представлена форсунка низкого давления.

2.5.2 Новое поколение горелок: регенеративные, рекуперативные и рекуперативно-горелочные блоки

Регенеративные, рекуперативные и рекуперативно-горелочные блоки – это аппараты, которые комбинируют в себе функции горелочного и теплоутилизирующего устройства.

Принцип работы рекуперативной горелки следующий: через горелку противотоком по различным каналам поступают воздух горения в рабочее пространство печи и продукты сгорания из рабочего пространства печи.

Принцип работы регенеративной горелки следующий: одни и те же тракты попеременно (со смещением во времени) служат для подачи воздуха горения в рабочее пространство печи и продукты сгорания из рабочего пространства печи.

Принцип работы рекуперативно-горелочного блока следующий: канал отбора продуктов сгорания располагается вблизи устья горелки, а тракты продуктов горения и воздуха горения пересекаются не в горелке, а в примыкающем к ней рекуператоре.

Достоинством всех этих систем являются компактность и высокая степень утилизации теплоты благодаря малым теплотерям в трактах.

На рисунке 10 показана схема печи с регенеративными горелками. Регенеративные горелки 1 и 2 устанавливаются с противоположных сторон рабочего пространства печи. Характерной особенностью этих горелок является непосредственное расположение компактных регенераторов 1 и 2 около места подвода газа и воздуха в печь. Печь с регенеративными горелками является реверсивной. Регенеративные горелки работают попеременно на нагреве и охлаждении регенеративных насадок, что осуществляется с помощью регулирующих клапанов. Дым после регенераторов удаляется дымовой трубой в окружающее пространство.

Устройство регенеративной горелки приведено на рисунках 11,12. Главным элементом горелки является регенератор. Насадка регенераторов выполняется из шариков диаметром $d = 15-20$ мм. Шарики выполняются из огнеупорного материала, например, алунда.

Отличие шариковых регенераторов от кирпичных состоит в том, что поверхность нагрева 1 м^3 насадки шаров диаметром 15-20 мм в 10-15 раз больше поверхности кирпичной насадки.

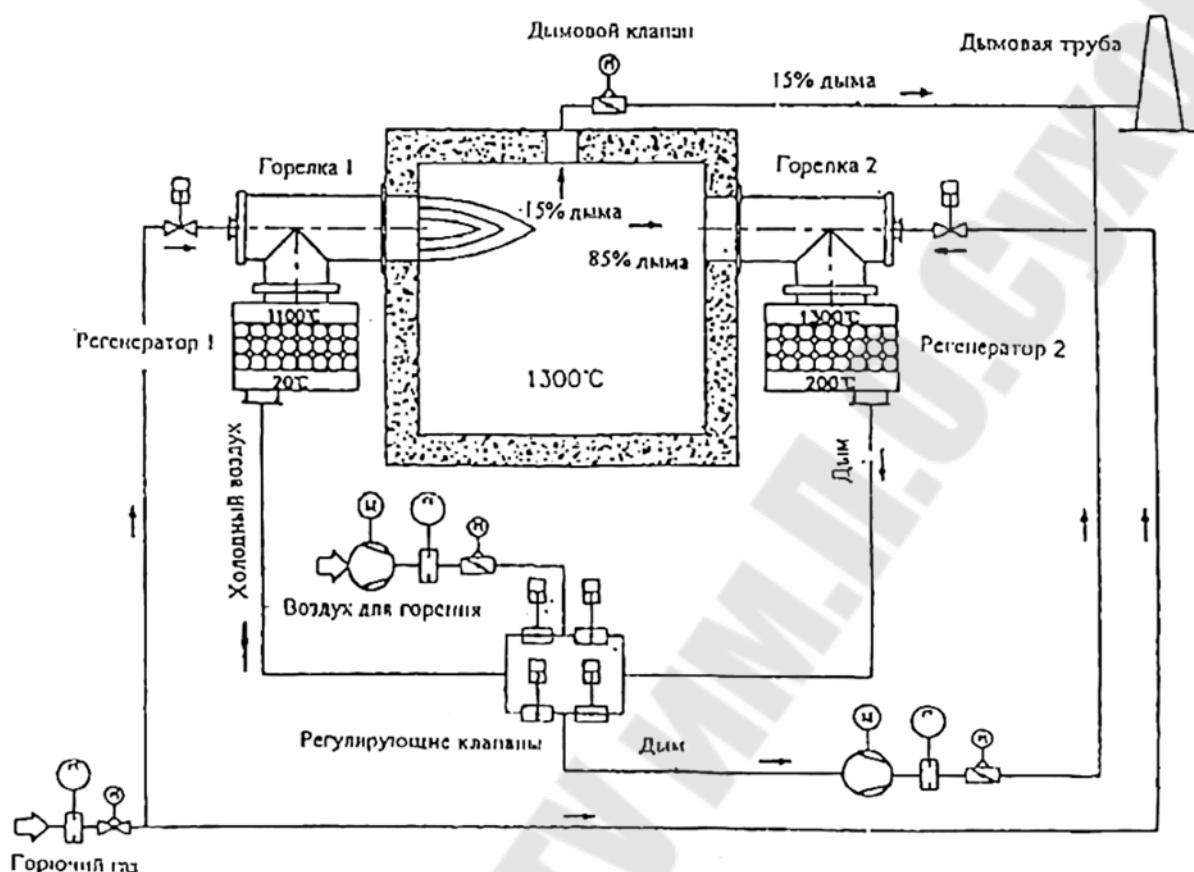


Рис. 10. Схема печи с регенеративными горелками

Поэтому шариковый регенератор имеет небольшой объём и устанавливается прямо в горелке. Отсюда название – регенеративные горелки.

Чтобы вернуть в печь с нагретым воздухом как можно больше теплоты, уносимой из неё дымовыми газами, нужно не давать шарикам прогреться по всей высоте засыпки. Горелки работают попеременно. Когда температура дыма на выходе из регенератора достигает 100-150 °С, делают перекидку клапанов – дымовых, воздушных и газовых. Период между перекидкой составляет 1-3 минуты и зависит от соотношения расхода дымовых газов и объёма насадки. Температура подогрева воздуха в шариковых регенераторах приблизительно на 100 °С ниже температуры дыма на выходе из печи. Поэтому регенераторы являются мощным средством аккумуляции тепла уходящих из печи газов и возврата его в печь с воздухом через горелки. КИТ в таких горелках может достигать 0,85-0,9.

В регенеративных камерах имеются загрузочный люк и разгрузочное окно. При засорении шариковой насадки её можно через разгрузочное окно передать на промывку от загрязнений.

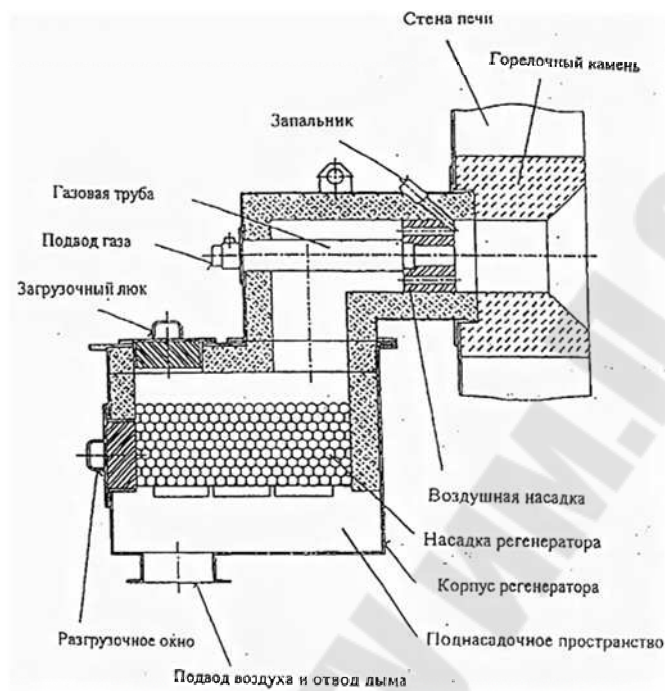


Рис. 11. Устройство регенеративной горелки



Рис. 12. Регенеративная горелка REGFIRE

3 УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

В современных условиях развития металлургического производства весьма актуальными являются задачи по разработке ресурсосберегающих технологических режимов плавки стали, теоретических и практических аспектов новых энергосберегающих способов продувки сталеплавильной ванны технологическим газом и повышения эффективности тепловой работы печей.

Одним из путей снижения расходных показателей и уменьшения потерь является утилизация физической и химической энергии отходящих газов.

Средняя температура дымовых газов на выходе из печи, как правило, превышает 400°C . Это связано с тем, что обычно сырьё подаётся в печь после предварительного подогрева теплом продуктовых потоков (то есть уже с достаточно высокой температурой). Кроме этого разность температур между дымовыми газами на выходе из конвекционной камеры печи и сырьём, поступающим на подогрев, должна составлять $100\text{-}150^{\circ}\text{C}$ (экономический оптимум соотношения капитальных и эксплуатационных затрат). Количество теплоты, уносимой с дымовыми газами, составляет 25-30% от всей теплоты, выделяющейся при сгорании топлива. КПД печей, таким образом, не превышает 60-65% (существуют дополнительные тепловые потери через стенки печи).

Поэтому утилизация тепла уходящих дымовых газов технологических печей приобретает исключительно большое значение. На основании опыта рекомендуются следующие принципы рационального использования теплоты дымовых газов:

- утилизацию теплоты следует применять для печей с теплопроизводительностью выше 25 ГДж/час (в связи с более резким ростом цен на энергоресурсы, чем на металл эта величина постоянно снижается);
- при температуре дымовых газов выше 500°C следует применять котлы-утилизаторы – КУ;
- при температуре дымовых газов менее 500°C рекомендуется применять воздухоподогреватели – ВП;
- наибольший экономический эффект достигается при наличии двухагрегатной установки, состоящей из КУ и ВП (в КУ газы охлаждаются до 400°C и поступают в воздухоподогреватель на дальнейшее охлаждение) – чаще применяется на нефтехимических предприятиях при высокой температуре дымовых газов;

- если количество дымовых газов превышает 40000 м³/ч, то для выработки пара лучше применять КУ с принудительной циркуляцией, а при меньшем количестве – с естественной.

3.1 Тепловой баланс печей

Тепловой баланс можно составлять на единицу времени (печи непрерывного действия) и на цикл работы печи (печи периодического действия).

3.1.1. Тепловой баланс печи непрерывного действия

Печи непрерывного действия – это печи, в которых температурный и тепловой режим во времени не изменяются.

Баланс выражается уравнением, связывающим приход и расход теплоты в единицу времени

$$M_{\text{прих}} = M_{\text{расх}} \text{ [Вт]}. \quad (3.1)$$

Баланс можно составлять для зон горения топлива, для рабочего пространства печи (зоны горения + зоны утилизации теплоты) и для печи в целом, включая внешние теплообменные устройства. Наилучшим образом характеризует тепловую работу печи баланс рабочего пространства (рис. 13), который будет рассмотрен ниже. Для простоты в тепловом балансе будем считать нагрев металла и опустим слабые, связанные с окислением металла.

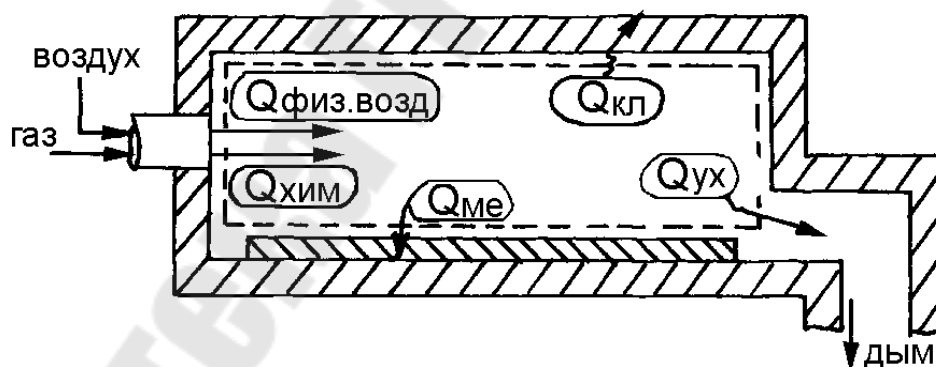


Рис. 13. Тепловой баланс камеры для нагрева материала

Приход теплоты чаще всего состоит из следующих частей: химическая теплота, выделяемая при сжигании топлива в единицу времени и называемая общей тепловой мощностью печи

$$M_{\text{общ}} = V \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}, \quad (3.2a)$$

где V – расход топлива [$\text{м}^3/\text{с}$]; $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ – низшая теплота сгорания топлива [$\text{Дж}/\text{м}^3$];
теплота, вносимая подогретым воздухом:

$$M_{\text{ф.в}} = V \cdot L_{\text{н}} \cdot i_{\text{в}} = V \cdot Q_{\text{ф.в}}, \quad (3.2б)$$

где $i_{\text{в}}$ – удельная энтальпия подогретого воздуха [$\text{Дж}/\text{м}^3$];
 $L_{\text{н}}$ – действительный расход воздуха на 1 м^3 топлива [$\text{м}^3/\text{м}^3$];
 $Q_{\text{ф.в}} = L_{\text{н}} \cdot i_{\text{в}}$ – удельная физическая теплота подогретого воздуха;
теплота, вносимая подогретым топливом:

$$M_{\text{ф.т}} = V \cdot i_{\text{т}}, \quad (3.2в)$$

где $i_{\text{т}}$ – удельная энтальпия подогретого топлива [$\text{Дж}/\text{м}^3$]. Часто эту величину называют удельной физической теплотой топлива и обозначают $Q_{\text{ф.т}} = i_{\text{т}}$;

Расход теплоты состоит из следующих частей:
теплота, воспринятая нагреваемым металлом и называемая усвоенной тепловой мощностью

$$M_{\text{усв}} = P \cdot \Delta i \quad (3.3а)$$

где P – производительность печи [$\text{кг}/\text{с}$]; Δi – изменение удельной энтальпии металла в процессе нагрева, называемое тепловым дефицитом [$\text{Дж}/\text{кг}$].

Таким образом, тепловой дефицит – это количество теплоты, которое нужно сообщить исходным материалам в расчёте на 1 кг конечного продукта;
потери теплоты с уходящими продуктами горения

$$M_{\text{ух}} = V \cdot V_{\text{д}} \cdot i_{\text{ух}}, \quad (3.3б)$$

где $i_{\text{ух}}$ – удельная энтальпия дымовых газов на выходе из рабочего пространства печи [$\text{Дж}/\text{м}^3$];
 $V_{\text{д}}$ – объем дымовых газов, образующихся от сжигания 1 м^3 топлива [$\text{м}^3/\text{м}^3$];
 $Q_{\text{ф.ух}} = V_{\text{д}} \cdot i_{\text{ух}}$ – удельная физическая теплота уходящих из печи газов [$\text{Дж}/\text{м}^3$];

потери теплоты от химической неполноты горения топлива

$$M_{x,n} = B \cdot Q_{x,n}, \quad (3.3в)$$

где $Q_{x,n} = V_d \cdot (Q_{n(\text{co})}^p \cdot \text{CO}^d + Q_{n(\text{H}_2)}^p \cdot \text{H}_2^d) \cdot 0,01$ – удельная теплота недожога топлива в печи [Дж/м³]; CO^d и H_2^d [%] – процентное содержание CO и H₂ в продуктах неполного горения; $Q_{n(\text{co})}^p$ и $Q_{n(\text{H}_2)}^p$ – низшая теплота сгорания CO и H₂ [Дж/м³];

- потери теплоты из рабочего пространства печи – $M_{\text{прп}}$, включающие в себя: а) потери теплоты теплопроводностью через кладку; б) потери теплоты излучением через открытые окна и щели; в) потери теплоты с охлаждающей водой на охлаждение внутрипечных металлических элементов; г) потери на нагрев транспортных устройств; д) потери с выбиванием дыма через неплотности кладки; е) потери с механическим недожогом топлива, потери при диссоциации CO₂ и H₂O; ж) потери на нагрев подсасываемого в печь холодного воздуха и др. Эти потери ($M_{\text{прп}}$) принято называть мощностью тепловых потерь рабочего пространства печи;

Таким образом, уравнение теплового баланса можно представить в следующем виде:

$$M_{\text{общ}} + M_{\text{ф.в}} + M_{\text{ф.т}} = M_{\text{усв}} + M_{\text{прп}} + M_{\text{ух}} + M_{x,n}. \quad (3.4)$$

3.2 Вторичные материальные и энергетические ресурсы

Технологические процессы черной металлургии характеризуются низким показателями использования энергии топлива основными его потребителями – металлургическими печами. В этой связи возникло понятие о вторичных энергетических ресурсах (ВЭР). ВЭР – часть энергии топлива, не использованная в технологическом процессе. Аналогично можно внести понятие о вторичных материальных ресурсах (ВМР), как отходах технологического процесса (например, пылевидные выбросы, вода, окалина, шлак). Совершенно очевидно, что использование ВЭР и ВМР не только экономит материально-энергетические ресурсы, но и уменьшает вредные выбросы и снижает загрязнение окружающей среды.

3.2.1 Классификация вторичных энергоресурсов

По виду энергии ВЭР делятся на горючие (топливные), тепловые и избыточного давления.

К горючим ВЭР относятся побочные газообразные продукты технологических процессов, которые могут быть использованы в качестве энергетического или технологического топлива. В черной металлургии к горючим ВЭР относят доменный, ферросплавный и конвертерный газы, а иногда также и коксовый газ.



Рис. 14. Классификация вторичных энергетических ресурсов

Тепловые ВЭР представляют собой физическую теплоту основных и побочных продуктов, отходящих газов технологических агрегатов, а также систем охлаждения их элементов. Однако, если эта теплота используется для подогрева сырья или воздуха, т.е. возвращается в технологический процесс, то к ВЭР она не относится.

Доля тепловых ВЭР к общему их выходу составляет около 30 %.

ВЭР избыточного давления – потенциальная энергия газов, выходящих из технологических агрегатов с избыточным давлением, которое может быть использовано в утилизационных установках для получения других видов энергии.

В таблице 5 приведена классификация ВЭР по видам и способам их использования.

Количество ВЭР, образующееся в технологическом агрегате, называют выходом ВЭР. Эту величину относят либо к единице времени

работы агрегата – источника ВЭР, либо в удельных показателях – к единице продукции.

Выход ВЭР определяется произведением количества энергоносителя на его энергетический потенциал. Для горючих ВЭР

$$q^{\text{гор}} = m \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}; \quad (3.5)$$

для тепловых ВЭР

$$q^{\text{т}} = m \cdot i; \quad (3.6)$$

для ВЭР избыточного давления

$$q^{\text{изб}} = m \cdot L, \quad (3.7)$$

где $q^{\text{гор}}$, $q^{\text{т}}$, $q^{\text{изб}}$ – выход соответствующих ВЭР, Дж/с (Дж/кг продукции); m – расход энергоносителя, кг/с (кг/кг продукции); $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая теплота сгорания ВЭР, Дж/кг; i – удельная энтальпия энергоносителя, Дж/кг; L – удельная работа изоэнтропного расширения газов, Дж/кг.

Таблица 5

Виды ВЭР и способы их использования

Виды ВЭР	Носители ВЭР	Энергетический потенциал	Способ использования
Горючие	Газообразные отходы	Низшая теплота сгорания	Сжигание в топливо-использующих установках
Тепловые	Отходящие газы, готовая продукция и отходы производства, теплоносители систем охлаждения	Энтальпия	Выработка в теплоутилизационных установках водяного пара, горячей воды
	Отработанный и попутный пар	Энтальпия	Покрытие теплопотребности, выработка электроэнергии в конденсационном или теплофикационном турбоагрегате
Избыточного давления	Газы с избыточным давлением	Работа изоэнтропного расширения	Выработка электроэнергии в газовом утилизационном турбоагрегате

В некоторых случаях горючие ВЭР выражают в единицах условного топлива:

$$b = m \cdot Q_H^p / Q_{y.t.}, \quad (3.8)$$

где b – выход ВЭР в килограммах условного топлива на единицу продукции или времени, кг усл.т./кг (кг усл.т./с); $Q_{y.t.} = 29308$ кДж/кг усл.т. – теплота сгорания 1 кг условного топлива.

3.3 Направления снижения удельного расхода топлива в печах

3.3.1 Схемы использования теплоты уходящих газов в печах.

Принципы утилизации теплоты

Использование физической теплоты отходящих газов осуществляется по трём схемам: 1) технологической (замкнутой и разомкнутой), 2) энергетической и 3) комбинированной.

Технологическая схема предусматривает использование этой теплоты для технологических процессов, как правило, в той же теплотехнологической установке. По такой схеме нагревают воздух, а также в некоторых случаях и газообразные топлива, предварительно подогревают обрабатываемый в печи материал или производят химико-термическую переработку некоторых шихтовых материалов, используемых в данном процессе. При отоплении печей природным газом к технологической схеме относится также термохимическая регенерация теплоты отходящих газов, используемая для конверсии метана. Описанные схемы являются замкнутыми, они обеспечивают экономию топлива в самом технологическом агрегате (рисунок 15). Теплоту отходящих газов можно использовать и в другой печной установке с меньшим температурным уровнем процесса. Такая схема является разомкнутой (рисунок 16). В этом случае экономится топливо в установке, использующей теплоту отходящих газов. Возможно также последовательное использование теплоты в основном и в низкотемпературных агрегатах.

Применение замкнутой технологической схемы повышает эффективность использования топлива в технологическом агрегате, т.е. снижает вы-ход ВЭР.

Энергетическая схема предусматривает использование теплоты отходящих газов в энергетических установках для производства каких-либо энергоносителей (теплоты, электроэнергии, холода и др.). Возможно последовательное размещение нескольких теплоисполь-

зующих установок, например, котлов-утилизаторов и экономайзеров для подогрева сетевой воды. Таким образом, энергетическая схема является разомкнутой и позволяет сэкономить топливо, расходуемое на производство соответствующих видов и количеств энергоносителей за счёт использования ВЭР технологического агрегата (рисунок 18).

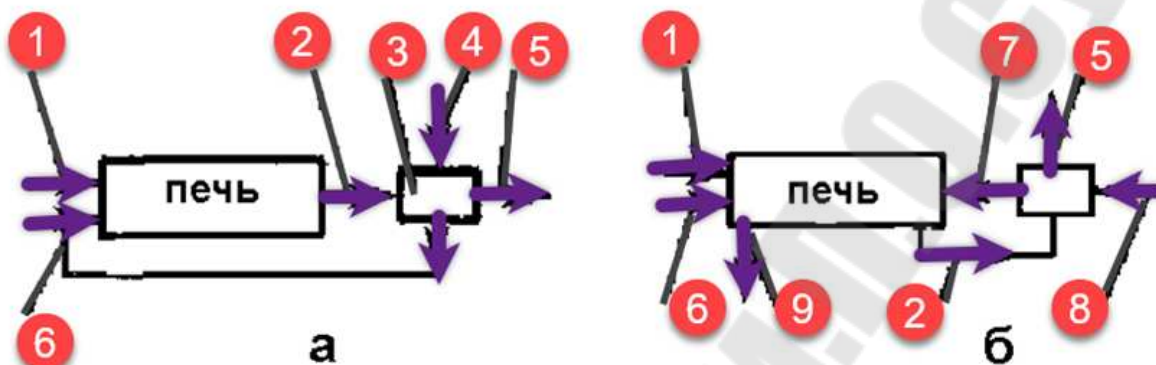


Рис. 15. Замкнутые технологические схемы использования теплоты отходящих газов:

а - для подогрева воздуха; *б* - для предварительного нагрева материала;
 1 - подвод топлива в печь; 2 - отвод газов из печи; 3 - рекуператор;
 4 - подвод воздуха в рекуператор; 5 - отвод дыма; 6 - подвод воздуха в печь; 7 - подача подогретого материала в печь; 8 - подача холодного материала; 9 - выдача материала

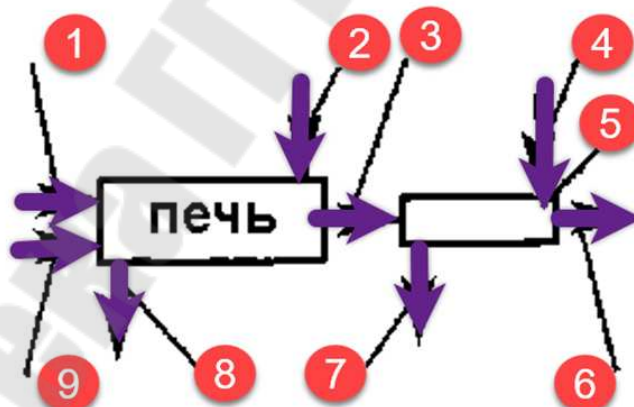


Рис. 16. Разомкнутая технологическая схема использования теплоты отходящих газов:

1 - подвод топлива; 2 - подача материала в основную печь; 3 - отвод газов из основной печи; 4 - подача материала в низкотемпературную печь; 5 - низкотемпературная печь; 6 - отвод газов из низкотемпературной печи; 7 - выдача материала из низкотемпературной печи; 8 - выдача материала из основной печи; 9 - подвод воздуха

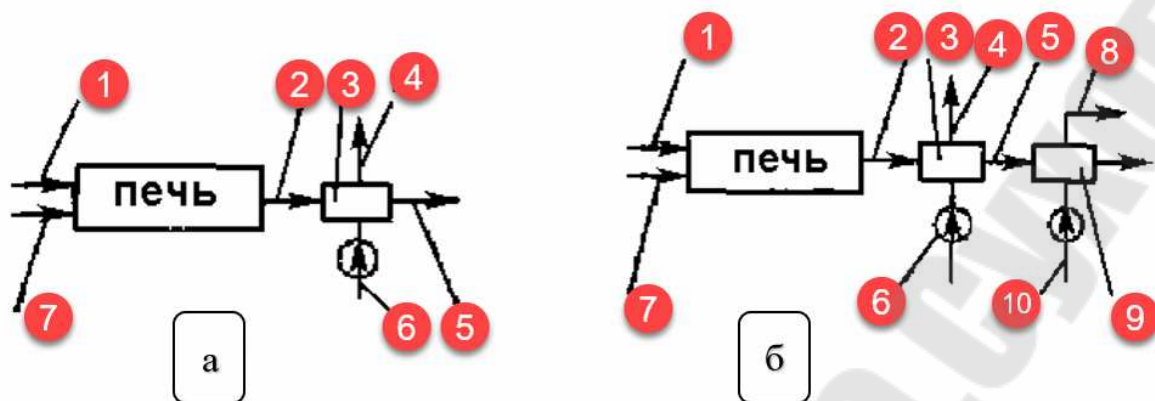


Рис. 17. Замкнутые технологические схемы использования теплоты отходящих газов:

а - для подогрева воздуха; *б* - для предварительного нагрева материала;
 1 - подвод топлива в печь; 2 - отвод газов из печи; 3 - рекуператор;
 4 - подвод воздуха в рекуператор; 5 - отвод дыма; 6 - подвод воздуха в печь;
 7 - подача подогретого материала в печь; 8 - подача холодного материала;
 9 - выдача материала

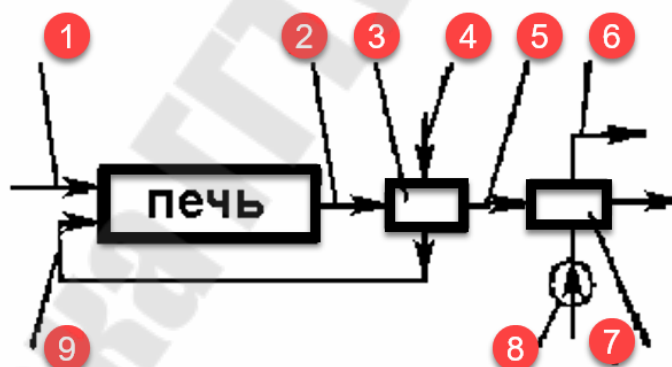


Рис. 18. Разомкнутая технологическая схема использования теплоты отходящих газов:

1 - подвод топлива; 2 - подача материала в основную печь; 3 - отвод газов из основной печи; 4 - подача материала в низкотемпературную печь; 5 - низкотемпературная печь; 6 - отвод газов из низкотемпературной печи; 7 - выдача материала из низкотемпературной печи; 8 - выдача материала из основной печи; 9 - подвод воздуха

Каждая из схем имеет достоинства и недостатки. Основным критерием для их сравнения является достигаемая экономия топлива. Однако этот критерий ещё не даёт основания для окончательной оценки схем. Здесь необходим технико-экономический расчёт, учи-

тывающий капитальные и эксплуатационные затраты, устойчивость потребления энергоносителей, полученных за счёт теплоты отходящих газов, и др.

3.4 Система испарительного охлаждения печей

Огнеупорная футеровка и ряд металлических деталей металлургических печей находятся в зонах высоких температур (до 1600-800 °С). Огнеупорная кладка (стены, под, свод и дымоходы) в среднем выдерживает температуру до 1200-1500 °С. Значительное количество деталей конструкций изготовлены из металлов, предельная температура которых не должна превышать 400-500 °С.

Для обеспечения надёжной работы печей применяется принудительное охлаждение элементов их конструкций. Перечислим ряд факторов, влияющих на срок службы охлаждаемых деталей: 1) тепловые нагрузки, 2) количество и 3) качество охлаждающей воды и 4) способ охлаждения.

Количество отводимой теплоты определяется тепловыми нагрузками на охлаждаемый элемент Q или удельными тепловыми нагрузками на единицу охлаждаемой поверхности (плотности теплового потока) q . Для разных печей и отдельных деталей эти показатели различны, зависят от температурного режима печей, разгара футеровки, конструкции и состояния тепловой изоляции охлаждаемых деталей и изменяются от минимальных в начале кампании печи до максимальных – в конце кампании.

Полная средняя тепловая нагрузка определяется по формуле

$$Q_{\text{ср}} = q_{\text{ср}} \cdot F, \quad (3.9)$$

где $Q_{\text{ср}}$ и $q_{\text{ср}}$ - соответственно средняя тепловая нагрузка и плотность теплового потока, Вт и Вт/м²;

F - тепловоспринимающая поверхность детали, м².

Размеры охлаждаемых деталей и их расположение обычно обусловлены конструкцией печи. Форма детали должна обеспечивать надёжность её охлаждения. Следует избегать острых углов и обогрева сверху, а также следует предусматривать надёжную изоляцию обогреваемых поверхностей, обеспечивающую минимально возможный отвод теплоты из печи.

В тепловых балансах печей потери на охлаждение составляют 10-20 %, а иногда и 30 % всей внесённой в печь теплоты. В черной

металлургии получили распространение два способа охлаждения печей: 1) водяное и 2) испарительное.

3.5 Испарительное охлаждение

В системах испарительного охлаждения (СИО) для отвода теплоты от деталей холодная вода заменена кипящей, при этом используется в основном скрытая теплота парообразования. Теплота, отбираемая охлаждающей водой, нагревает её до температуры кипения при данном давлении, после чего происходит парообразование. В пределах применяемых в СИО давлений (3-40 атм) на нагрев воды расходуется 130-630 кДж/кг теплоты; теплота парообразования составляет 2200-1700 кДж/кг. В итоге количество отбираемой 1 кг воды теплоты во всем диапазоне давлений составляет около 2300 кДж вместо 40-80 кДж при водяном, что позволяет сократить расход воды примерно в 30-50 раз.

Малый расход воды позволяет обеспечивать питание СИО химически очищенной водой, что увеличивает срок службы деталей в пять-десять раз. При испарительном охлаждении снижается расход электроэнергии на подачу воды, отпадает необходимость в сооружении громоздких дорогостоящих водоводов, насосных станций, гради-рен, бассейнов, прудов. Теплота, теряемая при водяном охлаждении, используется для получения пара, направляемого потребителям.

В отличие от водяного испарительное охлаждение предусматривает полное согласование отвода теплоты с технологией работы данной печи. Тепловые нагрузки охлаждаемых деталей переменны. При водяном охлаждении количество охлаждающей воды должно соответствовать максимальным нагрузкам во избежание повышения температуры воды и выпадения накипи. При испарительном – увеличение тепловой нагрузки приводит к турбулизации потока пароводяной смеси, и надёжность охлаждения сохраняется, т. е. процесс охлаждения саморегулируется.

Испарительное охлаждение применяют на доменных, топливных плавильных, нагревательных и других печах.

Во избежание трудностей, обусловленных применением прямоточной схемы испарения воды при переменных тепловых нагрузках для металлургических печей принята система испарительного охлаждения с многократной циркуляцией.

Принципиальная схема системы испарительного охлаждения представлена на рисунке 19. Охлаждаемые детали двумя трубами присоединяют к барабану-сепаратору. По опускной трубе к детали (к нижней её части) подводится вода. По подъёмной трубе образовавшаяся пароводяная смесь отводится (из верхней части) в барабан-сепаратор, где пар отделяется от

воды и направляется в паропровод. Взамен испарившейся в барабан подаётся свежая питательная вода, и смесь её с отсепарированной водой опять попадает в охлаждаемую деталь. Циркуляция воды в системе непрерывна. При этом возможна естественная или принудительная циркуляция.

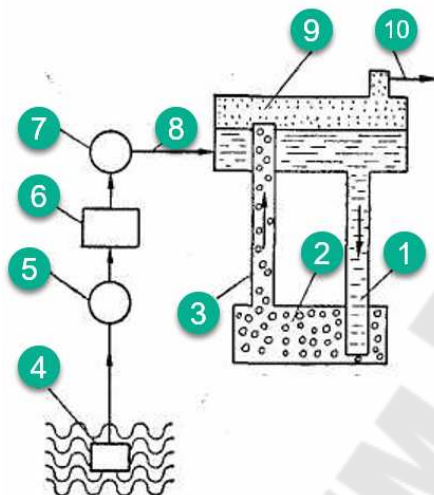


Рис. 19. Принципиальная схема системы испарительного охлаждения:
 1 - опускная труба; 2 - охлаждаемая деталь; 3 - подъемная труба;
 4 - водозаборное устройство; 5 - станция перекачки воды; 6 - химическая водоочистка; 7 - питательный насос; 8 - подвод питательной воды;
 9 - барабан-сепаратор; 10 - отвод насыщенного пара

При естественной циркуляции движущей силой является разность плотностей воды в опускной трубе и пароводяной смеси в подъемной трубе. Для принудительной циркуляции на опускной трубе устанавливают циркуляционный насос. На отечественных предприятиях в СИО обычно применяют естественную циркуляцию, обеспечивающую работу системы независимо от подачи электроэнергии.

Принудительную циркуляцию применяют лишь в частных случаях: для горизонтальных трубчатых элементов методических печей мелко- и среднесортных станов, при недостаточной высоте расположения барабанов-сепараторов над печами, а также при наличии некоторых особенностей охлаждения, например в нагревательных печах с шагающими балками, где направление движения пароводяной смеси обратно естественному (вода подаётся сверху, пар отводится снизу).

Движение воды в испарительном контуре характеризуется кратностью циркуляции, являющейся отношением количества воды, цир-

кулирующей в единицу времени в контуре, к количеству образовавшегося за это же время пара.

Параметры пара в СИО выбираются на основании анализа топливно-энергетических балансов и технико-экономических расчётов с учётом предельных параметров для данного типа установок. Так, предельные параметры пара для СИО доменных печей составляют 8 ат; двухванных сталеплавильных агрегатов - 25 ат; методических нагревательных - 47 ат.

Удельная выработка пара в СИО определяется для каждого агрегата отдельно. Так, например, в доменном производстве она составляет 0,2 кг/кг; прокатном - 0,3 кг пара на 1 кг продукции, соответственно.

Из-за относительно низких параметров пар испарительного охлаждения не всегда находит потребителей. В настоящее время используется менее 85 % пара СИО. Потребители насыщенного пара самые разнообразные. На металлургическом предприятии имеется несколько паропроводов (каждый для пара определенных параметров), к которым подключены как парогенерирующие установки (котлы, КУ, СИО и др.), так и потребители пара соответствующих параметров либо непосредственно, либо через преобразующие устройства. Из паропровода насыщенного пара пар в зависимости от давления используется в технологических цехах для различных нужд. В доменном производстве паром (давление пара 4-5 ат) увлажняют дутье, уплотняют засыпные аппараты доменных печей, обогревают рудные бункера и трубопроводы, а также применяют для технологических нужд в коксохимическом производстве.

Насыщенный пар находит потребителей в энергетическом хозяйстве предприятий: для водоподготовки производственных котельных ТЭЦ ПВС, паровакуумных холодильных установок, кондиционирования воздуха в горячих цехах, получения льда, в горячем водоснабжении бань, прачечных и др.

При дополнительном перегреве насыщенного пара в СИО более высокого давления (24-45 ат) его можно использовать в турбинах.

Низкопотенциальным паром снабжают деаэрационные, химические водоочистные и различные подогревательные установки, замещающая при этом пар промежуточных отборов паровых турбин. В этом случае весь пар турбины поступает в конденсатор, теплотехнические показатели теплофикационного турбогенератора несколько ухудшаются, но в целом по предприятию удельный расход топлива на выра-

ботку единицы теплоты уменьшается на 25-30 %. Такое замещение на деаэраторах не требует затрат, создаёт экономию 19-24 кг на 1 ГДж пара условного топлива. При замещении на подогревателях низкого давления экономия условного топлива составляет 9,5-12 кг/ГДж.

Как отмечалось выше, СИО работает на химически очищенной воде. В качестве резерва предусматривается временное питание технической водой.

3.6. Способы и устройства полезного использования тепла отходящих газов (ВЭР) плавильных и нагревательных печей

Проблема снижения энергоёмкости и экологической опасности топливо-использующих печей имеет особую актуальность для Республики Беларусь, которая в основном импортирует дорогостоящие природные энергоресурсы. Процессы плавки металлов при производстве литых заготовок являются наиболее энергоёмкими в металлообработке. На тонну чугуна и стали расходуется $(2,5 - 2,7) \cdot 10^6$ кДж или 750 – 1000 кВт ч тепловой энергии при термическом к. п. д. не превышающем 40 – 50 %.

Ещё более низкие показатели эффективности часто имеют печи для нагрева при обработке металлов давлением и термообработке. Термический к. п. д. таких печей составляет 7 – 10 %.

Таким образом, подавляющая часть затрачиваемого топлива – кокса и природного газа бесполезно теряется. Кроме того, отходящие дымовые газы содержат значительное количество пыли, оксидов углерода, серы и азота, что приводит к загрязнению окружающей среды.

Вместе с тем имеется возможность использовать высокотемпературное тепло отходящих газов топливных печей для нагрева воздуха, необходимого для сжигания топлива в печи, что позволяет возвращать до 30-35 % тепла. Соответственно достигается эквивалентное сокращение расхода дорогостоящего топлива.

Дополнительного эффекта можно добиться, используя низкотемпературные отходящие после рекуперации газы для подогрева воды, расходуемой в цехах на технологические и бытовые нужды, а также воздуха, который можно использовать в сушилах и для обогрева помещений в холодное время года.

Оснащение плавильных, термических и нагревательных печей в Республике Беларусь рекуператорами и утилизаторами тепла возможно осуществить силами самих предприятий при условии предварительного решения ряда научно-технических проблем, связанных с ис-

следованиями процессов теплопередачи при нестационарных режимах, переносом и осаждением аэрозолей, обеспечением термической и механической прочности теплопередающих конструкций, а также совершенствованием технологии плавки и термообработки с использованием горячего дутья. Особого внимания заслуживает также проблема обеспечения устойчивости системы печь-рекуператор, которая снижается вследствие усложнения агрегата и появления положительной обратной связи.

В настоящее время проблемы теплообмена, поиска и использования вторичных энергоресурсов (ВЭР) и связанные с ними технические вопросы находятся в центре внимания специалистов, работающих в области теплоэнергетики и экологии таких энергопотребляющих отраслей, как металлургия, нефтехимия и др. Крупные достижения в области теплофизики, механики аэрозолей, горения топлива, термодинамики и теории печей, создание технической базы для исследований высокотемпературных и быстро протекающих процессов, компьютерной техники обеспечивают возможность исследования процессов рекуперации и утилизации в условиях плавки и термообработки металлов.

Однако специфика технологии плавильных печей, в частности, нестабильность режимов и высокие удельные концентрации вредных веществ и пыли в выбросах, не позволяют заимствовать технические решения из смежных отраслей. Плавильные агрегаты и большинство нагревательных печей не являются стандартным оборудованием, параметры работы различны и разработка общих рекомендаций затруднена, а перенос определенных технических решений неэффективен. Внедрение рекуператоров и утилизаторов тепла отходящих газов сдерживается определенными трудностями. Среди них недостаточная эффективность теплообменных аппаратов, в которых теплоносителем являются загрязнённые отходящие печные газы, значительные по амплитуде колебания температуры подогреваемого дутья (в рекуператорах), что снижает устойчивость процесса плавки, отсутствие научно обоснованных рекомендаций по конструированию рекуператоров встроенного типа и методов расчёта, учитывающих нестационарные режимы работы печей и системы печь-рекуператор. Сюда же относится отсутствие методов расчёта и проектирования устройств для эффективного и стабильного дожигания отходящих газов непосредственно над слоем шихты. Недостаточно изучены также физико-химические и теплофизические аспекты работы теплообменных аппа-

ратов при нестационарных процессах, высоких концентрациях аэрозолей, адгезионные характеристики отложений и др. все это приводит к тому, что из общего количества ВЭР на предприятиях Минпрома РБ используется только 0,4 %. Вместе с тем, даже если рассматривать только высокотемпературные выбросы, можно утилизировать не менее 30 % теряемого в настоящее время тепла и сократить эквивалентное количество расходуемого топлива и электрометаллургии.

Достаточно простым способом использования ВЭР является рекуператор для подогрева воздуха или сжигаемого газа или того и другого одновременно. Такой способ позволяет вернуть в печь большую часть тепла, уносимого из рабочего пространства. Кроме того, сжигание топлива при подогретом воздухе даёт повышение температуры в печи, а следовательно, увеличение производительности, а в плавильных печах – температуры жидкого металла. Кроме того, в плавильных печах улучшаются практически все металлургические характеристики и качество металла. При подогреве до 300 – 350 °С экономия топлива в нагревательных печах составляет 20 – 25 % при отоплении газом или мазутом, в вагранках – до 20 % кокса.

Более высокой температуры нагрева и соответственно большего к.п.д. использования тепла можно достигнуть при установке дополнительной ступени – конвективного рекуператора вне вагранки. Вагранка при этом переоборудуется из открытого в закрытый тип и оснащается дымососом. Система подогрева дополняется аппаратами очистки сухого или мокрого типа. Наиболее рациональным является установка сухих пылеуловителей, например, типа циклонов, между I и II ступенями нагрева дутья, а мокрых (скрубберов или труб Вентури) на выходе. Нагрев дутья может достигать 500-550°C, а экономия кокса до 30 – 35 %. Однако, как уже упоминалось, сложный состав отходящих газов, нестабильные параметры, включая расход и температуру, аperiodические интенсивные пульсации затрудняют работу теплообменных аппаратов, приводят к образованию отложений, к снижению коэффициента теплоотдачи и, как следствие, к понижению температуры нагрева воздуха.

Далее, это приводит к понижению температуры в рабочей зоне и дополнительному снижению температуры дутья, что требует увеличения расхода топлива для компенсации снижения температуры жидкого металла. Очевидно этим, в частности, объясняется отсутствие широкого использования ВЭР путём рекуперации тепла. В Белоруссии опытно-промышленные рекуператоры установлены только на

двух заводах на плавильных печах, причём используется только один при относительно низком т. к. п. д. и температурой подогрева дутья до 120-150°C, что недостаточно для эффективной работы печи.

Рекуператоры для нагревательных и термических печей работают в более благоприятных условиях, т.к. отходящие газы имеют стабильный режим и не содержат пыль и агрессивные компоненты. Это позволяет использовать трубчатые конвективные рекуператоры и водоподогреватели (экономайзеры). Их установка обеспечивает подогрев дутья до 350–400°C (выше не целесообразно по соображениям техники безопасности) и повышение КПД до 30–35 %, а с экономайзерами до 55–60 %. Внедрение горячего дутья требует корректировки режимов нагрева и работы горелок, т.к. рабочий массовый расход воздуха при нагреве уменьшается.

Использование тепла отходящих газов в масштабах РБ обеспечит значительный экономический эффект и сокращение вредных выбросов в атмосферу за счёт пропорционального уменьшению расхода топлива.

3.6.1 Рекуперация тепла на вагранках 3 – 5 т/ч

Подогрев дутья за счёт тепла отходящих газов является наиболее эффективным средством повышения экономических, экологических и металлургических характеристик ваграночной плавки. За счёт повышения температуры дутья соответственно увеличивается температура в зоне горения кокса, что приводит к повышению температуры выплавляемого чугуна и шлака. При прочих равных условиях на каждые 100°C подогрева дутья температура металла практически увеличивается на 25...30°C. Повышение температуры металла и шлака способствует улучшению качества выплавляемого чугуна и снижению брака отливок. Кроме того, улучшаются эксплуатационные характеристики вагранки. Если значительного повышения температуры жидкого металла не требуется, то за счёт подогрева дутья обеспечивается экономия кокса: при подогреве на каждые 100°C сокращение расхода кокса составляет 6...8% от веса металлозавалки.

Подогрев дутья за счёт тепла отходящих газов предполагает интенсивное сжигание оксида углерода (СО), что приводит к резкому сокращению выбросов СО в атмосферу, соответственно уменьшается плата за выбросы.

Исходя из конкретных условий работы вагранок 3-5 т/ч для утилизации ВЭР может быть использован встроенный щелевой одно или двухходовой радиационный рекуператор. Нагрев дутья при опти-

мальном режиме плавки обеспечивается до 300-350°C за счёт тепла отходящих газов. Условием эффективной работы рекуператора является устойчивое горение газов в трубе вагранки, где устанавливается рекуператор, при температуре 900...1100°C.

Стабильное горение обеспечивается за счёт непрерывного поджигания ваграночных газов в зоне завалочного окна горелкой, работающей на газообразном топливе.

Дополнительный воздух подводится выше завалочного окна в количестве 25-50% от расчётного количества отходящих (колошниковых) газов в зависимости от концентрации CO (рисунок 20).

Рекуператор монтируется непосредственно над завалочным окном вагранки. Несущей конструкцией и одновременно наружным корпусом является ствол вагранки. Внутренний корпус рекуператора представляет собой цилиндр диаметром 1,05 м, выполненный из нержавеющей жаропрочной стали типа 15X25Т или 15X28 толщиной 6-8 мм. Высота рабочей части ~8 м. Внутренний корпус снабжён компенсаторами линейного расширения. Между внутренним корпусом и кожухом вагранки устанавливается промежуточная обечайка из конструкционной стали толщиной 3 мм. Воду от воздуходувки поступает в коллектор над завалочным окном. Из коллектора по щелевому каналу поступает в кольцевое пространство и движется вверх между корпусом вагранки и обечайкой, где нагревается до 60-100°C. Затем – сверху вниз по каналу между обечайкой и внутренним корпусом, где нагревается до 350-400°C. Горячий воздух собирается в коллектор и отсюда подаётся в фурмы вагранки. Температура на входе в рабочую зону вагранки составляет 300-350°C.

Отходящие ваграночные газы имеют температуру 250-300°C на выходе из слоя шихты. Состав газов: CO₂–(10-12)%; CO–(12-18)%; O₂–(0-0,5)%; SO₂–(0,1-0,2)%; NO–(0,01-0,05)%; N₂–остальные.

После разбавления воздухом, подсасываемым через завалочное окно, расход газов может увеличиваться в 1,5-2,5 раза, соответственно меняется концентрация компонентов.

В случае прорыва из слоя шихты в зону завалочного окна высокотемпературных струй газов с температурой 650°C ваграночные газы воспламеняются. При этом CO сгорает с выделением большого количества тепла и газы нагреваются до 900-1100°C. Горение в трубе вагранки неустойчивое из-за высокой скорости движения (10-15 м/с) и нестабильного состава. Устойчивости горения и соответственно дожигания газов CO можно достичь при постоянном поджигании с

помощью горелок. Кроме того, высота трубы (дина пути горения) должна быть не менее восьми диаметров, т.е. ~ 8 м, а температура $1000...1100^{\circ}\text{C}$. При этом остаточная концентрация CO будет менее 0,1%, т.е. $\sim 1,2$ г/м³ (при исходной 150-220 г/м³). В час вагранка выбрасывает без дожигания 450...1000 кг CO. При эффективном дожигании 1,6...2,4 кг CO.

Количество тепла, которое уносят ваграночные газы составляет 0,4...0,5 млн.Вт/т производительности вагранки (0,4...0,5 кВт/м³), или 2,6...3,0 млн. Вт при производительности 5 т/ч, т.е. примерно половину тепла, получаемого от сжигания кокса. Количество тепла, необходимое для нагрева дутья до 350°С составляет 0,7...0,8 млн. Вт, или (30...35)% от тепла отходящих газов.

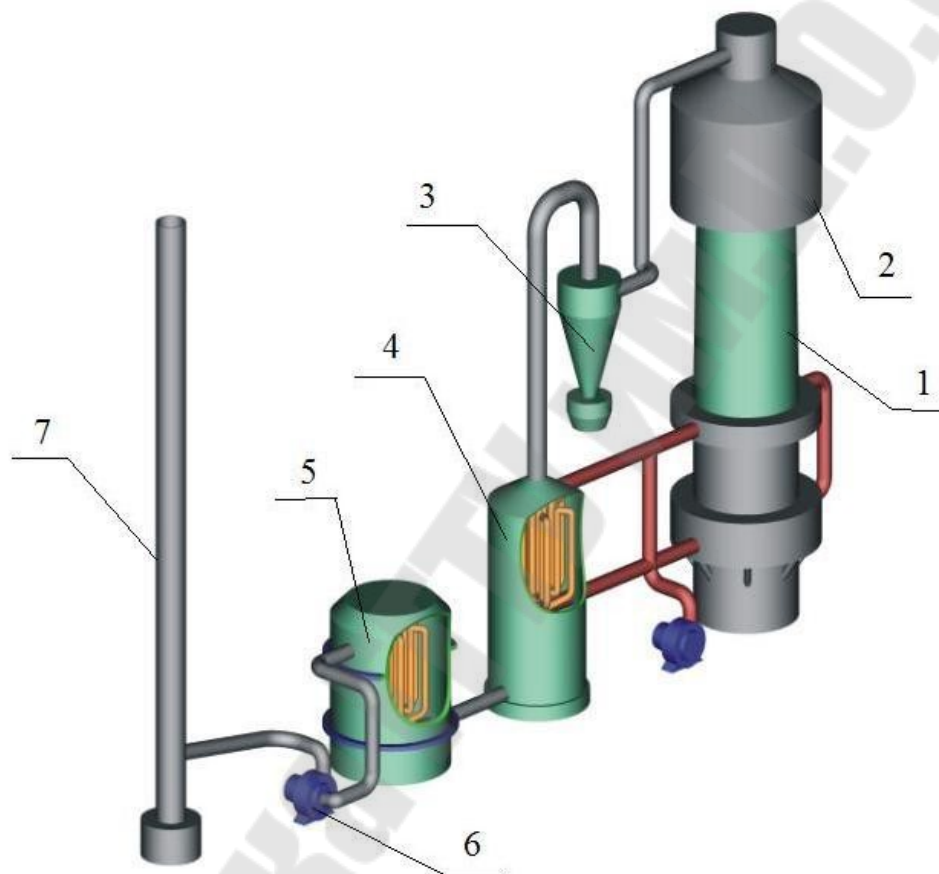


Рис. 20. Состав ваграночного комплекса: 1 - встроенный радиационный рекуператор; 2 - пылеуловитель 1-й степени очистки; 3 - пылеуловитель 2-й степени очистки; 4 - выносной конвективный рекуператор; 5 - утилизатор-водоподогреватель; 6 - дымосос, 7 - дымовая труба.

Данные вагранки 3-5 т/ч:

Расход дутья – $(2,5-6,0) \cdot 10^3$ м³/час. Расход отходящих ваграночных газов до разбавления – $(3,0-7,0) \cdot 10^3$ м³/час. То же после разбав-

ления воздухом – $(4,5-12) \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{час}$. Температура отходящих газов до дожигания – $(250-300)^\circ\text{C}$. То же при дожигании – $(900-1100)^\circ\text{C}$. Запылённость газов – $(3-6) \text{ г}/\text{м}^3$.

Концентрация CO до дожигания – $(12-18)\%$ – $(150-220) \text{ г}/\text{м}^3$. То же после дожигания – $(0,1-0,2)\%$ – $1,2-2,5 \text{ г}/\text{м}^3$. Количество CO выбрасываемого в атмосферу: без дожигания – $(450-1000) \text{ кг}/\text{ч}$; после дожигания до $0,1\%$ – $(3,6-8,4) \text{ кг}/\text{ч}$. Расход кокса – $18,5\%$ от металлозавалки. То же на одну тонну годного литья – 300 кг . Температура металла на жёлобе – $(1340-1400)^\circ\text{C}$. Выпуск литья – $(4,5-5,0) \text{ тыс. т.}/\text{год}$. Стоимость одной тонны кокса – 135 долл .

Снижение расхода кокса на 20% при подогреве дутья до 300°C составляет 37 кг на тонну металлозавалки или $60 \text{ кг}/\text{т}$ годного литья, что за год составляет $270-300 \text{ т}$ кокса.

3.6.2. Использование ВЭР обжиговых печей

Одним из наиболее энергоёмких процессов является обжиг оболочек для точного литья. Процесс осуществляется в газовой проходной печи с расходом природного газа $110 \text{ м}^3/\text{ч}$ в течение $8-10 \text{ час}$. Нагрев ведётся до 950°C , что соответственно приводит к необходимости поддерживать температуру в печи $\sim 1000^\circ\text{C}$ и выше. С такой же температурой газы покидают печь. При этом к. п. д. печи составляет (по температурному перепаду) около 20% в начальный момент нагрева и 10% в конце процесса. Таким образом, в окружающую среду сбрасывается от 3476000 до 3090000 кДж в час. При этом с отходящими газами, нагретыми до $800-850^\circ\text{C}$ теряется до 90% от общих потерь тепла: $2,8 \dots 3,12 \text{ млн. кДж}$ при расходе $2,8 \dots 3,6 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$.

Данное количество тепла можно использовать для рекуперации, т.е. возврата части тепла отходящих газов в печь с целью сокращения расхода природного газа. В этом случае в конвективном трубчатом рекуператоре нагревают $1200 \dots 1300 \text{ м}^3$ воздуха до температуры $350 \dots 400^\circ\text{C}$ и подают к газовым горелкам. При этом соответственно сокращается расход топлива для отжига оболочек, т.е. вместо расходуемых в настоящее время 110 м^3 газа в час достаточно $85 - 90 \text{ м}^3$ для достижения той же температуры в обжиговой печи. При использовании этого варианта необходимо на печах заменить инжекционные горелки на двухпроводные с принудительной подачей воздуха.

За год при годовом фонде времени работы печей 6000 ч экономия природного газа составит $V_r = (20 \div 25) \times 6000 = (120 \div 150) \text{ тыс. м}^3$.

К. п. д. установки в этом случае повышается на $(18 \dots 20)\%$, т.е. составит $30 \dots 35\%$. С отходящими газами по прежнему будет выбра-

сываться в окружающую среду 55...60% тепла, полученного в печи от сжигаемого природного газа. Остальное ($\approx 10\%$) теряется через стенки и неплотности корпуса печи.

Второй вариант утилизации тепла отходящих газов – нагрев воздуха до температуры 60...100°C с целью использования его для (обогрева) помещения цеха (рисунок 21). В этом случае воздухоподогреватель аналогичного типа выполняется из конструкционной стали типа сталь 20 или аналогичной, т.к. температура стенки труб нагревается не более 350...400°C в наиболее напряженной зоне. Применение петлеобразных труб позволяет нейтрализовать тепловое расширение без дополнительных компенсаторов. При низкотемпературном нагреве к.п.д. использования тепла в воздухоподогревателе значительно выше и может достигать 85 – 90 % от исходного количества тепла, содержащегося в дымовых газах. Это позволяет нагреть 20...25 тыс. м³ воздуха в час. Для получения эквивалентного количества тепла необходимо было бы затратить 85...100 м³ природного газа.

Воздухоподогреватель традиционного типа выполняется из блоков петлеобразных труб, по 12 труб в каждом. Всего необходимо 20 блоков и соответственно 240 труб. Общая площадь для прохода воздуха 0,48 м², что обеспечивает скорость движения воздуха при нормальных условиях 12...15 м/с. Общая площадь теплообмена 190 м². Схема движения дымовых газов и воздуха – перекрёстная с шахматным расположением труб. Скорость дымовых газов 0,85 м/с в расчёте на нормальные условия. Коэффициент теплопередачи на дымовой стороне 33,6 Вт/м²К, на воздушной 41,8 Вт/м²К. Суммарный коэффициент теплопередачи в воздухоподогревателе 18,6 Вт/м²К. Количество труб может быть уменьшено при установке труб большего диаметра, например Ду 75, т.к. необходимая поверхность теплообмена значительно меньше, чем полученная в расчёте по аэродинамическим критериям (по скорости движения воздуха).

С целью отключения воздухоподогревателя для ремонта или в летнее время, когда не нужен подогретый воздух, предусматривается отвод дымовых газов по существующей схеме через зонты в атмосферу.

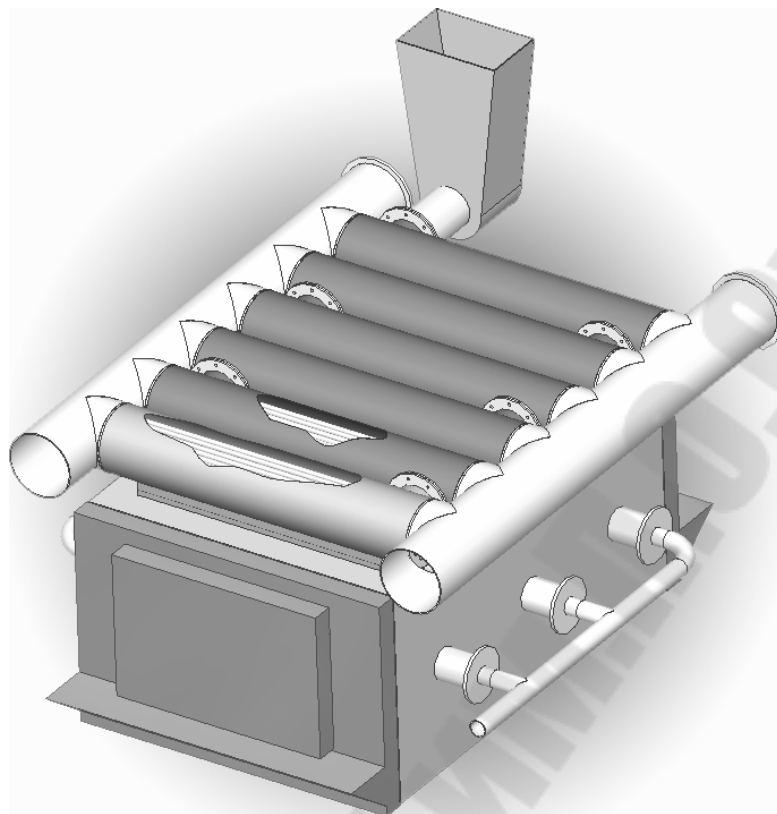


Рис. 21. Схема конвективного блочного рекуператора для нагревательной печи

Возможен также третий вариант использования тепла отходящих газов от печей обжига. Вариант предусматривает нагрев воздуха с расходом $600 \dots 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ до температуры $300 \dots 350^\circ\text{C}$ для использования в установке сушки песка в кипящем слое, а также нагрев $15 \dots 20 \text{ тыс. м}^3$ воздуха до температуры $60 \dots 100^\circ\text{C}$ для использования в системе обогрева цеха. Воздух для высокотемпературного нагрева подаётся от вентилятора с параметрами: расход – $0,6 \dots 1,0 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$ и напор 3 кПа в крайние секции воздухоподогревателя через участки воздушных коллекторов на горячей и холодной стороне. Блоки для нагрева воздуха до 350°C изготавливаются из жаростойкой стали. Устанавливается по одному блоку с торцов печи. Далее горячий воздух по трубопроводу с теплоизоляцией поступают к установке сушки песка в кипящем слое. Данного количества воздуха достаточно для высушивания $0,35 \text{ т}$ песка в час при исходной влажности $5 \dots 10 \%$ до конечной – $0,5 \dots 1,0 \%$. При необходимости большей степени осушения соответственно снижается производительность (до $0,3 \text{ т/ч}$) или увеличивается расход воздуха. Если высокотемпературный нагрев не

требуется, вентилятор отключается и воздухоподогреватель работает по варианту два, т.е. полностью на обогрев цеха.

Коэффициент использования тепла отходящих газов в этом варианте тот же, что и во втором, но экономический эффект выше за счёт ликвидации затрат топлива на сушку песка ($\sim 20 \text{ м}^3/\text{ч}$).

Третий вариант является наиболее рациональным, так как имеет большую технологическую гибкость, кроме того, стоимость теплообменной части ниже, чем в первом варианте - меньше труб из легированной жаростойкой стали. Дополнительные затраты на вентилятор, трубопроводы и шиберы невелики.

Сушка песка в кипящем слое является наряду с сушкой в пневмопотоке наиболее экономически и теплотехнически эффективным процессом. К.п.д. таких установок от 60 до 85 % в зависимости от начальной температуры газов (воздуха) на входе.

Установка сушки песка в кипящем слое, рассчитанная на производительность 0,35 т песка в час имеет следующие характеристики: удельный расход газа при работе на газовом топливе 8 – 10 м^3 на 1 т. песка; удельная производительность 1 – 3 т/ч с 1 м^2 полезной площади в зависимости от начальной температуры газов (воздуха); конечная влажность до 0,1 %; скорость газов (воздуха) в слое 0,8 – 1,0 м/с в расчёте на полное сечение аппарата; высота слоя песка над решёткой 0,3 – 0,35 м; сопротивление 2 – 3 кПа.

По условиям завода представляется целесообразным предусмотреть подачу в установку сушки песка горячего 300 – 350°C воздуха от воздухоподогревателя печей обжига или продуктов сжигания природного газа от двухпроводной горелки производительностью 5 $\text{м}^3/\text{ч}$.

4 РЕКУПЕРАТОРЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Использование физической теплоты воздуха $Q_{ф.в}$ и газообразного топлива $Q_{ф.т}$ снижает расход топлива, так как она получена за счёт охлаждения дымовых газов перед выбросом их в атмосферу, т.е. для нагрева компонентов горения не расходовалась дополнительная химическая энергия топлива. Этот способ сокращения расхода топлива получил название: утилизация теплоты уходящих газов в рекуператорах или регенераторах.

Эффективность утилизации теплоты уходящих газов оценивают степенью рекуперации (регенерации) которая показывает, какую долю теплоты уходящего дыма удастся вернуть в рабочее пространство с нагретым воздухом и газообразным топливом.

Рекуператоры применяют, в основном, в нагревательных печах различного назначения. Регенераторы нашли применение как в плавильных, так и в нагревательных печах.

4.1 Схемы рекуператоров: прямоток, противоток, перекрёстный ток

Рекуператор – это теплообменник стационарного режима работы, в котором теплота непрерывно передаётся от дымовых газов к нагреваемому газу (воздуху либо газообразному топливу) через сплошную твёрдую стенку. Площадь поверхности этой разделяющей стенки называют поверхностью теплообмена F , m^2 . Чаще всего стенка имеет цилиндрическую форму, т.е. выполняется в виде трубы, внутри которой протекает один теплоноситель, а снаружи – другой.

По схеме движения горячего и холодного теплоносителей различают рекуператоры прямоточные, противоточные и перекрёстного тока (рис. 5.1).

По преобладающему виду теплоотдачи от дымовых газов к стенке рекуператоры могут быть конвективными, радиационными и конвективно-радиационными.

В зависимости от материала стенки различают керамические и металлические рекуператоры.

Материалом для металлических рекуператоров служат хромоникелевые стали типа X18H10T, X25H20C2 с допустимой температурой дыма перед рекуператором 1100-1200°C, либо хромистая сталь типа X17 с допустимой температурой дыма не более 1000 °C. Толщина стальной стенки $S = 2-3$ мм. Температура нагрева воздуха (или газа) в существующих рекуператорах не превышает 400-500°C.

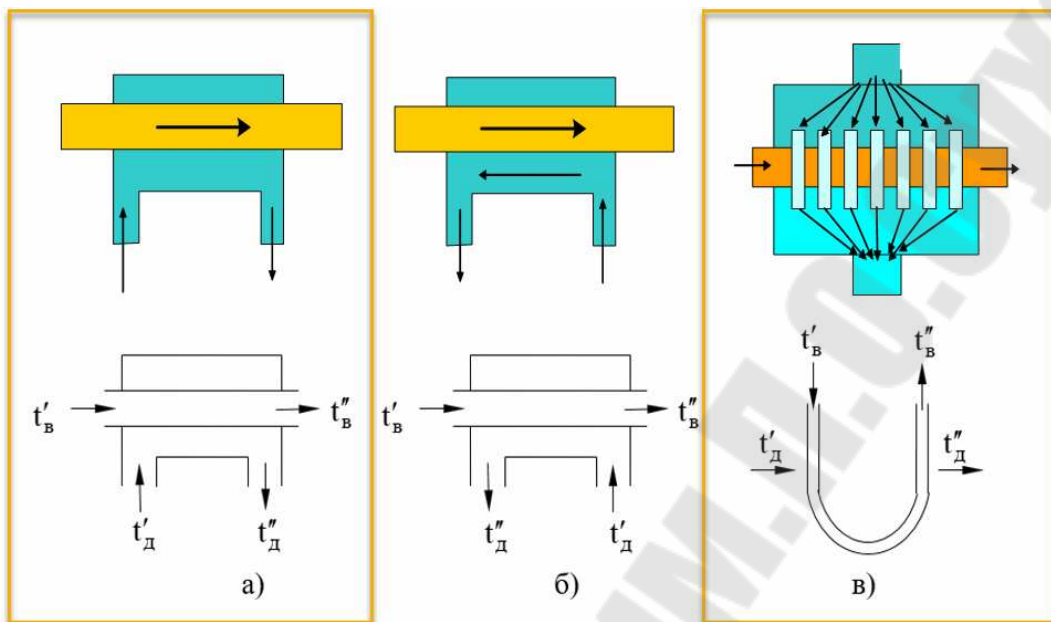


Рис. 22. Схемы движения теплоносителей в рекуператоре: а – прямоток; б – противоток; в-перекрёстный ток.

Керамические рекуператоры выполняют из карбошамотных или шамотных восьмигранных трубок длиной 300-350 мм, с толщиной стенки $S = 10-12$ мм, а также реже из шамотных пустотелых блоков. В керамических рекуператорах нагревают только воздух ввиду их негерметичности. Максимальная температура дыма перед рекуператором 1250-1300 °С, нагретого воздуха – 800-850 °С. Более высокая температура воздуха – единственное преимущество керамических рекуператоров, недостатками их являются:

1. неплотные соединения трубок между собой, через которые происходит утечка воздуха, изменяющаяся в процессе службы и нарушающая нормальное сжигание топлива;
2. большие габаритные размеры из-за высокого теплового сопротивления керамической стенки, в связи с чем коэффициент теплопередачи в 4-5 раз меньше, а поверхность теплообмена во столько же раз больше, чем у металлического рекуператора.

4.1.1 Теплообмен и температурные поля в рекуператорах

Рассмотрим схему теплообмена при передаче теплоты через стенку рекуператора (рисунок 23). Для определённости будем считать, что в рекуператоре нагревается сухой воздух, состоящий из двухатомных газов N_2 и O_2 , которые прозрачны для тепловых лучей.

Слева от стенки находится горячий теплоноситель – дым, в составе которого имеются трёхатомные продукты горения CO_2 и H_2O , способные излучать тепловой поток. В связи с этим коэффициент теплоотдачи от дыма к стенке включает лучистую $\alpha_{\text{д}}^{\text{луч}}$ и конвективную $\alpha_{\text{д}}^{\text{к}}$ составляющие: $\alpha_{\text{д}} = \alpha_{\text{д}}^{\text{луч}} + \alpha_{\text{д}}^{\text{к}}$, тогда как со стороны воздуха только конвективную $\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{в}}^{\text{к}}$.

Тепловой поток от дыма к воздуху преодолевает три тепловых сопротивления: от дыма к стенке – $1/\alpha_{\text{д}}$, внутреннее сопротивление стенки – S/λ и от стенки к воздуху – $1/\alpha_{\text{в}}$. Как известно из теплотехники, коэффициент теплопередачи для плоской стенки будет равен

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{д}}} + \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (4.1)$$

а тепловой поток через стенку площадью F , м^2

$$Q = k \cdot \bar{\Delta t} \cdot F, \text{ Вт}, \quad (4.2)$$

где k и $\bar{\Delta t}$ – средние по поверхности F значения коэффициента теплопередачи и разности температур между дымом и воздухом.

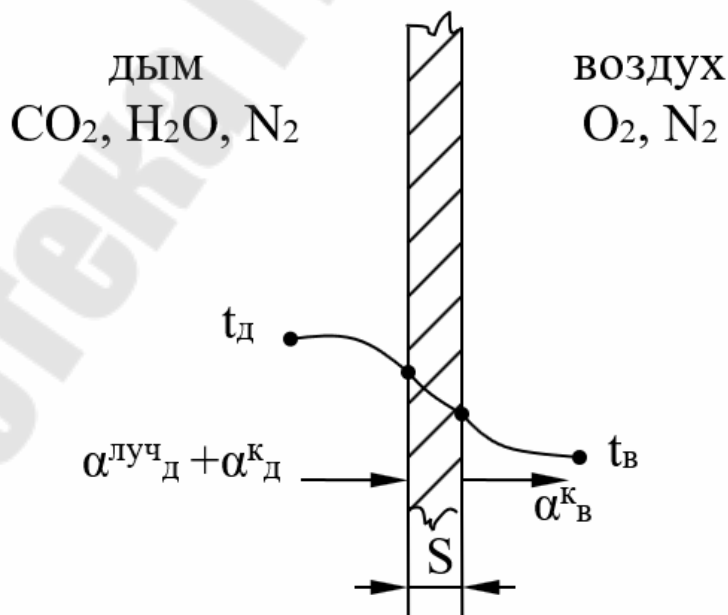


Рис. 23. Схема теплопередачи через стенку рекуператора

Выражение (4.2) называют уравнением теплопередачи в рекуператоре, а $\bar{\Delta t}$ - средним "температурным напором", который находят по формуле среднего логарифмического (вывод формулы мы не приводим)

$$\bar{\Delta t} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} \quad (4.3)$$

Обозначения величин $\Delta t'$ и $\Delta t''$ показаны на рисунке 24. $\Delta t'$ и $\Delta t''$ представляют из себя разности температур дыма и воздуха через разделительную стенку на входе и выходе дымовых газов из рекуператора.

Характер температурных полей на рисунке 24 определяется уравнением теплового баланса рекуператора

$$G_d \cdot (i'_d - i''_d) \cdot (1 - \eta_{\text{пот}}) = G_b \cdot (i''_b - i'_b)$$

или

$$G_d \cdot \bar{c}_d (t'_d - t''_d) \cdot (1 - \eta_{\text{пот}}) = G_b \cdot \bar{c}_b (t''_b - t'_b), \quad (4.4)$$

где G_d и G_b – массовые расходы дыма и воздуха, кг/с; t'_d и t''_d – температуры дыма на входе в рекуператор и на выходе из него, °С; t'_b и t''_b – то же для воздуха, °С;

$\eta_{\text{пот}} = 0,05-0,1$ – коэффициент потерь теплоты в окружающую среду.

Из уравнения теплового баланса (4.4) для идеального рекуператора (при $\eta_{\text{пот}} = 0$) получаем соотношения

$$\frac{G_d \cdot \bar{c}_d}{G_b \cdot \bar{c}_b} = \frac{t''_b - t'_b}{t'_d - t''_d} \quad (4.5a)$$

или

$$t'_d - t''_d = (t''_b - t'_b) \cdot \frac{G_b \cdot \bar{c}_b}{G_d \cdot \bar{c}_d} \quad (4.56)$$

По физическому смыслу, $G_d \cdot \bar{c}_d$ и $G_b \cdot \bar{c}_b$ – это теплоемкости секундного расхода дыма и воздуха (водяные эквиваленты). Из (4.56) следует вывод: чем больше теплоёмкость теплоносителя, тем меньше изменяется его температура в рекуператоре.

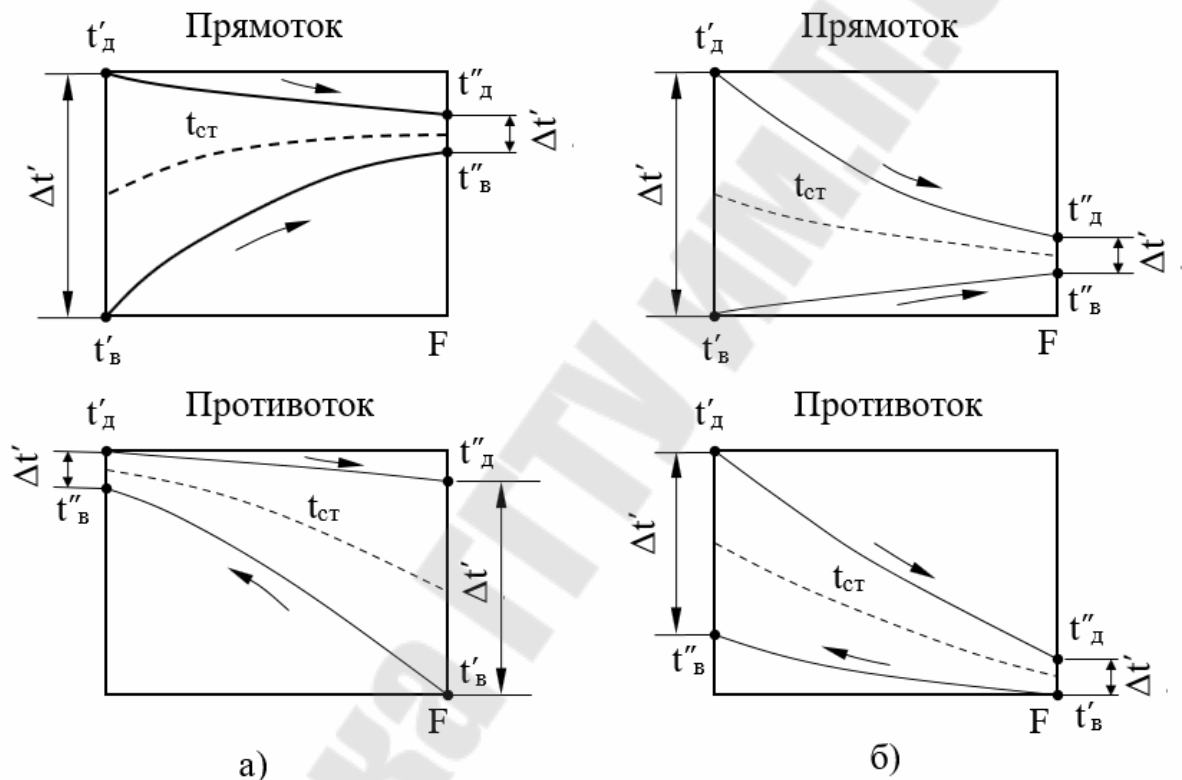


Рис. 24. Температурные поля рекуператоров вдоль поверхности F разделительной стенки рекуператора:

а – при $G_d \cdot \bar{c}_d > G_b \cdot \bar{c}_b$; б – при $G_d \cdot \bar{c}_d < G_b \cdot \bar{c}_b$; t_{ct} – температура разделительной стенки рекуператора

На рисунке 24 представлены температурные поля прямоточного и противоточного рекуператоров при $G_d \cdot \bar{c}_d > G_b \cdot \bar{c}_b$ и при $G_d \cdot \bar{c}_d < G_b \cdot \bar{c}_b$. Анализируя рисунок 24, мы видим, что температура нагрева воздуха t''_b при одинаковых значениях t'_d и t'_b в прямоточном рекуператоре стремится к t''_d , а в противоточном – к t'_d , т.е. t''_b

будет меньше в прямоточном рекуператоре, при этом из-за существенного уменьшения текущего значения $\Delta t = t_d - t_b$ количество передаваемой теплоты также уменьшается, поэтому в прямоточном рекуператоре экономически обоснованным считается предельное значение $t_b'' \leq 0,5t_d''$.

4.1.2 Схема расчёта рекуператора

Цель расчёта рекуператора состоит в определении величины поверхности теплообмена F , которая является исходным параметром при проектировании. Массовые расходы теплоносителей и температуры t_b' , t_b'' и t_d' должны быть заданы.

В расчёте рекуператора используются два уравнения: теплового баланса (4.4) и теплопередачи (4.2).

Из уравнения (4.4) находят неизвестную температуру дыма на выходе из рекуператора t_d'' и количество передаваемой воздуху теплоты Q .

$$Q = G_b \cdot \bar{c}_b (t_b'' - t_b').$$

Из уравнения (4.2) определяют искомую величину поверхности теплообмена

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t}.$$

Коэффициент теплопередачи "k" находят по формуле (4.1). В металлических рекуператорах внутреннее тепловое сопротивление стенки S/λ пренебрежимо мало по сравнению с величинами $1/\alpha_d$ и $1/\alpha_b$, поэтому формула (4.1) упрощается:

$$k = \alpha_d \cdot \alpha_b / (\alpha_d + \alpha_b).$$

4.2 Промышленные рекуператоры. Типовые конструкции рекуператоров металлургических печей: керамический рекуператор, металлический петлевой рекуператор, блочный рекуператор и др.

Конструкции рекуператоров разнообразны. В качестве примера рассмотрим рекуператоры трех конструкций:

Петлевой трубчатый рекуператор перекрёстного тока (рисунок 25) выполняется из металлических труб $\varnothing 57/50$ мм, устанавливается в дымовом канале. Достоинством его является свободное удлинение

труб при разогреве рекуператора, так как трубы находятся в подвешенном состоянии и не испытывают термических напряжений.

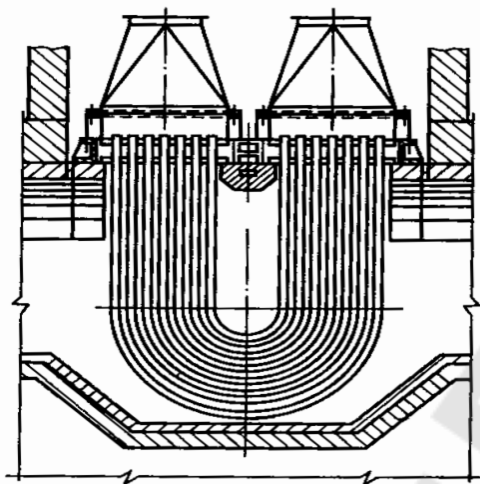


Рис. 25. Петлевой трубчатый рекуператор

Воздух входит в один из двух коллекторов, затем движется внутри труб по петлевой траектории и выходит из второго коллектора. Поток дыма проходит вдоль дымового канала между трубами. Эти рекуператоры широко применяются на нагревательных печах для подогрева воздуха и газообразного топлива.

Струйный радиационный рекуператор (рисунок 26) имеет плоскую поверхность теплообмена в виде металлического листа.

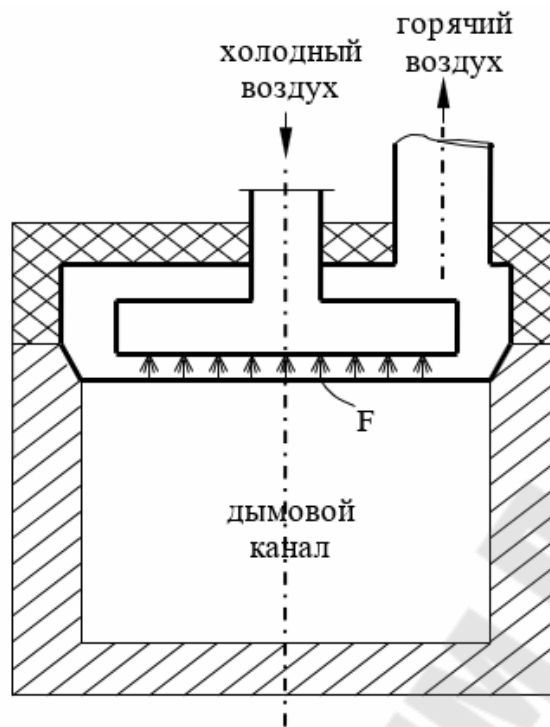


Рис. 26. Схема струйного радиационного рекуператора

Струйный рекуператор устанавливается на дымовой канал сверху. Дым проходит по каналу под рекуператором и передаёт теплоту на поверхность теплообмена в основном излучением, так как скорость движения дыма в канале мала (2-3 м/с), а его температура довольно высока – обычно более 1000 °С. Поэтому конвективный тепловой поток от дыма к поверхности теплообмена значительно меньше, чем лучистый. Воздушные струи истекают из мелких отверстий коллектора на поверхность теплообмена, при этом конвективная теплоотдача от поверхности к воздуху происходит более интенсивно, чем при движении воздуха вдоль поверхности теплообмена.

Керамический трубчатый рекуператор (рисунок 26) перекрёстного тока служит для подогрева воздуха до 800-850 °С. Дымовые газы проходят обычно внутри труб, воздушный поток омывает поверхность труб снаружи. Трубы выполняются из шамота, либо из смеси шамота с карборундом (SiC). Как отмечалось выше, керамические рекуператоры имеют низкую газоплотность (из-за большого количества недостаточно плотных соединений труб между собой) и низкий коэффициент теплопередачи $k = 5-10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. В связи с этим для высокотемпературного подогрева воздуха и газообразного топлива целесообразно применять регенераторы.

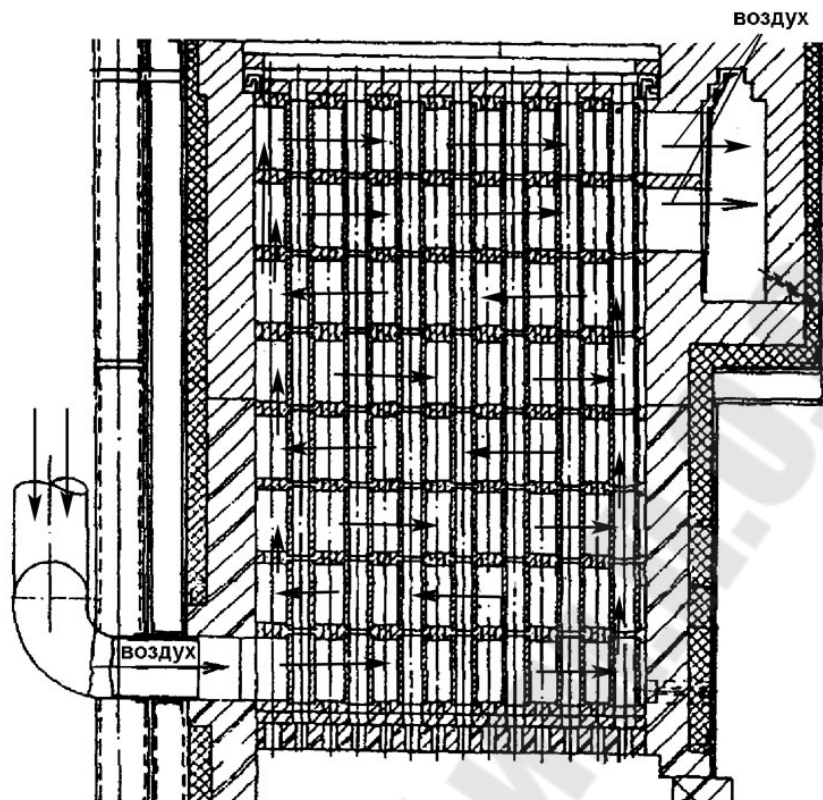


Рис. 27. Керамический трубчатый рекуператор

4.3 Характеристики регенераторов. Схема работы регенеративной системы отопления печей. Достоинства и недостатки регенераторов

Регенератор металлургической печи представляет собой камеру, заполненную многорядной решёткой (насадкой) из огнеупорного кирпича, чаще всего динасового и шамотного, или из других штучных изделий.

В работе регенератора различают два рабочих периода времени – τ_1 и τ_2 . В течение периода τ_1 через регенератор проходит горячий теплоноситель – дым, который нагревает кирпичную насадку. Это дымовой период или период нагрева насадки. В течение периода τ_2 через регенератор пропускают холодный теплоноситель – воздух или газообразное топливо. Это период дутья или период охлаждения насадки. Насадка отдаёт ранее аккумулированную теплоту нагреваемому воздуху или газу, т.е. выполняет роль посредника в теплообмене между дымом и воздухом (газом).

Печь потребляет топливо и воздух непрерывно, поэтому она должна иметь как минимум два регенератора для нагрева воздуха и два – для нагрева топлива, если есть необходимость в нагретом топливе. Такая необходимость возникает при отоплении печи низкокалорийным газом, чтобы обеспечить достаточную температуру горения.

При наличии на печи одной пары регенераторов продолжительность периодов нагрева и охлаждения насадки одинакова $\tau_1 = \tau_2$. По два воздушных регенератора имеют мартеновские и нагревательные печи. Регенеративные нагревательные колодцы, работающие на доменном газе, имеют два воздушных и два газовых регенератора. В доменных воздухонагревателях длительность дымового и воздушного периодов разная, поэтому доменные печи оборудованы тремя или четырьмя регенераторами (кауперами). Если число регенераторов "n" больше двух, то $\tau_2 = (\tau_1 + \Delta\tau)/(n-1)$, где $\Delta\tau$ – длительность операции переключения с дымового периода на воздушный и наоборот. Эту операцию на производстве называют "перекидка клапанов".

Движение газов в регенераторах противоточное, греющий и нагреваемый газы проходят по одним и тем же каналам насадки, но в разные периоды времени и в противоположном направлении.

Таким образом, регенератор, в отличие от рекуператора, – это теплообменник нестационарного режима работы, в котором теплота передаётся от дымовых газов к воздуху либо топливу с помощью периодического нагрева и охлаждения огнеупорной насадки.

Преимущество регенераторов состоит в возможности работы в условиях более высоких температур, при сохранении герметичности даже при высоком давлении теплоносителей. В доменных воздухонагревателях и в мартеновских печах температура дыма на входе в насадку $t'_д = 1400-1600$ °С, она ограничивается свойствами керамической насадки: огнеупорностью, термостойкостью, шлакоустойчивостью. Температура нагрева воздуха достигает значений $t''_в = 1300-1400$ °С.

Недостатком регенераторов является необходимость перекидки клапанов и колебание температуры нагретого воздуха (топлива). Температурное поле регенератора представлено на рисунке 28. При постоянной температуре дыма $t'_д$ и воздуха $t'_в$ на входе в насадку температуры $t''_д$ и $t''_в$ изменяются во времени. В начале дымового периода охлаждённая ранее насадка поглощает большее количество теплоты, чем в конце периода, когда разность температур дыма и насадки становится меньше. Поэтому на рисунке 28 температура дыма на выходе из насадки в начале дымового периода $t''_{д.н}$ меньше, чем в конце $t''_{д.к}$ этого периода.

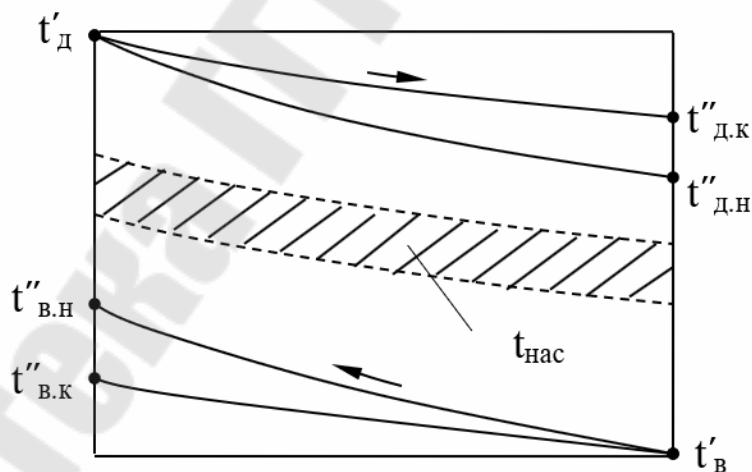


Рис. 28. Температурное поле регенератора:

$t'_д, t'_в$ – температура дыма и воздуха на входе в регенератор; $t''_{д.н}, t''_{д.к}$ – температура дыма на выходе из регенератора в начале и в конце дымового периода; $t''_{в.н}, t''_{в.к}$ – температура нагрева воздуха в начале и в конце воздушного периода; $t_{нас}$ – температура насадки. За-

штрихована область изменения $t_{\text{нас}}$ в течение цикла «нагрев – охлаждение»

Температура нагрева воздуха выше в начале воздушного периода, когда насадка имеет наиболее высокую температуру, т.е. $t''_{\text{вн}} > t''_{\text{вк}}$.

Чтобы не допускать значительного колебания температуры нагрева воздуха или топлива, перекидку клапанов делают через несколько минут. Уменьшение длительности периодов τ_1 и τ_2 полезно с точки зрения уменьшения объёма насадки. Недостатком является снижение срока службы механических перекидных устройств.

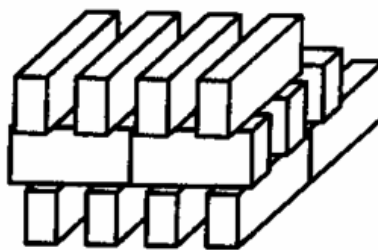
4.4 Конструкции регенераторов. Насадка регенераторов. Условия эксплуатации регенераторов

Наибольшее распространение получили насадки (решётки) из обыкновенного кирпича – динасового и шамотного. В зависимости от способа укладки кирпичей различают насадки типа Сименс (рисунок 29) и типа Каупер (рисунок 29б). Насадка Каупера имеет только вертикальные каналы, она обладает повышенной строительной прочностью, но её удельная поверхность теплообмена, т.е. площадь соприкасающейся с газами поверхности кирпичей в м^2 на 1 м^3 насадки, меньше, чем у насадки Сименса.

Насадка Сименса имеет вертикальные и горизонтальные каналы, её строительная прочность ниже, но конвективная теплоотдача выше. Удельная поверхность насадок Сименса и Каупера находится на уровне $15\text{-}20 \text{ м}^2/\text{м}^3$ в зависимости от размера каналов для прохода газов (ячеек).



а) насадка Каупера



б) насадка Сименса

Рис. 29. Регенеративные насадки из кирпича

Специальный вид насадки из фасонных огнеупорных блоков для доменных воздухонагревателей имеет удельную поверхность $35\text{-}40 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

За последние 20 лет получили распространение малогабаритные регенераторы с шариковой насадкой. Корундовые шарики с содержанием $\text{Al}_2\text{O}_3 = 98\%$ имеют высокую огнеупорность и термостойкость. Засыпка шариков диаметром 20 мм имеет удельную поверхность $\sim 200 \text{ м}^2/\text{м}^3$, т.е. на порядок выше, чем насадка из кирпичей.

Шариковые регенераторы применяют в плавильных и нагревательных печах. В нагревательных колодцах с отоплением из центра подины одного из металлургических комбинатов керамические трубчатые рекуператоры были заменены компактными шариковыми регенераторами, при этом температура подогрева воздуха возросла с 600°C до $1100\text{--}1150^\circ\text{C}$, а расход топлива снизился на 30%.

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

5 КОНСТРУКЦИИ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ

5.1 Классификация электрических печей

К плавильным электрическим печам относят все установки для плавления металлов с использованием электрической энергии.

В основу классификации электрических печей положен наиболее общий и во многих случаях определяющий все остальные особенности признак – способ превращения электрической энергии в тепловую. По этому признаку все электрические печи можно разделить на группы: печи сопротивления, дуговые печи, индукционные печи, установки электронно-лучевого нагрева, оптические печи.

5.1.1 Печи сопротивления

Принцип работы этих печей основан на том, что при прохождении тока по проводнику в нем выделяется тепло. В соответствии с законом Джоуля-Ленца количество выделяющегося в проводнике тепла пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока, т.е. $Q = 1,005 \cdot I^2 \cdot R \cdot t$, Дж. Подбирая определенные значения силы тока и сопротивления можно получить мощность, достаточную для расплавления металлов.

Элементом сопротивления может служить специальный проводник или непосредственно нагреваемое тело. Установки, в которых элементом сопротивления является само нагреваемое тело, называют печами сопротивления прямого нагрева. Но сопротивление металла обычно невелико и его недостаточно для выделения в нем необходимой мощности. Поэтому для плавления металла используют печи сопротивления косвенного нагрева, в которых тепло выделяется в специальном проводнике (нагревателе) и уже от него передается металлу.

На рисунке 30 приведена схема печи сопротивления Грамолина-Штейнберга. Элементом сопротивления в ней является графитовый нагреватель. При прохождении по нему электрического тока нагреватель нагревается до температуры 2300 – 2500°C. За счёт излучаемого в пространстве печи тепла расплавляются загружаемые на подину печи материалы. На рисунке 31 приведена схема печи сопротивления Тамма-на. Элементом сопротивления в ней является полый графитовый или угольный нагреватель, который сильно разогревается при прохождении по нему электрического тока. Тепло от нагревателя излучается и концентрируется внутри него. В наиболее горячую зону

помещается тигель с расплавляемыми материалами. Достигаемая температура в печи Таммана составляет 2000 – 2400°C.

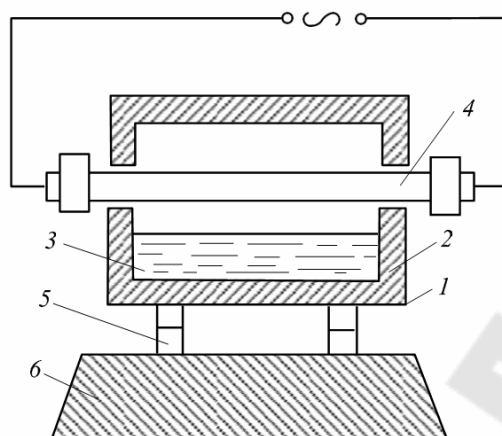


Рис. 30. Схема печи сопротивления Грамолина-Штейнберга:
1 – кожух; 2 – футеровка; 3 – металл; 4 – угольный или графитовый нагреватель; 5 – механизм наклона; 6 – фундамент

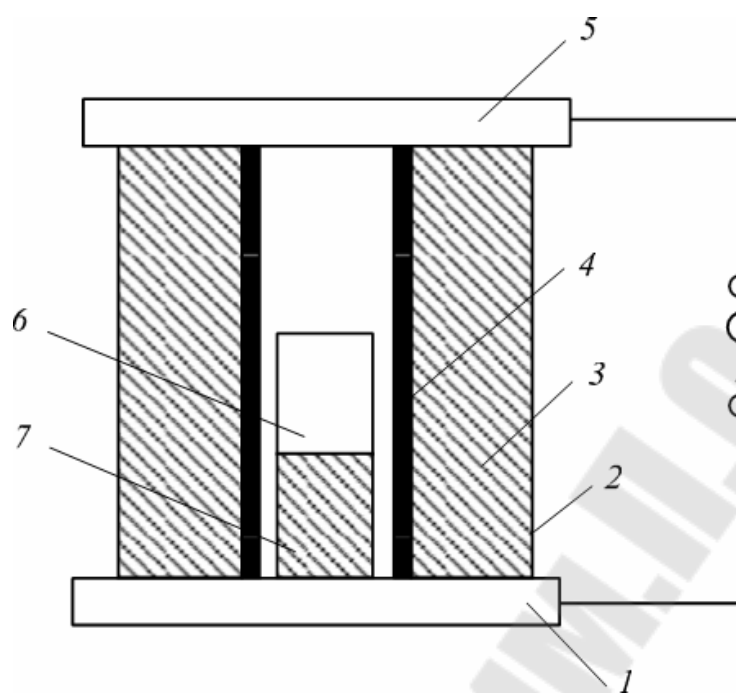


Рис. 31. Схема печи сопротивления Таммана: 1 – нижняя водоохлаждаемая крышка; 2 – кожух; 3 – футеровка; 4 – угольный нагреватель (цилиндрический полый); 5 – верхняя водоохлаждаемая крышка; 6 – тигель; 7 – подставка

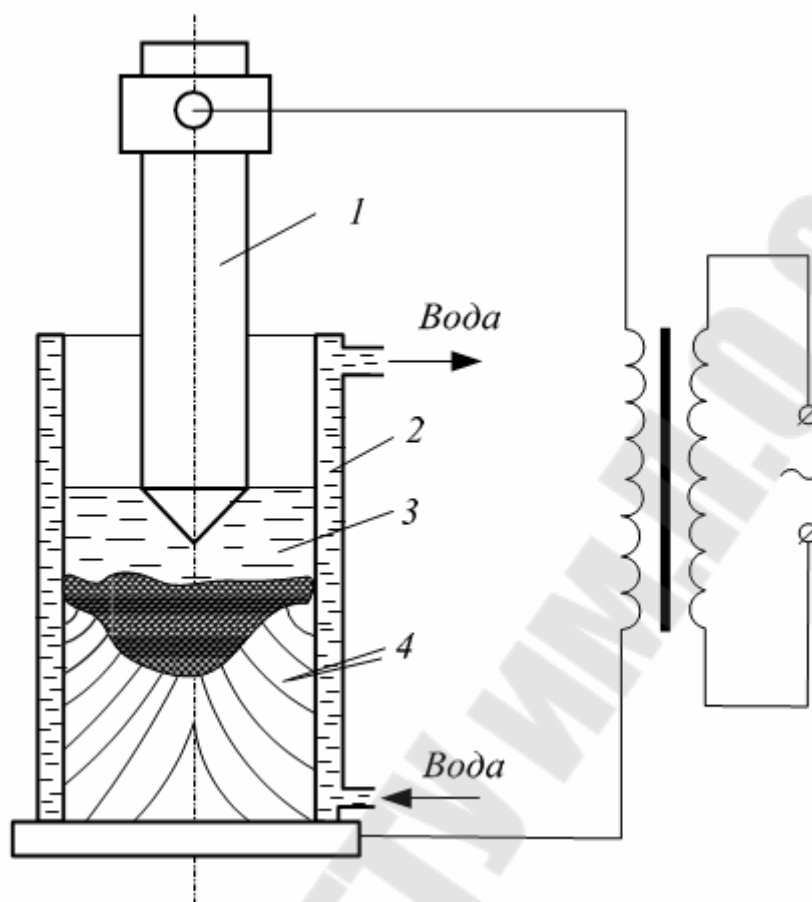


Рис. 32. Схема установки электрошлакового переплава: 1 – расходный электрод; 2 – водоохлаждаемый кристаллизатор; 3 – расплавленный шлак; 4 – наплавляемый слиток

5.1.2 Дуговые печи

В дуговых электрических печах превращение электрической энергии в тепло происходит, в основном, в электрическом разряде, протекающем в газовой или паровой среде. В таком разряде можно сосредоточить в сравнительно небольших объемах очень большие мощности и получить очень высокие температуры. Высокая концентрация тепла в дуге позволяет с большой скоростью плавить и нагревать металл до высокой температуры. Температура электрической дуги 5000 - 7000°C.

Все дуговые печи можно разделить на печи с открытой независимой дугой (печи косвенного нагрева), печи с открытой зависимой дугой (печи прямого нагрева), печи с закрытой зависимой дугой (печи смешанного нагрева) и плазменные печи.

Печи с открытой независимой дугой. Нагрев металла в этих печах осуществляется за счёт излучения от электрической дуги, горящей между двумя горизонтально расположенными электродами (рисунок 33). В печах косвенного нагрева область высокой температуры удалена от поверхности металла на некоторое расстояние и на поверхность металла попадает лишь часть тепла, излучаемого дугой. Значительная его часть достигает поверхности металла после отражения от стен и свода печи, поэтому футеровка испытывает большие тепловые нагрузки. Низкая стойкость футеровки ограничивает возможность проведения в таких печах процессов, требующих нагрева металла до температуры выше 1300 - 1400°С, и не позволяет применять их для плавления сравнительно тугоплавких черных металлов. В черной металлургии такие печи иногда используют в небольших литейных цехах для расплавления чугуна. Эти печи получили широкое распространение в цветной металлургии, где не требуется высоких температур и важно обеспечить низкий угар дорогостоящих цветных металлов.

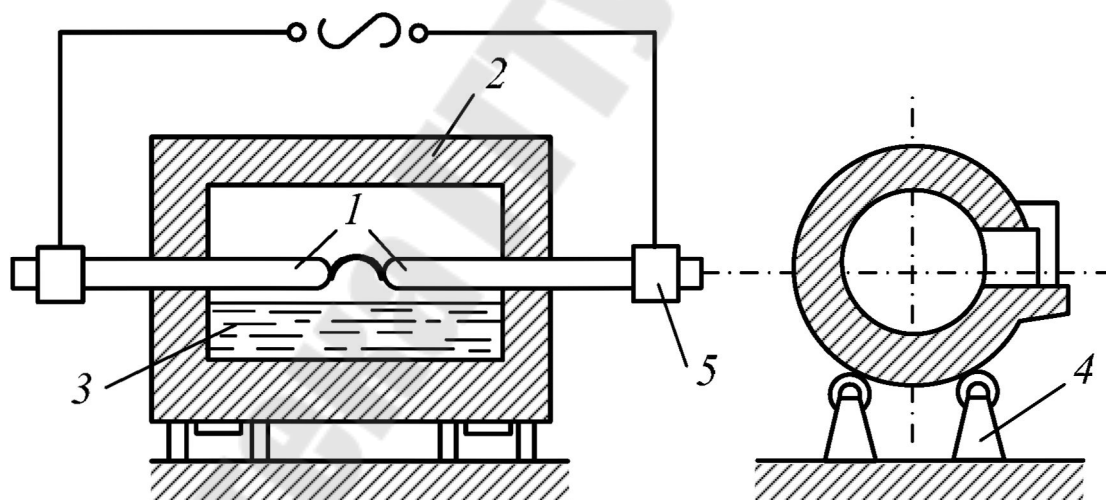


Рис. 33. Схема дуговой печи косвенного нагрева (с открытой независимой дугой): 1 - электроды; 2 - футеровка печи; 3 - жидкий металл; 4 - механизм наклона; 5 - электрододержатели

Печи с открытой зависимой дугой. В печах этого типа электрическая дуга горит между электродом и металлом (рисунок 34).

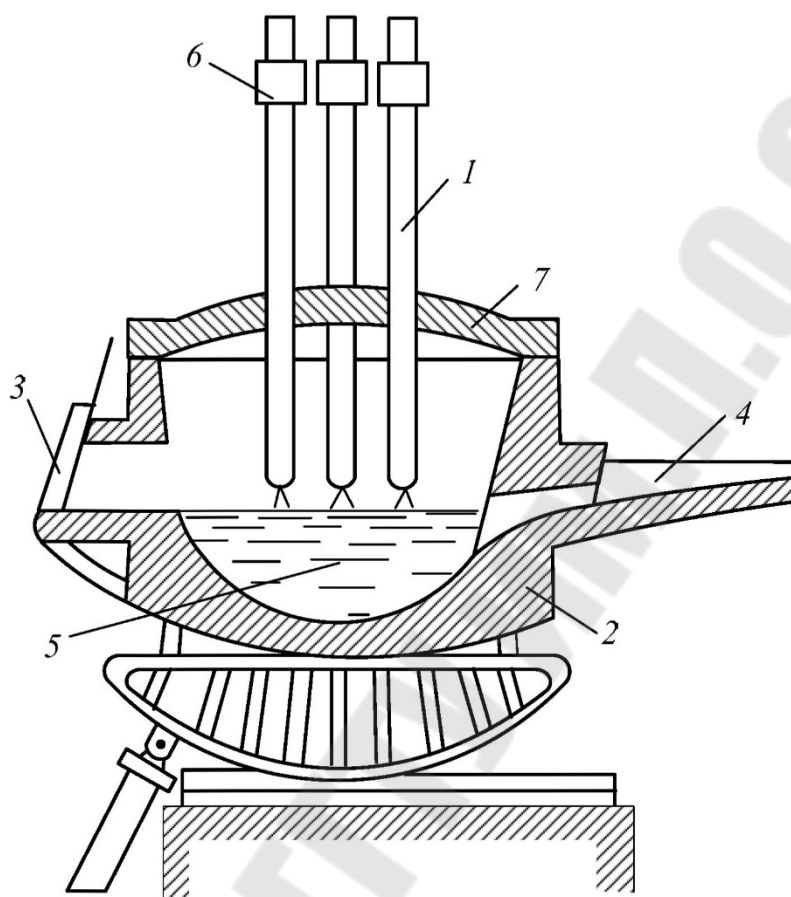


Рис. 34. Схема дуговой печи с открытой зависимой дугой (смешанный нагрев): 1 - электроды; 2 - футеровка; 3 - заслонка загрузочного окна; 4 - выпускной желоб; 5 - жидкая ванна; 6 - электрододержатели; 7 - футеровка свода

В печах прямого нагрева значительно лучше условия передачи тепла от дуги металлу. В этом случае область высоких температур максимально приближена к поверхности металла. Часть тепла из зоны высоких температур поглощается металлом непосредственно и отводится теплопроводностью. Значительно большая часть лучистой энергии сразу попадает на поверхность металла, а свод печи защищён от воздействия дуг благодаря экранирующему действию электродов. Электроды в таких печах расположены вертикально, следовательно, они работают, в основном, на растяжение и лишь при наклоне печи на изгиб. Поэтому можно применять сравнительно длинные графитовые электроды большого сечения, допускающие значительные рабочие

токи. Таким образом, эти печи могут быть большой вместимости и производительности. В зоне действия электрических дуг интенсивно испаряется металл. Но при производстве стали сравнительно высокие температуры испарения и относительно невысокая стоимость черных металлов делают этот недостаток печей прямого действия не столь существенным, если учесть их достоинства - большую скорость нагрева и возможность проведения высокотемпературных процессов. Такие печи нашли широкое применение в сталеплавильной промышленности (ДСП).

Печи с закрытой зависимой дугой. Электрическая дуга горит в газовой полости внутри расплавляемой шихты (рисунок 35). Так как сопротивление шихты значительно, выделяемое в ней джоулево тепло может быть большим.

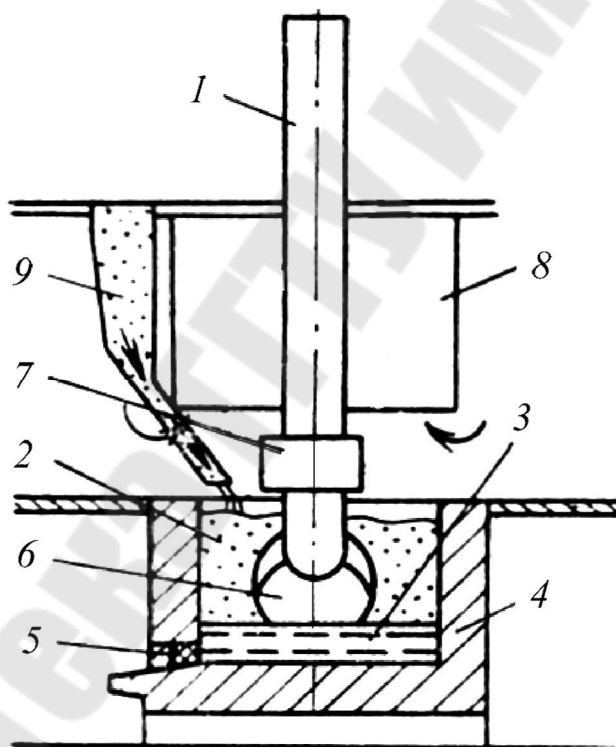


Рис. 35. Схема дуговой печи с закрытой зависимой дугой (смешанный нагрев): 1 - электрод; 2 - шихта; 3 - расплав; 4 - футеровка печи; 5 - летка; 6 - реакционный тигель, в котором горит дуга; 7 - электрододержатель; 8 - вытяжной зонтик; 9 - печной карман

В таких печах область высокой температуры (дуга или околоэлектродная зона высоких плотностей тока) находится внутри шихты, и печи пригодны для расплавления материалов с высокой температурой испарения или для возгонки материалов. Футеровка печи защищена от излучения дуг слоем не-прореагировавшей шихты (гарнисаж), внутри которой и горит дуга. В таких печах можно проводить процессы с высокой рабочей температурой, характерной для восстановительных рудотермических процессов. Печи этого типа не наклоняются (выпуск через летку), поэтому электроды в них вертикальные, выполнены из менее прочного материала и сравнительно больших размеров, что позволяет работать при очень большом токе и небольшой мощности. Рассмотренные печи составляют большую группу рудовосстановительных печей, предназначенных для производства ферросплавов, карбида кальция, фосфора.

5.1.3 Плазменные печи

Источником тепла в этих печах является сильно сжатый в поперечном направлении дуговой разряд. Плотность тока в сжатой дуге во много раз выше, чем в обычной, следовательно, выше и её температура. В среде инертных газов температура сжатой дуги может достигать 30000 °С. Такая концентрация тепла в плазменных печах позволяет проводить процессы с очень большой скоростью, благодаря чему плазменный нагрев обеспечивает большую производительность. Для плавления металлов используют два типа плазменных печей: с керамическим тиглем и водоохлаждаемым кристаллизатором. Плазменные дуговые печи с керамическим тиглем (ПДП) можно рассматривать как дальнейшее развитие печей с электродуговым нагревом. Большинство действующих ПДП с керамическим тиглем созданы на базе дуговых сталеплавильных печей аналогичной вместимости. Отличительной особенностью плазменных дуговых печей с керамическим тиглем является наличие в них одного или нескольких плазмотронов, питаемых постоянным током (рисунок 36). Конструктивное исполнение футеровки в ПДП с керамическим тиглем остаётся в настоящее время таким же, как и у дуговых сталеплавильных печей. При питании постоянным током плазмотронов, являющихся катодом, в подине печи должен располагаться подовый электрод-анод, требующий охлаждения. Плазменные дуговые печи с керамическим тиглем отличаются более высокой производительностью и позволяют получать металл более высокого качества.

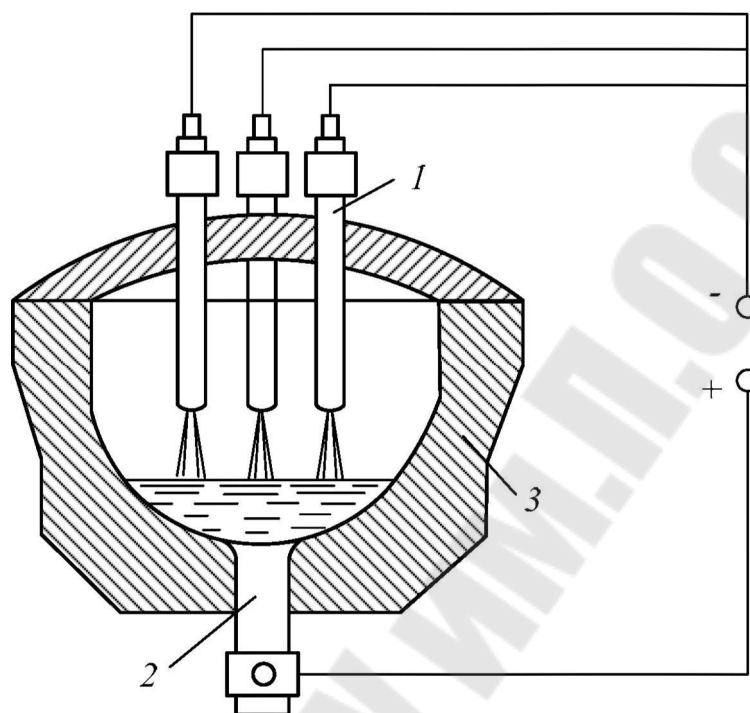


Рис. 36. Схема плазменной дуговой печи с керамическим тиглем: 1 - плазмотрон; 2 - подовый электрод; 3 - керамический тигель

Печи с водоохлаждаемым кристаллизатором используют для рафинировочного переплава, в результате которого свойства металла улучшаются благодаря дополнительной обработке активным газом и принудительной направленной кристаллизации в водоохлаждаемом кристаллизаторе (рисунок 37).

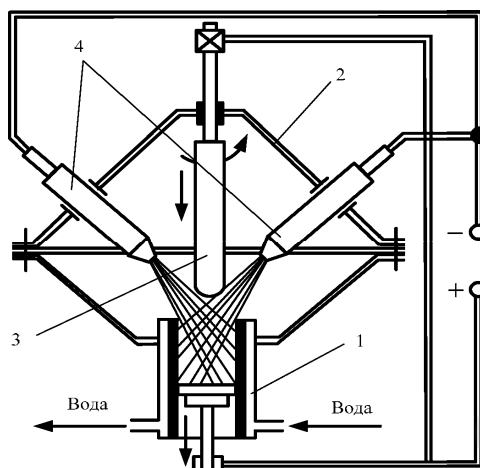


Рис. 37. Схема плазменной дуговой печи с водоохлаждаемым кристаллизатором: 1 - кристаллизатор с вытягиванием слитка; 2 - камера печи, 3 - переплавляемый электрод; 4 - плавильные плазмотроны

При индукционном нагреве тепло выделяется непосредственно в нагреваемом металле, поэтому использование тепла оказывается наиболее полным. Индукционные печи являются наиболее совершенным типом электрических печей.

Индукционные печи бывают двух типов: с сердечником - канальные и без сердечника - тигельные (рисунок 38).

В печах с сердечником металл находится в кольцевом жёлобе вокруг индуктора, внутри которого проходит сердечник. Вследствие ряда электродинамических эффектов, возникающих в кольце металла вокруг индуктора, удельная мощность канальных печей ограничивается определенными пределами. Поэтому эти печи используют преимущественно для плавления легкоплавких цветных металлов и лишь в отдельных случаях применяют их для расплавления и нагрева чугуна в литейных цехах.

В печах без сердечника (тигельных) внутри индуктора располагается тигель с металлом. Удельная мощность тигельных печей может быть достаточно высокая, а силы, возникающие в результате взаимодействия магнитных полей индуктора и металла, способствуют перемешиванию металла. Тигельные индукционные печи применяют для выплавки специальных, особенно низкоуглеродистых сталей и сплавов на основе никеля, хрома, железа, кобальта.

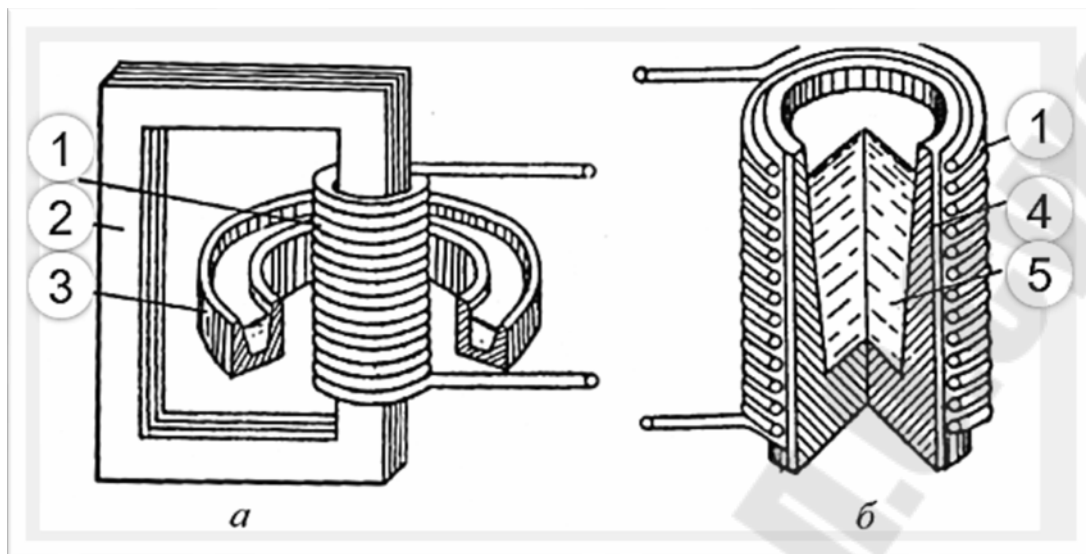


Рис. 38. Схемы индукционных печей:

а - печь с сердечником; б - тигельная печь; 1 - индуктор; 2 - сердечник; 3 - кольцевой желоб с металлом; 4 - тигель; 5 - металл

Важным достоинством тигельных индукционных печей являются простота конструкции и малые габариты. Благодаря этому тигельная индукционная печь может быть полностью помещена в вакуумную камеру и в ней возможна обработка металла в вакууме по ходу плавки. В настоящее время для производства качественных сталей все большее распространение получают вакуумные индукционные печи.

5.1.4 Электронно-лучевые установки

Нагрев металла в установках этого типа осуществляется потоком электронов. Мощный пучок электронов, ускоренных в электрическом поле (электронный луч) бомбардирует нагреваемый материал и разогревает его или расплавляет. Источником электронного пучка может служить кольцевой катод (рисунок 39, а), радиальные или аксиальные пушки (рисунок 39, б).

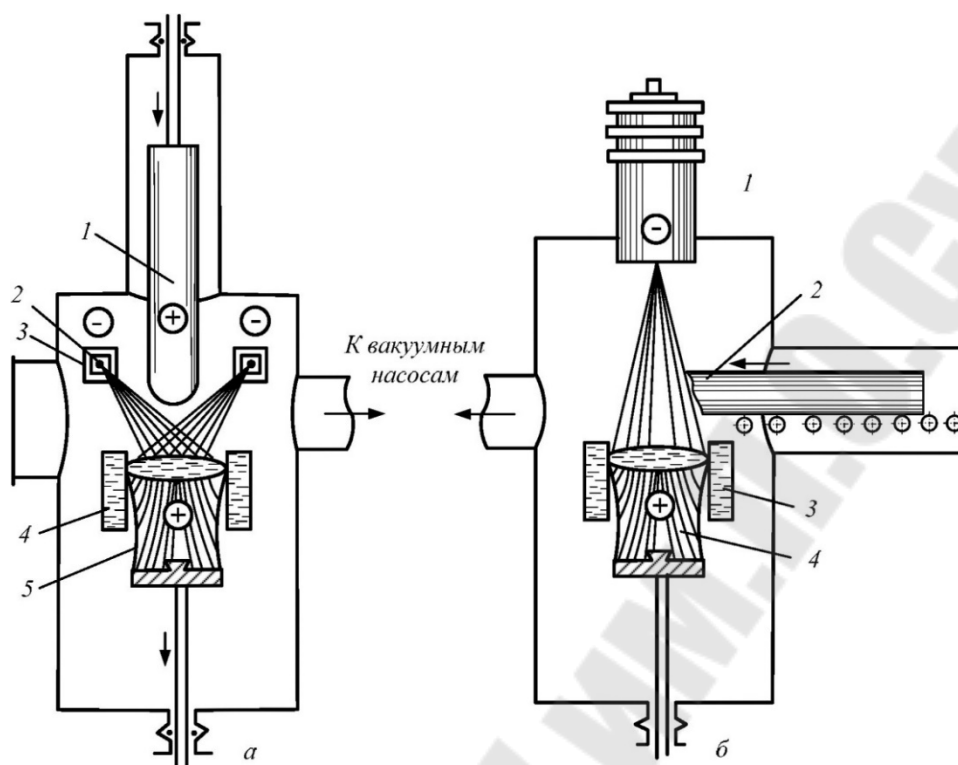


Рис. 39. Схемы электронных плавильных установок.

а - с кольцевым катодом: 1 - расходуемый электрод; 2 - кольцевой катод; 3 - экран; 4 - водоохлаждаемый кристаллизатор; 5 - выплавляемый слиток;

б - с аксиальной пушкой: 1 - аксиальная пушка; 2 - переплавляемый металл; 3 - водоохлаждаемый кристаллизатор; 4 - наплавляемый слиток

При бомбардировке электронами поверхность кинетической энергии передают частицам металла, поэтому металл повышает свою температуру. Такой плотный, не рассеивающийся в пространстве, поток электронов можно получить в глубоком вакууме (давление менее 10^4 Па), следовательно, электронные плавильные установки являются вакуумными. В электронно-лучевых установках исходным сырьём является электрод, уже полученный в результате плавления металла в другой печи и переплавляемый вторично в целях более полной очистки металла, получения высококачественных отливок.

5.1.5 Оптические печи

Оптической печью называется установка, состоящая из источника лучистой энергии с системой отражателей, фиксирующих лучистый поток в малую по объёму рабочую зону, в которой под действи-

ем потока большой плотности создаются условия высокотемпературного нагрева (рисунок 40).

Все оптические печи (установки) в зависимости от используемого источника лучистой энергии можно разделить на два вида: солнечные печи и печи с искусственным источником излучения.

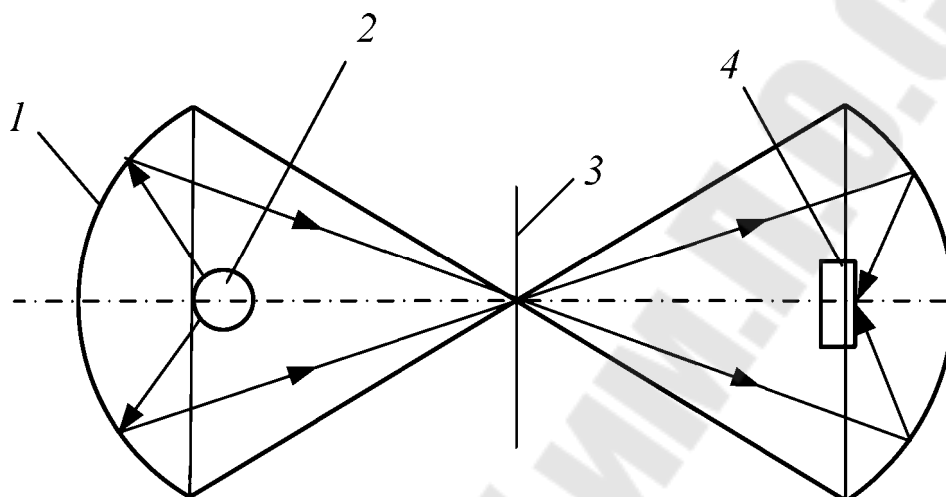


Рис. 40. Принципиальная схема оптической печи: 1 - отражатель; 2 - источник излучения; 3 - регулятор лучистого потока; 4 - камера с образцом

Печи с искусственными источниками излучения. Для осуществления управляемого (регулируемого) оптического нагрева применяют высокотемпературные искусственные источники лучистой энергии определенного спектрального состава:

- лампы накаливания с вольфрамовым нагревательным элементом (рабочая температура накала 3400 К, поток излучения плотностью до 30 – 50 Вт/см);
- графитовые нагревательные элементы (рабочая температура накала 2800 К, поток излучения плотностью до 70 Вт/см);
- дуга высокой интенсивности, горящая между угольными электродами (поток излучения плотностью до 0,5 – 2,0 кВт/см);
- газоразрядные ксеноновые лампы, в которых электрическая дуга горит в атмосфере ксенона (температура дуги у катода 12000 К, поток излучения плотностью до 1,8 Вт/см);
- плазменные излучатели в виде дугового плазмотрона кос – вен-

ного действия (поток излучения в несколько десятков кВт/см).

Печи с ксеноновым излучателем отличаются значительно меньшими габаритами, что определяется малыми размерами источника излучения, большим процентом использования лучистого потока. Большой срок лампы увеличивает срок службы печи.

Работу печей с искусственным источником излучения можно рассмотреть на примере оптической печи с газоразрядными источниками излучения (рисунок 41). Применение ксеноновых ламп в качестве источника излучения в оптических печах позволило устранить ряд недостатков, присущих установкам с дуговыми лампами высокой интенсивности. В оптической печи создаётся температура нагрева порядка 1500–2000 В большинстве оптических печей используют стеклянные зеркала с наружным и реже с тыльным серебряным или алюминиевым покрытием, имеющие отражательную способность порядка 0,90 - 0,95. Металлические зеркала с наружным хромированием или серебрением имеют меньшую оптическую точность, хотя более удобны в эксплуатации.

5.2 Электрическая дуга как источник тепловой энергии

Преобразование электрической энергии в тепловую в дуговых печах происходит в разрядном промежутке между торцом электрода и поверхностью металла. Электрическая цепь на этом участке замыкается дуговым разрядом. Электрическая дуга, или дуговой разряд – один из видов электрического разряда, при котором ток проходит через ионизированные газы, пары металлов или оксидов.

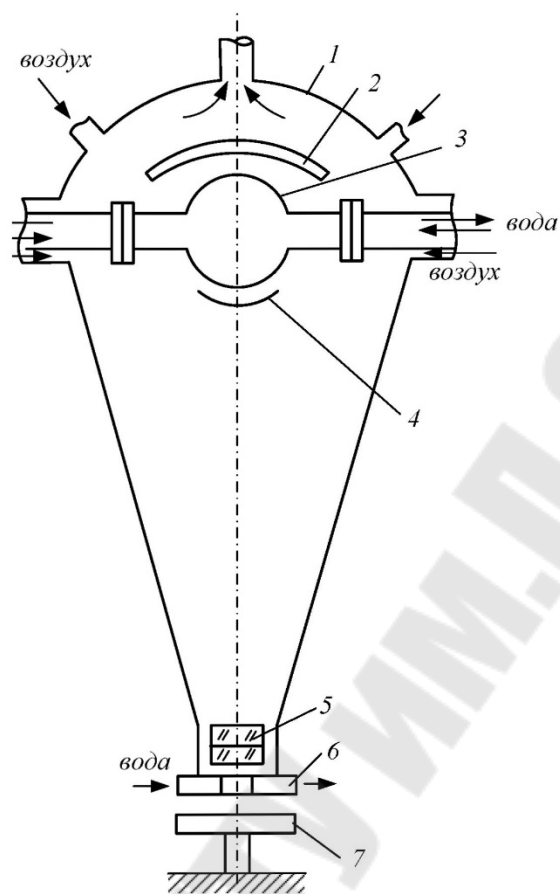


Рис. 41. Схема оптической печи с газоразрядной ксеноновой лампой 1 - каркас; 2 - отражатель; 3 - лампа типа ДКС-Р-10000; 4 - контротражатель; 5 - кварцевая конденсорная оптика; 6 - водоохлаждаемая диафрагма; 7 - предметный столик.

Газовая среда, обычно не проводящая ток, приобретает проводимость, если в ней, помимо нейтральных, появляются свободные заряженные частицы – электроны и ионы, которые и обуславливают прохождение в газе тока, если в нем существует электрическое поле.

По характеру и внешним признакам разряды в газах весьма разнообразны. Обычно их делят на самостоятельные и несамостоятельные. Для поддержания несамостоятельного разряда необходимо действие внешних факторов – ионизаторов, например, рентгеновского излучения.

У самостоятельных разрядов образование заряженных частиц в газовом промежутке происходит за счёт энергии источника тока. Дуговой разряд относится к числу самостоятельных разрядов и характе-

ризуется высокой плотностью тока ($10^2 - 10^3$ А/мм²) и возможен только при определенных давлениях.

Перенос тока в дуге, в основном, осуществляется движущимися электронами. Положительно заряженные электроны в переносе электричества участвуют незначительно. При прохождении электронов находящийся в дуговом промежутке газ ионизируется. Основным условием возникновения и поддержания дугового электрического разряда является термоэлектронная эмиссия электронов из катода, которая резко возрастает с увеличением температуры. Электроны, выбрасываемые с поверхности катода и ускоряемые воздействием приложенного к дуговому промежутку напряжения, устремляются к аноду, отдают ему свою кинетическую энергию, вызывают его разогрев и его разрушение.

С увеличением температуры катода ток эмиссии быстро возрастает. Например, для вольфрамового катода в вакууме плотность тока термоэлектронной эмиссии при 1500 К составляет 10^{-7} А/см², а при 3500 К она возрастает более чем в 10^9 раз и составляет примерно 225 А/см². При температурах до 1000 К эмиссия не зависит от температуры. При более высоких температурах начинает проявляться термоэмиссия. В условиях большой напряжённости поля и высокой температуры у катода наблюдается как термоэлектронная, так и холодная эмиссия. Сила тока в дугах современных электропечей измеряется десятками тысяч ампер. Для переноса такого количества зарядов требуется огромное количество заряженных частиц, которое не может быть обеспечено ни термоэлектронной, ни электростатической эмиссией. Основная масса заряженных частиц, обеспечивающих протекание тока в дуге, образуется в результате ионизации газовой среды. При ионизации газов могут образовываться отрицательные и положительные ионы и свободные электроны.

Работа ионизации у элементарных газов тем меньше, чем меньше номер их группы в Периодической системе Д.И. Менделеева. Поэтому легко ионизируются пары щелочных металлов; для ионизации инертных газов требуется большая энергия.

Значительно меньшей затраты энергии требует перемещение электронов на более высокие энергетические уровни. Поэтому при столкновении частиц более вероятно не удаление электронов, а переход их на другие орбиты, т.е. возбуждение нейтральных частиц. Если возбуждение будет достаточно устойчивым, а столкновения достаточно частыми, то следующее соударение возбуждённой частицы с

электроном может привести её в ионизированное состояние при меньшей затрате энергии. В дуговом разряде такая ступенчатая ионизация имеет очень большое значение. Образовавшиеся в результате ионизации вторичные электроны и ионы могут в свою очередь ионизировать нейтральные частицы, если к моменту соударения с ними приобретут достаточный запас кинетической энергии. Однако все же основную работу по ионизации выполняют эмитированные электроны непосредственно и через образованные ими вторичные свободные электроны.

Параллельно с ионизацией в газовом промежутке идёт деионизация в результате нейтрализации противоположных зарядов частиц при их столкновении. Нейтрализация может происходить либо между электронами и положительными ионами, либо между ионами с разноимёнными зарядами.

Выделяющаяся при рекомбинации столкнувшихся ионов энергия может вызвать изменение кинетической энергии частиц, т.е. пойти на увеличение температуры газа. Деионизация быстро развивается при понижении температуры.

Деионизация может происходить также в результате диффузии заряженных частиц из объёма дугового разряда. Диффузия за границы разрядного объёма вызывается тепловым движением или появлением неравномерностей распределения зарядов. Так как электроны обладают большей подвижностью, то они и чаще выходят за границы дуги. При этом они увлекают за собой положительные ионы, и из объёма дуги уходят одновременно заряды обоих знаков. Поэтому в установившихся условиях процессы ионизации и деионизации уравниваются, и при данной температуре количество свободных электронов, ионов и нейтральных частиц в разрядном промежутке является вполне определенным.

Современные дуговые электропечные установки работают с источниками как постоянного, так и переменного токов. Род тока во многом определяет особенности дуги, и условия горения дуги переменного тока несколько отличаются от условий горения дуги постоянного тока.

Для повышения стабильности горения дуги необходимо принимать меры по теплоизоляции зоны разряда, которые позволили бы поддерживать требуемую степень ионизации газа в разрядном промежутке и улучшать условия эмиссии электронов катодом.

Несколько уменьшить отвод тепла в шихте от зоны дуги и тем самым несколько улучшить условия её возбуждения можно рациональным подбором и укладкой шихты. Для этого под электродами шихту надо расположить так, чтобы в начале плавления дуга была направлена на мелкие куски шихты, которые быстрее нагреваются и оплавляются. В этом случае горение дуги стабилизируется сравнительно быстро. Если под электродом окажется массивный кусок шихты, на прогрев которого требуется много тепла, то дуга горит неустойчиво длительное время. Повысить устойчивость горения дуги можно в результате изменения условий ионизации газа в межэлектродном пространстве. Если под электрод поместить материал, содержащий легко ионизируемый элемент, то в разрядном промежутке появятся пары этого элемента, суммарная степень ионизации газа при прочих равных условиях увеличится, и дуга станет более устойчивой. Так присадка под электроды кальцийсодержащих материалов, например, извести или силикокальция, оказывает на дугу стабилизирующее действие.

5.3 Электрооборудование дуговых печей

Дуговые печи являются мощными потребителями электроэнергии. Питание электропечей осуществляется от районных или заводских подстанций. К цеховым понижающим подстанциям для уменьшения потерь в линиях электропередач подводят энергию высокого напряжения (35 – 220 кВ) и малой величины силы тока. Это напряжение от высоковольтного распределительного устройства по индивидуальной для каждой печи линии подаётся к печной подстанции, в которой размещается понижающий печной трансформатор и вспомогательное оборудование. Пониженный до 110 – 1000 В ток подаётся непосредственно к электропечи. Сила тока на этом участке электрической цепи достигает десятков тысяч ампер, вследствие чего на участке от печного трансформатора до электродов имеют место значительные потери мощности. Для уменьшения этих потерь печную подстанцию максимально приближают к печи, а участок цепи от трансформатора до электродов делают как можно более коротким (примерно 13 – 15 м), поэтому этот участок называют короткой сетью печи.

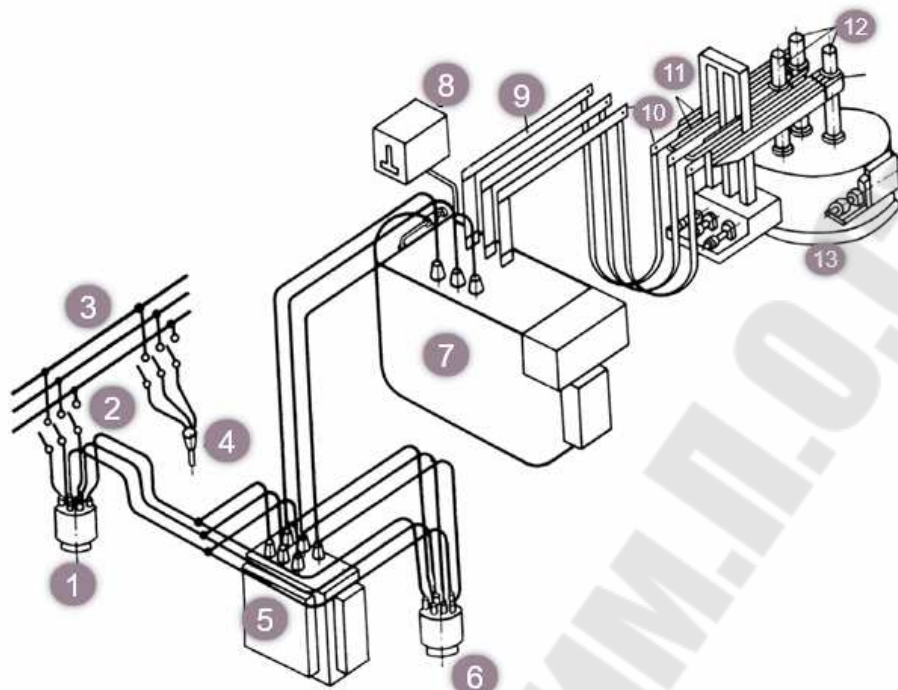


Рис. 42. Схема электропечной установки. 1 – высоковольтный выключатель; 2 – высоковольтный разъединитель; 3 – шины высокого напряжения; 4 – высоковольтный кабель; 5 – дроссель; 6 – выключатель, шунтирующий дроссель; 7 – печной трансформатор; 8 – бак-консерватор; 9 – 11 – элементы короткой сети; 12 – графитированные электроды; 13 – ДСП

Основное назначение дуговой сталеплавильной печи (ДСП) – производство стали из металлолома (скрапа). В отличие от мартеновских печей и конверторов, работающих на природном топливе, в ДСП происходит выделение энергии за счёт горения электрической дуги между электродом и переплавляемым металлом. Такой способ нагрева позволяет достигнуть более высокой концентрации энергии по сравнению с традиционным топливом.

Процесс производства электростали весьма энергоёмок. Расход электроэнергии составляет (500–1000) кВтч/т. Сейчас в мощных дуговых сталеплавильных печах получают и низколегированные стали, в этом случае ДСП лучше приспособляется к характеру скрапа.

Дуговые сталеплавильные печи изготавливают с номинальной ёмкостью от 0,5 до 200 тонн. Основные технические данные отечественных печей приведены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6

Технические данные отечественных дуговых электропечей для фасонного литья

Данные печи	Тип печи				
	ДСП – 0,5	ДСП – 1,5	ДСП – 3,0	ДСП-6	ДЧМ-10
Номинальная ёмкость, т	0,5	1,5	3,0	6,0	10,0
Диаметр кожуха, мм	1700	2400	2950	3020	3200
Мощность трансформатора, кВ·А	630	1250	2000	5000	2250
Вторичные напряжения, В	216 – 106	225 – 110	243 – 124	291 – 130	125 – 105
Максимальный ток, А	1680	3200	4800	8220	10 400
Диаметр графитированного электрода, мм	150	150	200	300	350
Диаметр распада электродов, мм	500	520	700	900	900
Диаметр ванны на уровне откосов, мм	1000	1500	1800	2270	2350
Глубина ванны от порога, мм	215	360	400	330	560
Масса металлоконструкций, т	5,2	11,3	28,8	45,0	23,6
Удельный расчетный расход электроэнергии на расплавление, кВтч/т	700	550	525	500	105

На рисунках 30-33 представлены общие виды нескольких типов печей ДСП.

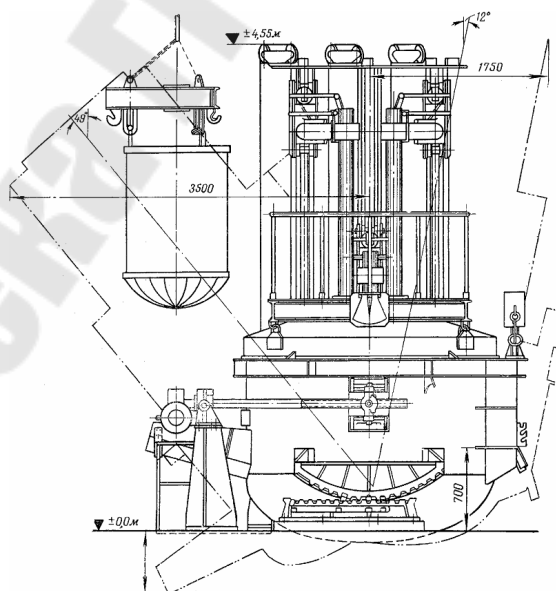


Рис. 43. Общий вид дуговой сталеплавильной печи ДСП – 1,5

Таблица 7

Технические данные дуговых электропечей для стали

Данные печи	Тип печи				
	ДСП-12	ДСП-25	ДСП-50	ДСП-10 0НЗА	ДСП-20 0И2
Номинальная ёмкость, т	12	25	50	100	200
Диаметр кожуха, мм	4260	4700	5800	6900	8500
Номинальная мощность трансформатора, кВ. А	9000	15 000	25 000	50 000	125 000
Первичное напряжение, кВ	6 или 10	6 или 10	35	38,5	110
Пределы вторичного напряжения, В	318–115	390–130	417–131	573–200	950–300
Максимальный ток печи, кА	16,5	23,5	34,6	63,6	87,0
Диаметр графитированного электрода, мм	350	400	500	610	610
Диаметр распада электродов, мм	1000	1250	1600	1600	1600 +
Ход электрода, мм	2250	2500	3500	3600	100
Максимальная скорость перемещения электрода, м/мин	5,0	3,5	3,5	4,5	5,0
Диаметр ванны на уровне откосов, мм	2740	3540	4560	5600	4500
Глубина ванны от порога, мм	555	775	890	1100	7330
Высота от порога до пят свода, мм	1365	1500	1950	2070	1480
Масса металлоконструкций, т	90	168	276	460	2720
Удельный расчетный расход электроэнергии на расплавление твердой заковки, кВт.ч/т	470	460	440	405	850

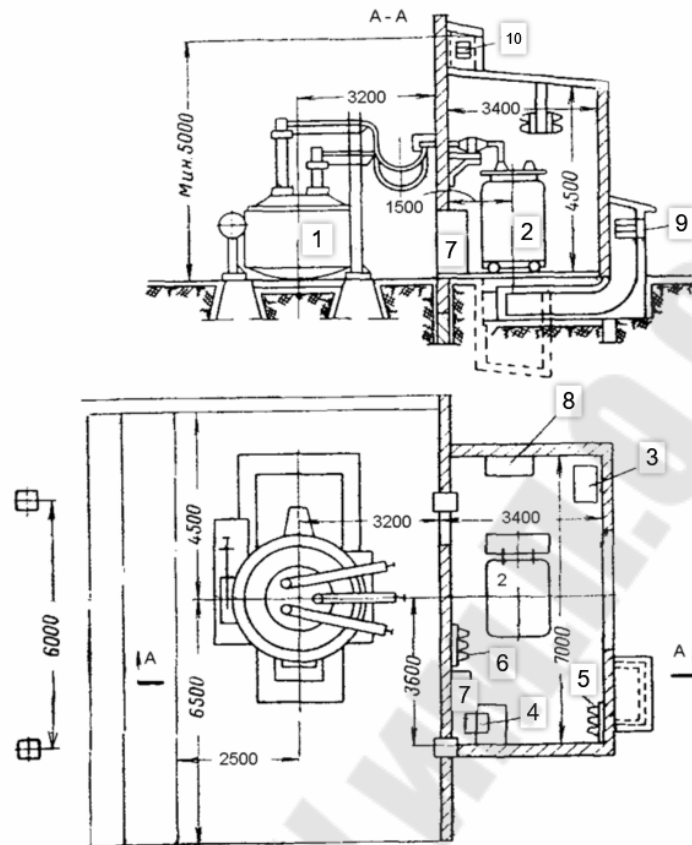
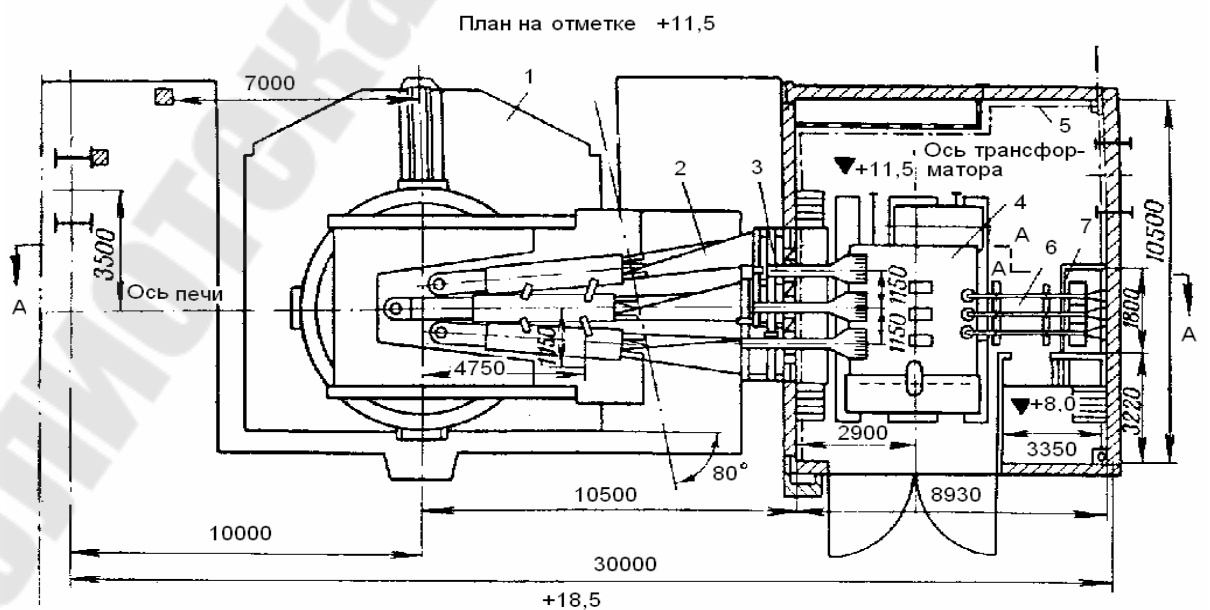


Рис. 44. Типовая установка дуговой сталеплавильной печи
ДСП – 1,5

1 – печь; 2 – трансформатор; 3 – мотор-генератор; 4 – масляный выключатель; 5 – ввод; 6 – разъединитель, шунтирующий дроссель; 7 – щит управления; 8 – щит автоматики; 9, 10 – вентиляция.



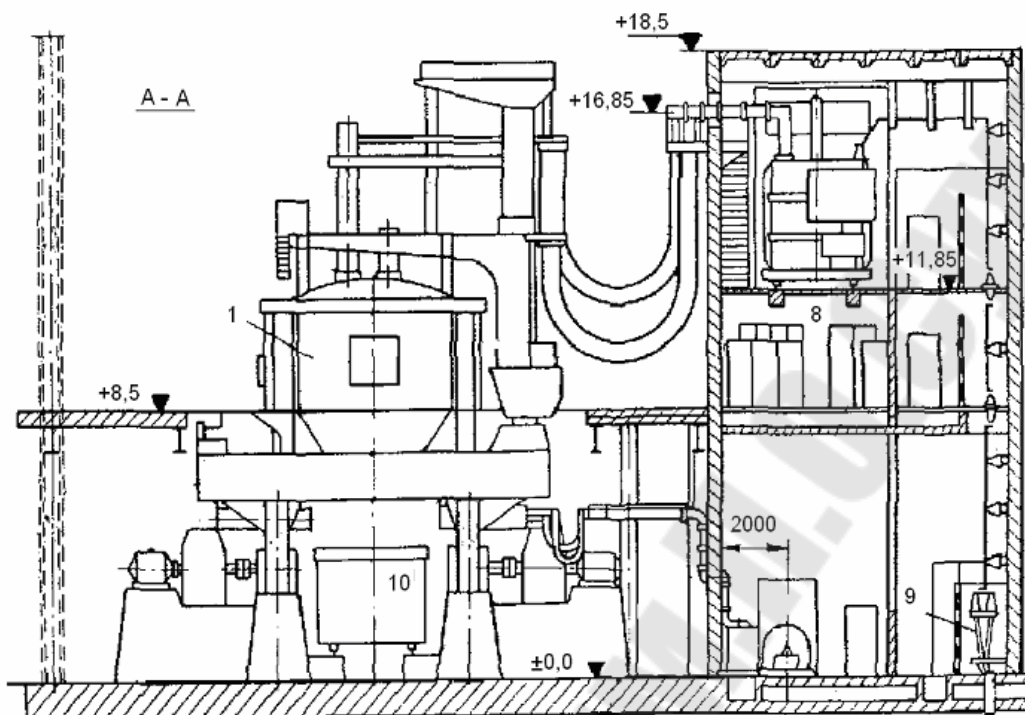


Рис. 45 План и разрез установки печи ДСП – 80

1 – печь; 2 – гибкие водоохлаждаемые кабели; 3 – шинопровод;
 4 – трансформатор; 5 – заземление; 6, 7 – шины;
 8 – пультовое помещение; 9 – ввод; 10 – шлаковня.

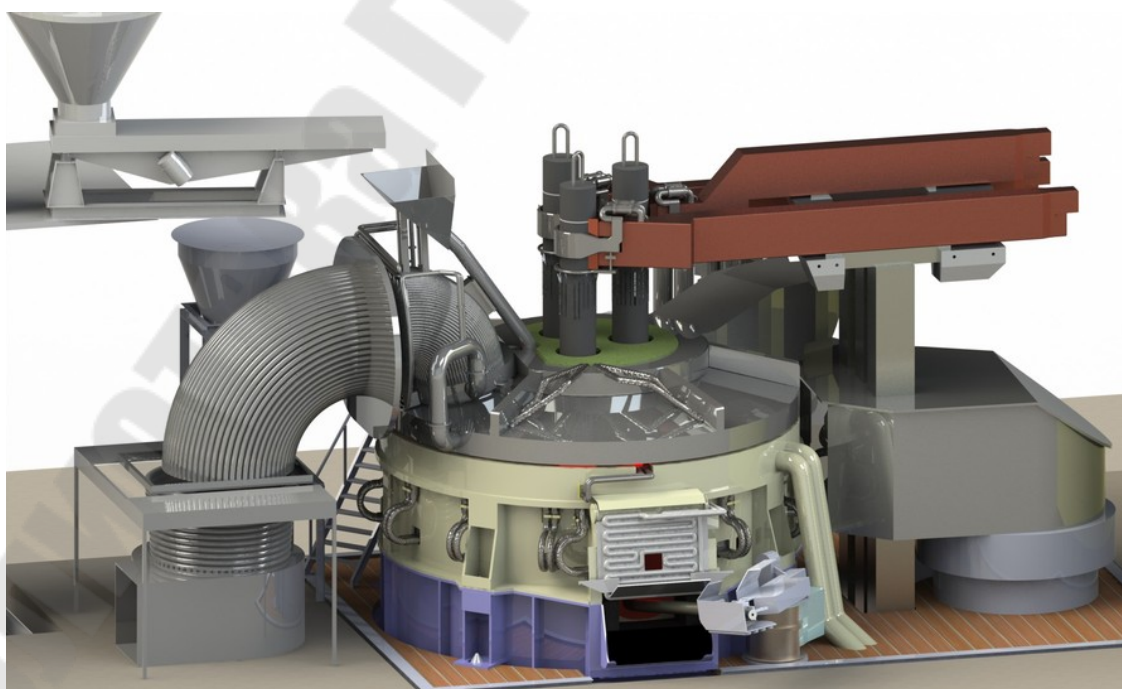


Рис. 46. Трёхмерная модель ДСП-50

Конструкции печей и технология выплавки стали в них со временем менялись. Условно в развитии электросталеплавильного производства можно выделить несколько этапов.

Первый этап — этап становления приходится на первые десятилетия XX в.; вначале небольшие (0,5; 1,5т) печи, поиски оптимальных конструктивных решений. Задача — строительство печей ёмкостью несколько тонн. Оптимальной оказалась конструкция, показанная на рис. 17.1.

Второй этап — 20–40-е годы это этап строительства большого числа печей на машиностроительных и металлургических заводах, создание и освоение методов ведения плавки, ставших традиционными. Садка печей постепенно увеличилась до 30–50т. Технические вузы начали подготовку и выпуск инженеров-металлургов специально для работы в электросталеплавильном производстве. Появился и получил распространение термин «электropечной сортамент стали», относящийся к маркам высококачественных и высоколегированных сталей, которые желательно выплавлять именно в электropечах. Основное производство быстрорежущих, инструментальных, нержавеющей, трансформаторных, жаропрочных, подшипниковых сталей базировалось на использовании дуговых сталеплавильных печей (подшипниковые стали выплавляли также в кислых мартеновских печах).

В 1925-1926 гг. производство электropечей отечественной конструкции начато на харьковском заводе «Электросила», а затем на московском предприятии «Электрoзавод». В 1935 г. производство электropечей было переведено из Москвы на уральский завод «Уралэлектромашина».

В тот же период сформировались основные принципы ведения плавки в ДСП, позволявшие в самой печи к концу операции получать сталь нужного состава и нужного качества. В печах сравнительно небольшого объёма можно было проводить так называемый «восстановительный период» — выдержку металла под раскисленным шлаком при наличии восстановительной (или нейтральной) атмосферы в рабочем пространстве печи.

Начало *третьего этапа* развития электросталеплавильного производства относится к 50-м годам. Этап характеризуется увеличением ёмкости печей, повышением мощности трансформаторов и применением кислорода для интенсификации работы печей. Изготовленные Новосибирским заводом электротермического оборудования 80-т ДСП вводятся в эксплуатацию на Новолипецком металлургическом

комбинате, 100-т печи — на Челябинском металлургическом комбинате; вступают в строй электросталеплавильные цехи на Кузнецком, Череповецком, Оскольском комбинатах. В 1971 г. на заводе «Красный Октябрь» в Волгограде начинает работать 200-т ДСП. Дуговые печи ёмкостью более 100т строятся во всех промышленно развитых странах; ёмкость печей достигает 300 т и больше.

Конструкции крупных ДСП. Принципиальная модель конструкции крупных печей на данном этапе мало отличается от конструкции 10—30-т печей. Совершенствуются методы загрузки шихты. Все крупные печи работают с загрузкой шихты сверху, разрабатываются различные схемы конструкций печей, обеспечивающие такую загрузку. В 60-е годы основные показатели работы 100-т ДСП (с применением кислорода) равны: производительность (электropечной сортамент) 150 тыс. т/год, продолжительность плавки 5,5ч (в том числе заправка и завалка 35 мин, расплавление 2 ч 20 мин, окисление и доводка 2 ч 35 мин); расход на 1 т стали: электроэнергии 525кВт·ч, кислорода 15м³, электродов 6 кг.

Крупные ДСП оборудуются мощными пылегазоотсасывающими устройствами, при работе которых имеет место подсос воздуха в рабочее пространство печи; атмосфера печи в таких условиях имеет окислительный характер. Создать восстановительную атмосферу в рабочем пространстве печи и получать низкое содержание оксидов железа в шлаке в этом случае трудно даже при интенсивной обработке раскислителями (большая глубина ванны, уменьшение величины удельной поверхности раздела шлак-металла, подсос воздуха и интенсивный газообмен в печи). Получение глубокораскисленного металла с низким содержанием серы также затруднено, всё это сопряжено с определенными трудностями производства высококачественных сталей электropечного сортамента.

5.4 Современные технологии интенсификации плавки в дуговых печах сталеплавильного производства

Направления развития металлургического производства на долгосрочную перспективу во многом определяются экологическими требованиями, в частности ограничением выбросов парниковых газов в атмосферу. В этой связи ожидается увеличение доли производства стали в дуговых печах (ДСП), которые в настоящее время обеспечивают около трети его мирового объема, уступая только конвертерному процессу. В странах Европейского союза (ЕС) и США в ответ на глобальные экологические вызовы доля электростали постоянно растет и приближается к 40 и 63 % соответственно.

Возможности электропечей относительно широкого выбора исходной шихты (скрап, металлизированное сырье, чугун) и варьирования окислительного потенциала в процессе плавки позволяют использовать их как в «большой» металлургии в технологических маршрутах производства сортового и листового проката, так и в «малой» для производства литья на машиностроительных заводах.

Для производства стали используют электродуговые печи переменного и постоянного тока.

Печи постоянного тока (ДСППТ) в сравнении с трехфазными ДСП характеризуются более устойчивым горением дуги, что способствует снижению угара железа из-за притока воздуха в рабочее пространство, уровня шума и фликер-эффекта. В «большой» металлургии преимущества ДСППТ нивелируются скоротечностью плавки полупродукта, в «малой», где сохранилась классическая технология, эти преимущества реализуются.

Результаты научно-производственных исследований позволили существенно интенсифицировать электроплавку стали за счет совершенствования и рационализации технологии рафинирования металла от кислорода, серы и других примесей (широкое применение осаждающего раскисления, сокращение восстановительного периода, переход на внепечное рафинирование металла).

Прогресс в развитии электротехники, машиностроения, производства электродов и огнеупоров скачкообразно интенсифицировал электроплавку стали благодаря широкому применению сверхмощных дуговых печей и разработанной для таких печей современной технологии электроплавки, начиная с последней четверти XX века.

Важнейшим направлением совершенствования ДСП с учетом

современных глобальных тенденций является повышение энергоэффективности, которое может быть достигнуто путем снижения и утилизации потерь теплоты, а также диверсификацией источников энергии, используемых в технологическом процессе.

Первоначально интенсификация электроплавки осуществлялась лишь за счет постепенного (в силу ограниченных возможностей техники) увеличения мощности печных трансформаторов для уменьшения времени расплавления шихты и за счет совершенствования конструкции дуговой печи, а также механизмов, обеспечивающих работу печи, с целью сокращения длительности «бестоковых» периодов плавки (переход на загрузку шихты бадьями и т. д.). Появление в середине XX века газообразного кислорода на металлургических предприятиях позволило интенсифицировать процесс окисления углерода и сократить длительность окислительного периода плавки. Предпринимались также попытки сократить время расплавления шихты, используя газообразный кислород для подрезки медленно плавящихся кусков шихты.

Удельная мощность печных установок продолжает расти, совершенствуются конструкции дуговых печей, электрические режимы плавки, улучшается качество применяемых огнеупоров и электродов, сокращается длительность плавки, но вопрос дальнейшей интенсификации электроплавки стали по-прежнему остается актуальным и не снимается с повестки дня. Причины этого:

1) в стремлении максимально увеличить производительность печи и производство стали при сравнительно небольших дополнительных капитальных затратах;

2) в необходимости уменьшить тепловые нагрузки облучением мощных электрических дуг на футеровку печи за счет использования «альтернативных» источников энергии;

3) в стремлении уменьшить расход электроэнергии на плавку за счет «альтернативной» энергии и сокращения тепловых потерь печи при уменьшении длительности плавки;

4) в потребности уменьшить расход дорогих высококачественных графитированных электродов вследствие снижения расхода электроэнергии.

В современном электросталеплавильном производстве широко используют различные способы интенсификации процесса плавки, обычно применяя их комплексно. Вот основные способы интенсификации плавки в современной дуговой печи:

1) использование топливокислородных горелок для подогрева лома в печи и ускорения его расплавления;

2) окисление углерода, дополнительно вводимого в печь, газообразным кислородом с целью увеличения прихода тепла, получаемого от экзотермических реакций окисления компонентов шихты;

3) окисление части железа шихты газообразным кислородом с целью увеличения прихода тепла от экзотермических реакций окисления компонентов шихты и ускорения формирования окислительного основного шлака;

4) использование специальных фурм для дожигания СО в рабочем пространстве печи до СО₂ с целью увеличения прихода тепла от окисления углерода;

5) применение газообразного кислорода для ускоренного окисления избыточного количества углерода металла в окислительный период плавки;

6) применение донной или глубинной продувки расплава кислородом или чаще инертным газом для ускорения плавления и нагрева, а также уменьшения угара металла за счет лучшего перемешивания расплава;

7) использование в шихте жидкого чугуна с целью ускорения расплавления лома за счет физического тепла чугуна и дополнительного прихода тепла от экзотермических реакций окисления примесей;

8) использование физического тепла отходящих печных газов для подогрева лома;

9) применение ряда чисто технологических мероприятий для ускорения расплавления шихты и нагрева металла: работа на «болоте», использование вспененного шлака и т. д.;

10) использование специально подготовленной шихты (измельченного лома).

Целесообразность применения конкретных способов интенсификации плавки в дуговой сталеплавильной печи должна определяться для конкретных условий конкретного предприятия с учетом конкретно получаемых экономических (дополнительные вложения капитала, цена шихтовых материалов, электроэнергии, газа и т. д.), эксплуатационных (стойкость футеровки, расход электродов, выход годного металла и т. д.), технологических (качество металла, удобства применения) и энергетических параметров применяемого процесса.

Следует учитывать тот факт, что в большинстве случаев различные способы интенсификации плавки увеличивают количество обра-

зующихся печных газов с возрастанием количества пыли, выносимой газами из печи. Это требует больших затрат на улавливание и очистку печных газов.

Способы подготовки металлического лома к плавке и специальные технологические мероприятия, помогающие ускорить расплавление шихты и нагрев жидкого металла, достаточно подробно описаны в соответствующих главах настоящей монографии. Остальные перечисленные выше способы интенсификации процесса электроплавки стали могут быть обобщенно представлены в следующем виде:

1) использование газообразного кислорода для окисления компонентов шихты или специально вводимого в рабочее пространство печи топлива (кокс, уголь, природный газ и т. д.) для получения дополнительной энергии с целью ускорения нагрева и плавления металла, а также сокращения окислительного периода плавки;

2) использование нагретой шихты (лом, подогреваемый отходящими печными газами, или жидкий чугун) для ускорения плавления шихты за счет вносимого в рабочее пространство физического тепла шихты;

3) интенсификация процессов, протекающих в рабочем пространстве печи, путем донной или глубинной продувки металлического расплава инертными газами или кислородом.

5.4.1 Способы подачи кислорода и углеродистых порошков в рабочее пространство печи

Промышленное применение газообразного кислорода для обезуглероживания расплавленного металла в дуговых сталеплавильных печах началось после того, как были разработаны дешевые способы массового производства кислорода и его транспортировки. С 1970-х годов кислород стали использовать для интенсификации не только окислительного периода, но и процесса плавления лома за счет тепла экзотермических реакций окисления компонентов шихты (С, Мn, Si, Fe). Зарубежные металлургические предприятия в период плавления уже тогда расходовали 5... 15 м³ кислорода на 1 т жидкой стали. В тот период заводы в СССР, не имевшие высокомоощных печей, использовали в период плавления значительно меньше кислорода, вдувая его в рабочее пространство печи футерованными стальными трубками или сводовыми водоохлаждаемыми фурмами лишь в конце плавления.

Освоение технологии окислительного плавления в СССР началось с появления первых высокомоощных дуговых печей ДСП-100НЗА в 1979–1981 годах. В дальнейшем такая технология получила

распространение в цехах, оборудованных сверхмощными 100-тонными печами (в т. ч. на Молдавском и Белорусском металлургических заводах). Кислород в такие печи обычно начинали подавать через сводовую фурму вскоре после включения печи, постепенно опуская фурму по мере проплавления лома. Использование кислорода в период плавления ускоряло формирование шлака и наряду с получением ряда технологических преимуществ сокращало длительность плавления на 15...20 мин при удельном расходе кислорода 8...15 м³/т. Расход электроэнергии при этом снижался в среднем на 3,0...3,5 кВт ч на каждый кубический метр использованного кислорода. Экономия электроэнергии при использовании кислорода в период плавления получалась главным образом за счет тепла экзотермических реакций окисления компонентов шихты, особенно углерода и железа. Вследствие этого применение кислорода при плавлении неизбежно увеличивает угар шихты, снижает выход жидкой стали и повышает расход углеродсодержащих материалов. Применение газообразного кислорода взамен твердых окислителей (железной руды, агломерата, окатышей) сокращает длительность окислительного периода. При расходе кислорода 4...7 м³/т на 5... 10% увеличивается производительность дуговой печи и на 5... 12% снижается расход электроэнергии на выплавку стали. Но в таком случае еще больше усиливается угар железа во время плавки и снижается выход годной стали.

Современная технология плавки электростали предусматривает широкое использование газообразного кислорода для интенсификации процесса. Удельный расход кислорода с учетом его применения в топливокислородных горелках во время плавки в современной дуговой печи составляет 30...40 м³/т и более, интенсивность подачи кислорода во время окислительного периода составляет 0,6... 1,5 м³/(т·мин). Применяется технический кислород с содержанием O₂ - 99,5 % при давлении 1,2... 1,6 МПа.

Для вспенивания шлака одновременно с кислородом в расплав вдувается порошок угля или кокса фракции 0,1...3,0 мм. Влажность такого порошка должна быть не более 0,7 %, содержание углерода в нем - не менее 90 %. Подача углеродистого порошка в расплав производится пневмонагнетателем. В качестве носителя порошка в нагнетателе используется осушенный воздух или азот при давлении 0,4...0,6 МПа. Расход газа-носителя составляет 200...300 м³/ч, интенсивность подачи углеродистого порошка - 20...80 кг/мин при удельном расходе порошка 5...6 кг на 1 т стали.

5.4.2 Оконные фурмы

В мировой практике для подачи кислорода и углеродсодержащего порошка в расплав (или рабочее пространство печи) часто применяют манипуляторы с расходуемыми трубками (иногда в литературе они называются расходуемыми фурмами) [5.5, 5.6]. Такие манипуляторы устанавливаются перед рабочим окном печи (над порогом). Они позволяют вводить расходуемые фурмы (обычно две для подачи кислорода и одну для подачи углеродсодержащего порошка) в рабочее пространство печи и менять угол их наклона к поверхности ванны с помощью поворотного устройства (положение фурм в различные периоды плавки показано на рисунке 47).

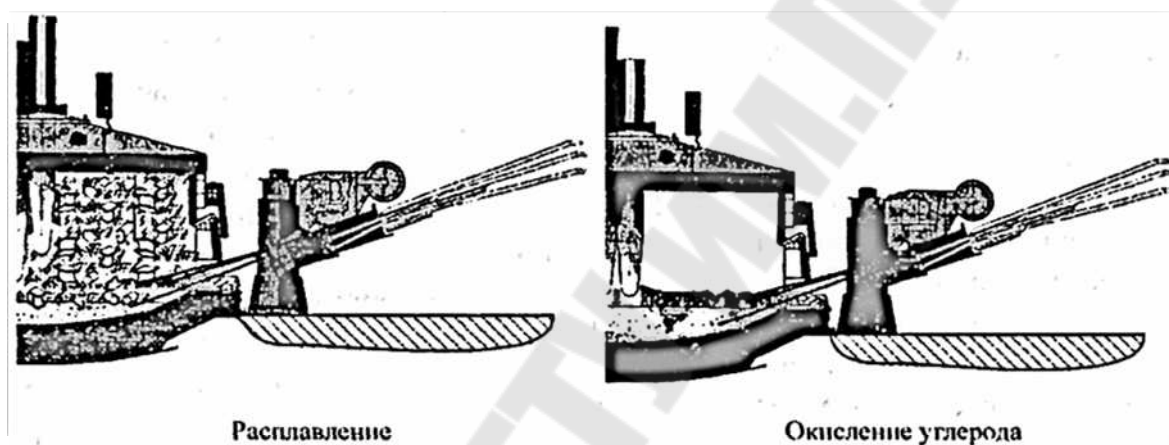


Рис. 47. Оконный манипулятор с расходуемыми фурмами.

Каждая фурма имеет собственный гидравлический привод, позволяющий перемещать ее в горизонтальном и вертикальном направлениях с различной скоростью. Управление перемещением фурм осуществляется со специального пульта либо с общего пульта управления печной установкой. Положение и углы наклона фурм различны в различные моменты плавки. Во время плавления шихты фурмы устанавливают под большим углом к горизонтالي для ускорения образования жидкой ванны, в окислительный период плавки - под меньшими углами для лучшего перемешивания расплава струями вдуваемого газа.

Манипуляторы начинают работать через 2...3 мин после включения печи, чтобы обеспечить раннюю подрезку шихты в районе рабочего окна и раннее формирование вспененного шлака, и используются в течение плавления и окислительного периода плавки.

Интенсивность подачи кислорода меняется по ходу плавки и зависит от состава применяемой шихты.

Недостатком манипуляторов с расходуемыми фурмами (трубками) являются значительные затраты на эти трубки. Кроме того, погруженные в расплав трубки, нагреваясь, изгибаются и меняют свое положение и угол наклона к поверхности ванны, что существенно снижает эффективность использования кислорода. Поэтому для вдувания кислорода и углеродсодержащего порошка в рабочее пространство печи часто используются оконные водоохлаждаемые фурмы, устанавливаемые на манипуляторе, имеющем гидравлический привод, управляемый с пульта управления. Водоохлаждаемая фурма, разработанная фирмой «Фукс Системтехник», показана на рисунке 48.

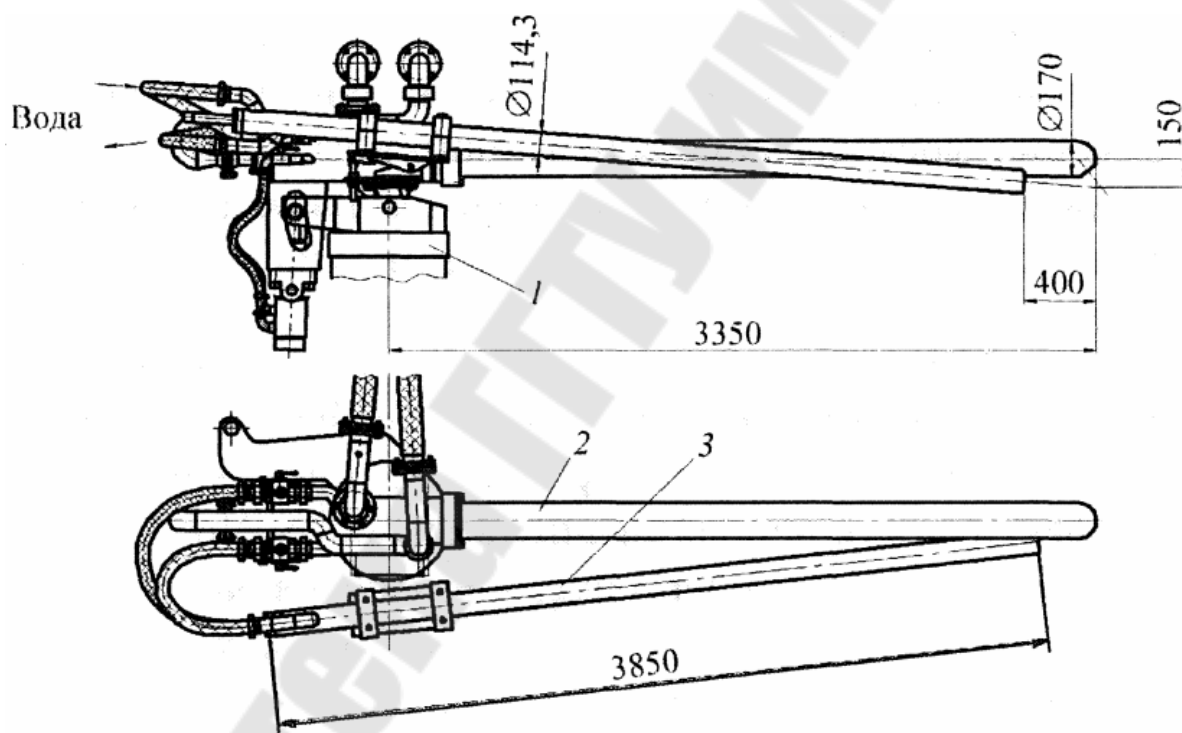


Рис. 48. Оконный манипулятор с водоохлаждаемыми фурмами: 1 - корпус манипулятора; 2 - кислородная фурма; 3 - фурма для подачи углеродсодержащего порошка

Кислородный тракт и тракт подачи углеродсодержащего порошка в этой фурме размещены в водоохлаждаемых корпусах. Кислородное сопло такой фурмы имеет форму сопла Лавалея, что обеспечи-

вает сверхзвуковые скорости истечения кислорода, усиливает перемешивание ванны, ускоряет окисление углерода в расплаве. Обычно водоохлаждаемые фурмы начинают работать после того как шихта в районе рабочего окна прогреется и частично расплавится. При более раннем применении фурмы возможны быстрое разрушение наконечника фурмы и выход его из строя. В то же время медный наконечник и хорошее охлаждение фурмы позволяют погружать ее в расплавленный шлак, что повышает эффективность использования вдуваемых кислорода и углеродсодержащего порошка.

Позднее стали применять оконные комбинированные горелки-фурмы, устанавливаемые на манипуляторе. Комбинированная горелка-фурма (мультифурма) представляет собой моноблок для вдувания кислорода и углеродсодержащего порошка, а также для факельного нагрева и подрезки шихты кислородом во время плавления. После включения печи такая фурма работает в режиме топливокислородной горелки со сканирующим факелом, затем в режиме подрезки шихты, вспенивания шлака и окисления углерода. Комбинированная горелка-фурма фирмы «Техносталь» показана на рисунке 49.

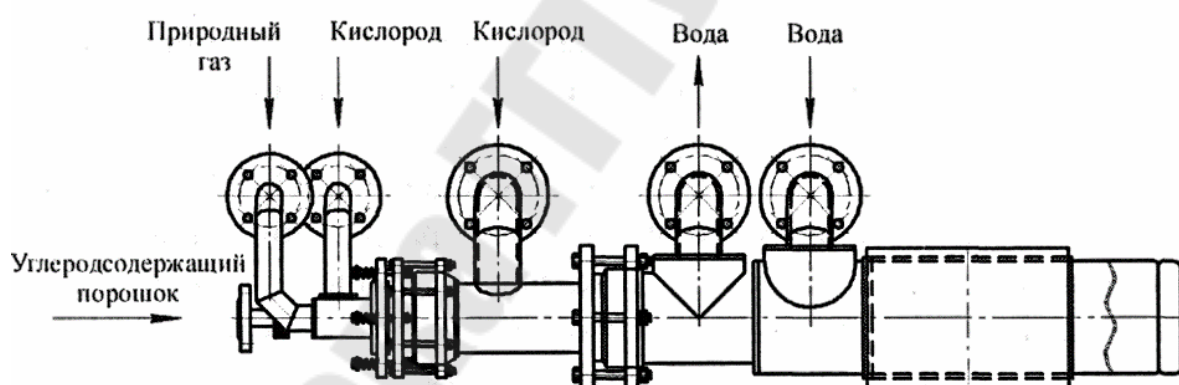


Рис. 49. Оконная комбинированная горелка-фурма

Интенсивность подачи кислорода в рабочее пространство печи оконными манипуляторами составляет 1500...5000 м³/ч, углеродсодержащих порошков-20...80 кг/мин.

Любой способ введения кислорода и углеродсодержащих порошков в печь в одном месте не обеспечивает их равномерного распределения в рабочем пространстве. Поэтому и вариант подачи кислорода и углеродсодержащих порошков манипулятором через рабочее окно имеет существенные недостатки.

1. Подаваемый кислород используется для подрезки и подогрева шихты в ограниченном объеме рабочего пространства печи, прилегающего к рабочему окну.

2. Шлак вспенивается главным образом поблизости от рабочего окна; вспененный шлак распределяется на поверхности металлического расплава неравномерно, что ухудшает условия работы футеровки печи.

3. Часть вдуваемого через рабочее окно углеродсодержащего порошка не успевает усвоиться расплавом и удаляется из печи вместе с вспененным шлаком через порог рабочего окна, что приводит к увеличению расхода порошка.

4. Подача кислорода и углеродсодержащих порошков в печь манипулятором через рабочее окно вынуждает большую часть плавки работать с открытым окном, что увеличивает подсос воздуха в рабочее пространство печи, количество выделяющихся из печи газов и потери тепла с ними, приводит к повышению расхода энергии на плавку и увеличению расхода электродов.

5.4.3 Стеновые фурмы

Более эффективна система подачи кислорода и углеродсодержащих порошков в расплав в нескольких местах стеновыми водоохлаждаемыми фурмами. Фурмы для введения кислорода и углеродистых порошков устанавливают в медных «скоростных» панелях, расположенных в нижней части стеновой водоохлаждаемой панели (рисунок 50). Фурмы для подачи порошков кокса или угля обычно размещают рядом с кислородными фурмами или ниже их. Истечение кислорода из кислородной фурмы осуществляется через сопло Лаваля, что обеспечивает сверхзвуковую скорость струи кислорода на выходе из фурмы и соответственно достаточную глубину проникновения струи в расплав и хорошее его перемешивание. Конструкции стеновых кислородной фурмы и фурмы для подачи порошка угля или кокса показаны на рисунке 51.

В последние годы на современных дуговых печах вместо стеновых кислородных фурм часто устанавливаются комбинированные фурмы-горелки. Комбинированная фурма-горелка представляет собой комбинацию газокислородной горелки и кислородной фурмы (рисунок 52). В такой фурме-горелке подача кислорода и регулирование его расхода осуществляются по двум независимым трактам.

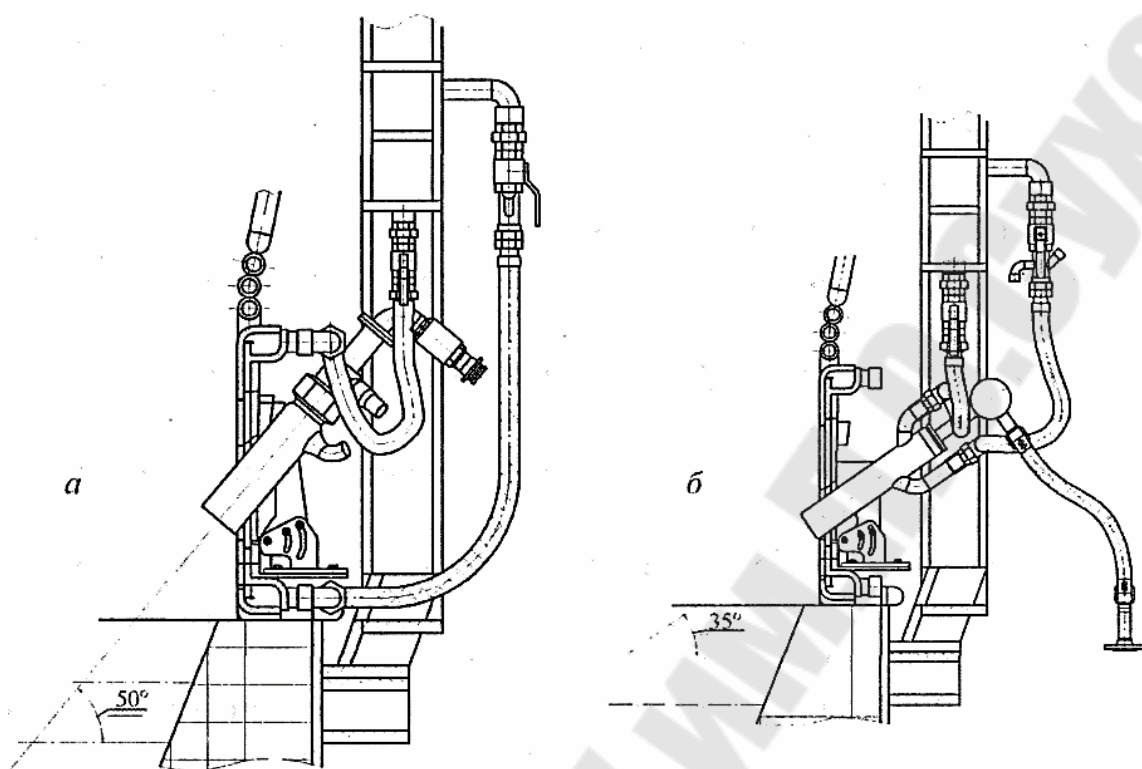


Рис. 50. Установка фурмы в стеновой панели: а - кислородной фурмы; б - фурмы для вдувания углеродсодержащего порошка

Характерной особенностью работы комбинированной фурмы-горелки является режим подачи кислорода в ванну в когерентной струе. Когерентная струя кислорода получается следующим образом: основной поток кислорода по оси сопла направлен в ванну и окружен потоком природного газа по внешнему контуру сопла. Окружающую струю кислорода природный газ выполняет роль своеобразной рубашки и уменьшает подсос газов в основную кислородную струю, благодаря этому обеспечивается сверхзвуковая скорость кислородной струи на большом (до 1,5...1,8 м) расстоянии от сопла фурмы. Такая скорость обеспечивает глубокое проникновение струи кислорода в расплав, усиливает его перемешивание, ускоряет окисление компонентов металла и повышает эффективность использования кислорода.

Комбинированные фурмы-горелки выполняют в современной дуговой печи следующие операции: подогрев шихты при работе в режиме горелок, подрезка нагретой шихты кислородом, вспенивание шлака и обезуглероживание металла. В начале плавки фурма-горелка

работает в режиме газокислородной горелки, нагревая и частично оплавливая лом в зоне своего действия. Затем расход газа уменьшается, а расход кислорода увеличивается, и начинается «мягкая» продувка кислородом, чтобы обеспечить подрезку лома в пределах действия фурмы. Работа в таком режиме обеспечивает быстрое проплавление лома в зоне действия горелки и создает условия для «жесткой» продувки расплава со сверхзвуковой скоростью и быстрого обезуглероживания металла, исключая угрозу рикошета струи кислорода от нерасплавившегося лома на стеновые панели. Одновременная подача в расплав углеродсодержащего порошка обеспечивает поддержание пенистого шлака.

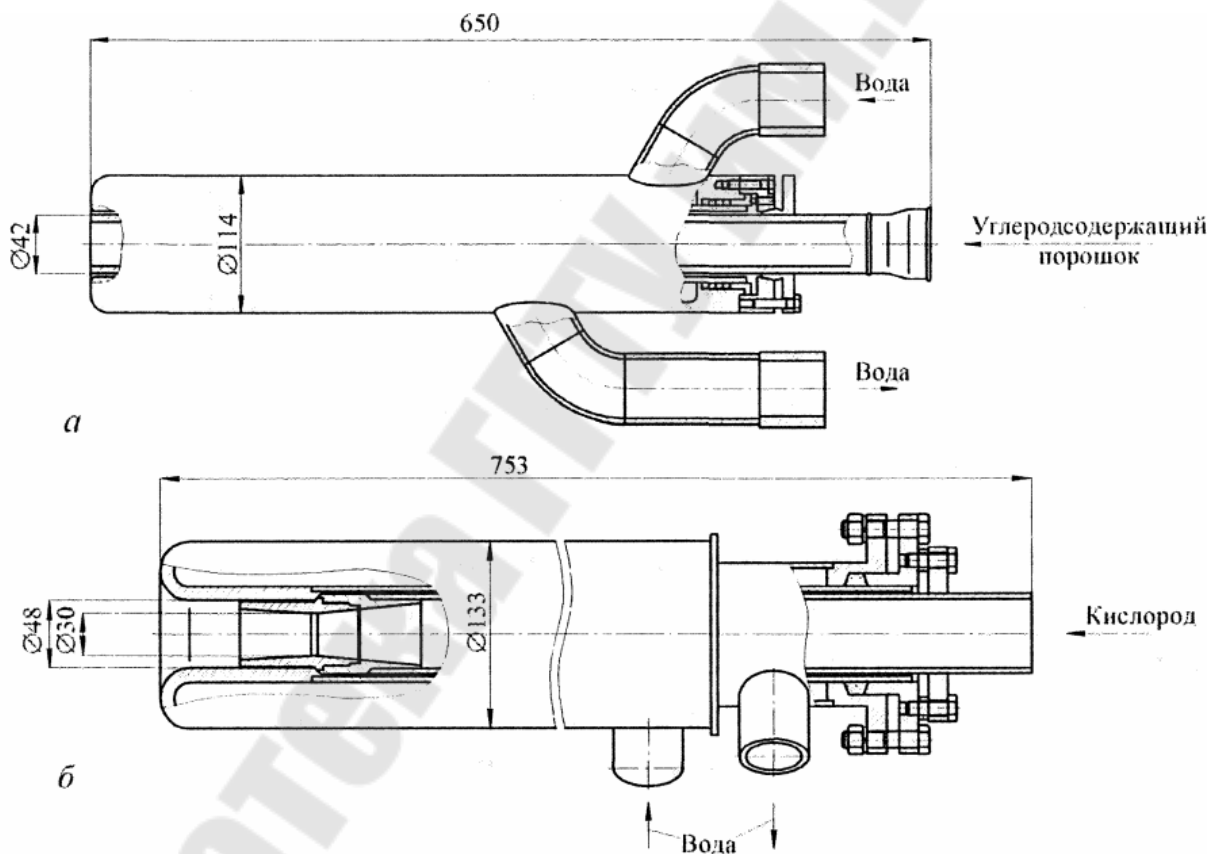


Рис. 51. Фурмы для вдувания углеродсодержащего порошка (а) и кислородная (б)

Тепловая мощность одной фурмы-горелки обычно колеблется в пределах 3...5 МВт, расход кислорода во время продувки составляет 1500...2500 м³/ч. Возможная интенсивность подачи углеродсодержащего порошка в расплав - в пределах 30...80 кг/мин. Общее количество кислорода и углеродсодержащего порошка, вводимых через фурмы, зависит от состава шихты и требуемого содержания углерода в металле перед выпуском плавки.

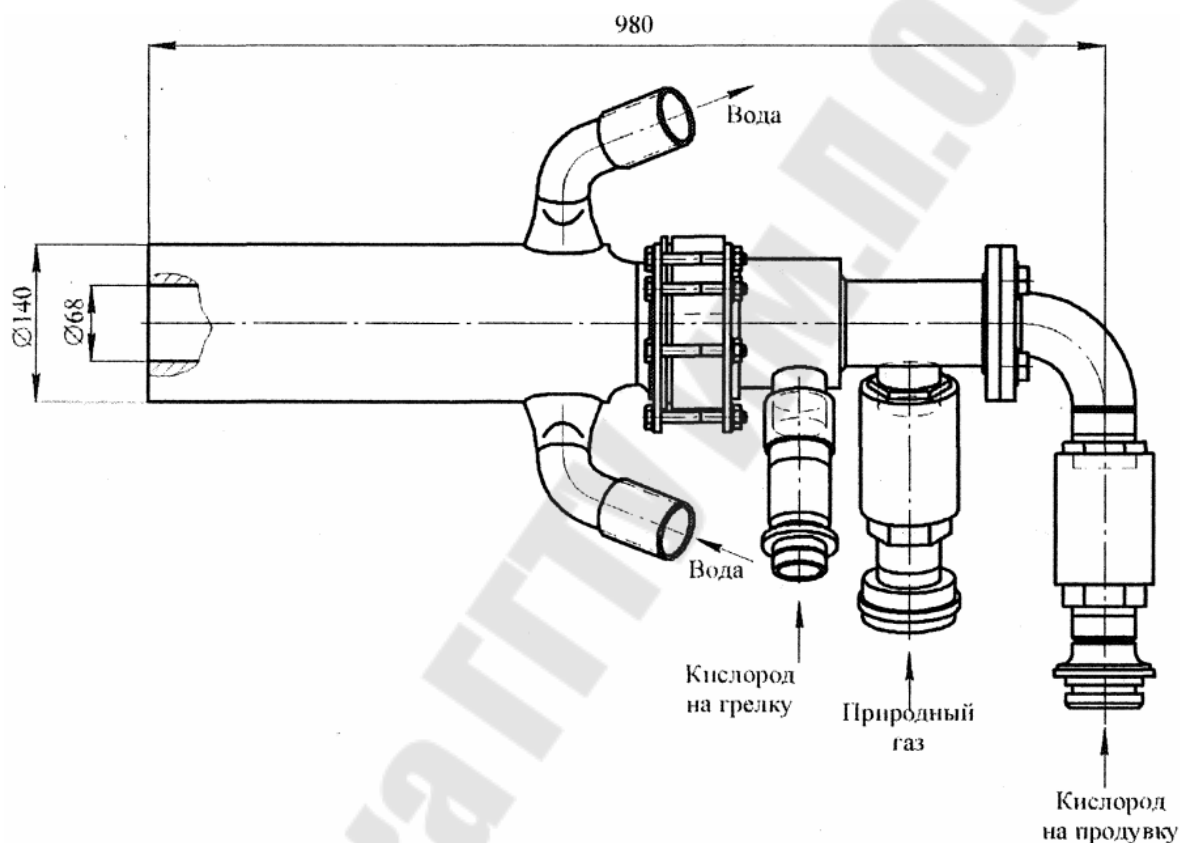


Рис. 52. Комбинированная фурма-горелка

Чтобы исключить забивание сопел комбинированных фурм-горелок брызгами металла и шлака в периоды отключения фурм, через каждую из них постоянно вдувают природный газ с интенсивностью 100 м³/ч и кислород с интенсивностью 200 м³/ч. Через каждую отключенную «угольную» фурму подается сжатый воздух с интенсивностью 100... 150 м³/ч.

Природный газ и кислород подаются к фурмам через вентиляные стенды, оснащенные необходимой отсечной и регулирующей арматурой, а также средствами измерения параметров энергоносителей.

Управление режимами работы комбинированных фурм-горелок производится в ручном или автоматическом режиме.

Стеновые комбинированные фурмы-горелки размещают, как и стеновые кислородные фурмы, в нижней части стеновых водоохлаждаемых панелей (рисунок 53). Известны случаи установки комбинированных фурм-горелок ниже уровня водоохлаждаемых панелей, на уровне шлакового пояса футеровки (КТ-система, Koster Technology). Фурмы для подачи углеродистого порошка также располагают в зоне шлакового пояса внутри огнеупорной футеровки стен (рисунок 54). Такие фурмы обеспечивают снижение расхода кислорода и углеродистого порошка при выплавке стали благодаря близкому расположению к расплаву и лучшему усвоению ванной кислорода и углерода. Возможность близкого к расплаву расположения сопел фурм обеспечивается за счет безопасной системы охлаждения при расходе охлаждающей воды менее $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ на одну фурму.

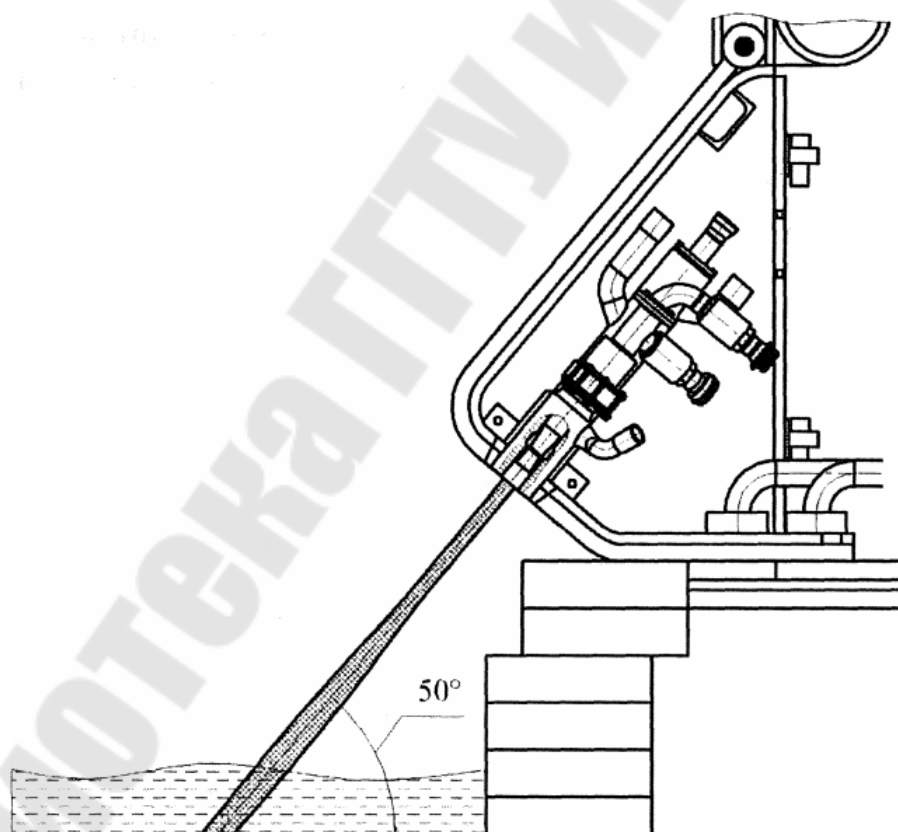


Рис. 53. Установка комбинированной фурмы-горелки в стеновой панели

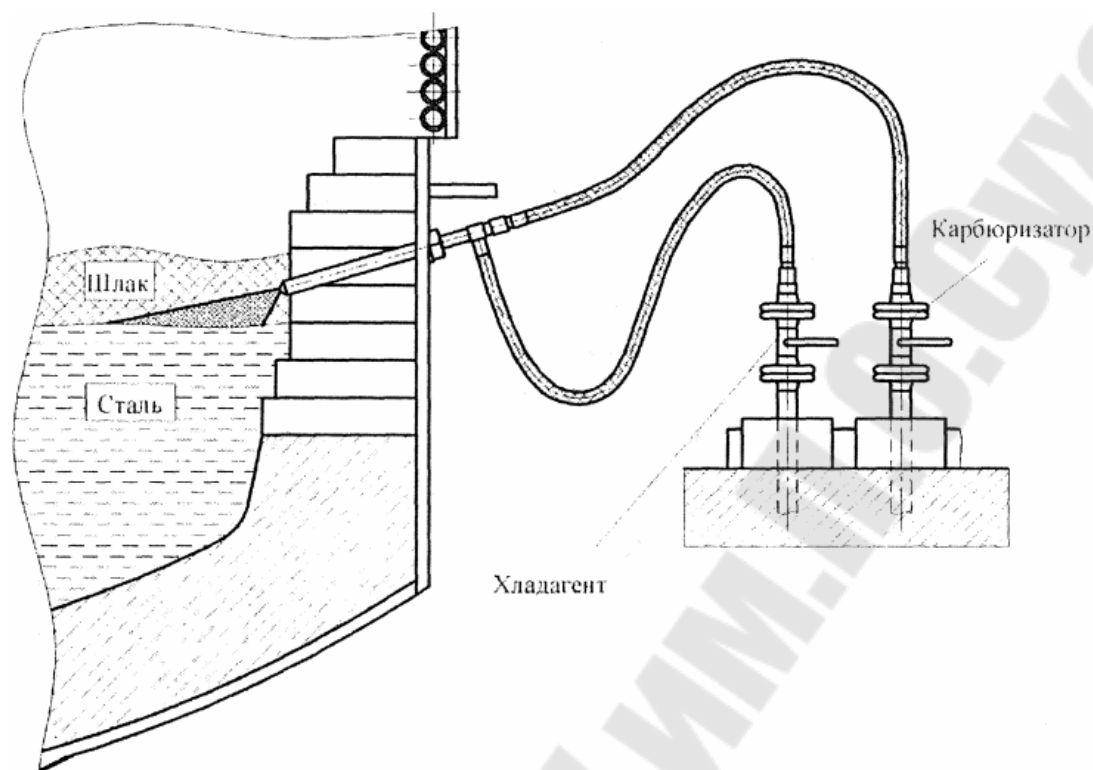


Рис. 54. Установка фурмы для вдувания углеродсодержащего порошка в стене ДСП

Обычно на 100 ... 125-тонных дуговых сталеплавильных печах устанавливают три-четыре комбинированные фурмы-горелки и две-три фурмы для подачи порошка углерода. Схема установки комбинированных фурм-горелок и фурм для подачи порошка углерода на 120-тонной дуговой печи показана на рисунке 55.

Углеродсодержащий порошок, вводимый в рабочее пространство печи (в шлаковый расплав), расходуется в основном на восстановление оксидов железа печного шлака. Их содержание в печном шлаке практически поддерживается на одном уровне за счет непрерывного окисления железа шихты вдуваемым в металлический расплав кислородом. В результате протекания реакции $(\text{FeO}) + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_{\text{газ}} - Q$ в шлаке образуется большое количество мелких пузырьков CO , шлак вспенивается, объем шлака увеличивается, мощные длинные дуги в значительной степени экранируются, перераспределяются тепловые потоки в рабочем пространстве печи. Увеличивается доля тепла, передаваемого от дуг непосредственно расплаву, и соответственно уменьшается количество тепла, излучаемого дугами в свободное про-

странство и на футеровку печи. Доля тепла дуг, усваиваемого непосредственно расплавом, с 40 % при работе без вспенивания шлака увеличивается до 90 % при работе с вспененным шлаком.

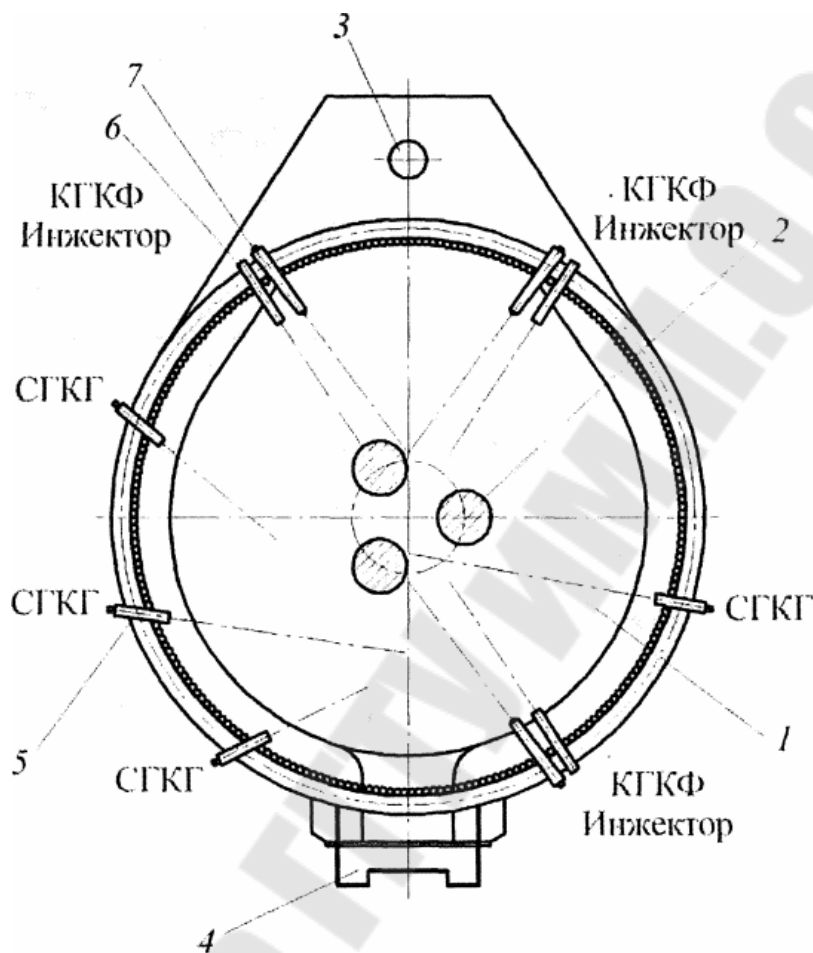


Рис. 55. Схема установки стеновых средств интенсификации плавки на 120-тонной ДСП: 1 - рабочее пространство печи; 2 - электроды; 3 - сталевыпускное отверстие; 4 - рабочее окно; 5 - стеновые газокислородные горелки (СГКГ); 6 - инжектор для вдувания углеродсодержащего порошка; 7 - комбинированные газокислородные фурмы (КГКФ).

Слишком большое увеличение содержания оксидов железа в печном шлаке ($\sum \text{FeO} > 25...30 \%$) крайне нежелательно, так как при этом снижается температура плавления шлака и его вязкость, затрудняется вспенивание шлака, усиливается агрессивное воздействие шлака на огнеупорную футеровку печи. Если увеличение содержания оксидов железа шлака происходит за счет окисления железа шихты

газообразным кислородом, то снижается и выход годного металла. Поэтому при интенсивной подаче кислорода в печь приходится увеличивать количество вдуваемого в рабочее пространство углеродсодержащего порошка. Кроме того, при содержании углерода в металлическом расплаве 0,3 % и больше основной печной шлак, содержащий 20...25 % оксидов железа, способен с заметной скоростью окислять углерод металла по схеме $(\text{FeO}) + [\text{C}] \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_{\text{газ}}$. В результате уменьшается содержание углерода в металле и количество оксидов железа в шлаке и требуется корректировка интенсивности подачи углеродсодержащего порошка и кислорода в печь. В течение окислительного периода плавки за короткое время существенно меняется распределение вводимого в расплав кислорода по статьям его расхода. В начале окислительного периода при достаточно высоком содержании углерода в металле большая часть введенного кислорода расходуется на окисление углерода металла, а немного кислорода расходуется на окисление железа. В конце периода при низком содержании углерода в расплаве в связи с трудностями окисления углерода большая часть введенного кислорода расходуется на окисление железа и повышение количества оксидов железа шлака. Сказанное достаточно наглядно иллюстрируется рисунком 56.

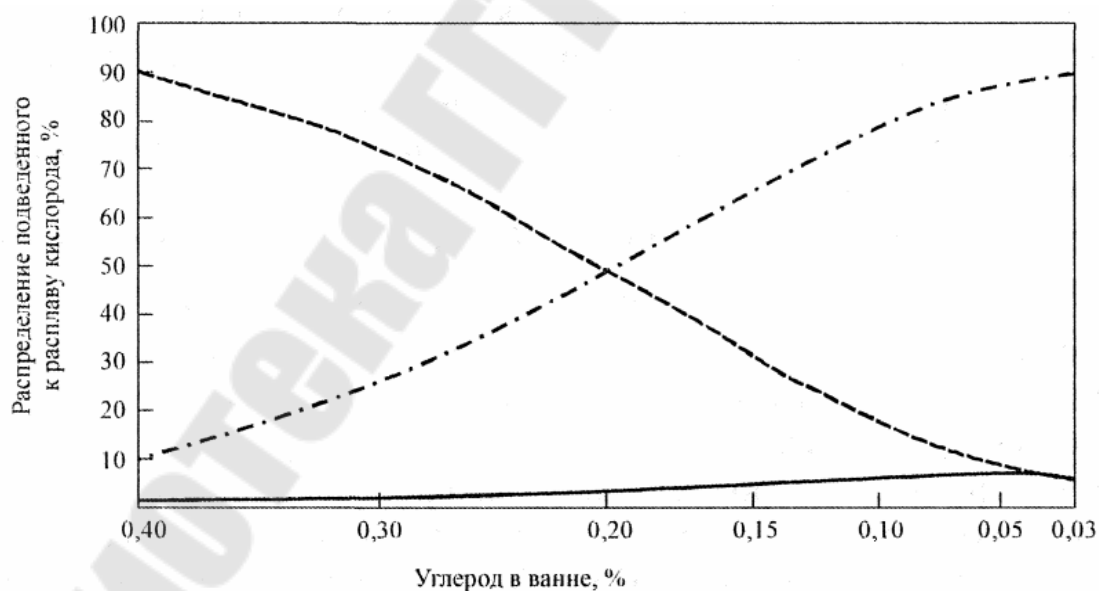


Рис. 56. Распределение подведенного в расплав кислорода между компонентами расплава. Сплошная линия – растворение кислорода в расплаве, штрихпунктирная – окисление железа, штриховая – окисление углерода.

В принципе для уменьшения угара железа по ходу окислительного периода следовало бы уменьшить расход кислорода, но без принятия мер для улучшения перемешивания расплава это приведет к увеличению длительности окислительного периода и некоторому уменьшению производительности печи. В большинстве случаев такой прием не применяется.

В связи с тем, что реакция восстановления оксидов железа шлака порошком углерода идет с поглощением тепла, значительный дополнительный приход тепла от экзотермических реакций в современной сверхмощной дуговой печи получается за счет окисления значительного количества железа шихты (при довольно большом приходе тепла за счет прямого окисления кислородом углерода шихты). В результате выход годного металла при плавке в современных дуговых печах обычно составляет 90...92% от массы загруженных железосодержащих материалов. Если принять содержание железа в ломе равным 98%, можно утверждать, что 6...8% железа шихтовых материалов теряется во время плавки, причем значительное количество железа теряется именно за счет интенсификации плавки. С электропечной пылью выносятся из печи до 1,5 % железа шихты. При кратности печного шлака порядка 0,10...0,12 и среднем содержании оксидов железа в шлаке 25 % в виде оксидов железа шлака теряется до 2,5 % железа шихты. Остальные 2...3 % железа шихты теряются в виде корольков и скрапин металлического железа, содержащихся в шлаке. Поэтому весьма актуальной становится проблема вторичного использования железа, содержащегося в печных пыли и шлаках.

5.4.4 Кислородные фурмы для дожигания СО в рабочем пространстве дуговой печи

При окислении 1 кг углерода газообразным кислородом в рабочем пространстве печи образуется около 1,87 м³ СО и выделяется около 2,62 кВт ч энергии (с учетом затрат тепла на нагревание газообразного кислорода). Кроме того, СО образуется при протекании эндотермической реакции восстановления оксидов железа шлака вдуваемым в него порошком углерода. При дожигании СО до СО₂ выделяется дополнительно 6,44 кВт ч энергии на 1 кг окислившегося углерода.

В случае интенсивного использования кислорода во время плавки и вдувания в расплав углеродистого порошка степень дожигания СО до СО₂ в рабочем пространстве печи за счет избыточного кислорода из подсосываемого воздуха невелика и обычно составляет 30...60%. До-

жигание остальной части СО приходится производить в газоотводящем тракте. В таком случае не только не используется в процессе производства стали энергия дожигания СО, но и усложняется система удаления и очистки печных газов. Требуется установка в газоотводящем тракте камеры дожигания СО и принятие специальных мер по охлаждению печных газов перед газоочисткой: применение водоохлаждаемых газоходов, впрыскивания воды, воздушных охладителей. При этом неизбежно увеличивается общее количество газов, пропускаемых через газоочистку, за счет подсоса воздуха для их охлаждения перед газоочисткой и возрастают эксплуатационные затраты на удаление и очистку печных газов.

Во многих современных дуговых печах для дожигания СО до СО₂ устанавливают специальные кислородные фурмы. При высокой температуре в рабочем пространстве печи дожигание СО протекает сравнительно медленно. Поэтому кислород для дожигания вводится в печь «мягко» в режиме, обеспечивающем возможно большую продолжительность его пребывания в печи. Кислородные фурмы для дожигания СО являются элементом общей системы использования кислорода в процессе плавки. Схема расположения кислородных фурм для дожигания СО, стационарно установленных в верхней части стеновых панелей, показана на рисунке 57.

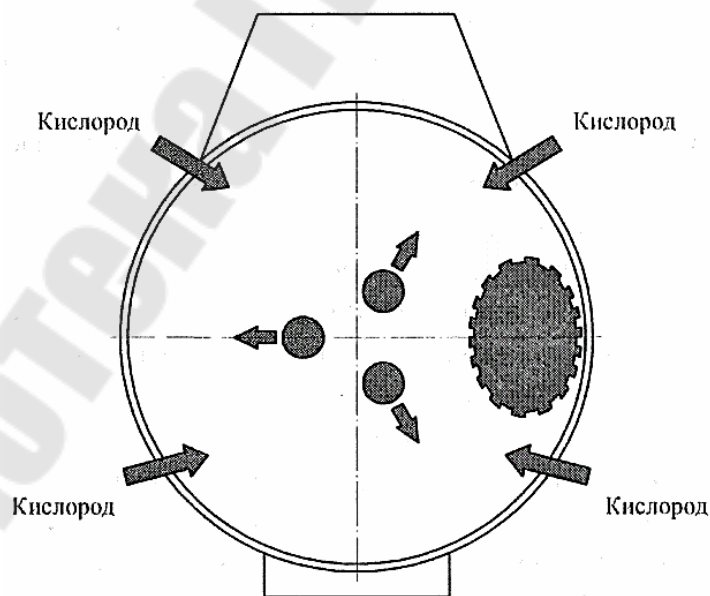


Рис. 57. Схема установки кислородных фурм для дожигания СО в рабочем пространстве электропечи

Иногда фурмы для дожигания СО устанавливаются в своде печи. На 160-тонной печи фирмы SAM Neuves-Maisons (Франция) три водоохлаждаемые фурмы для дожигания СО установлены по периферии свода на равном расстоянии одна от другой с небольшим наклоном от вертикали по направлению к центру печи.

Расход кислорода в фурмах для дожигания регулируется автоматически по результатам анализа состава отходящих из печи газов (O_2 , СО, CO_2) в сводовом патрубке. Обычно в период плавления расход кислорода на дожигание в печи большой емкости поддерживается в пределах 500...600 м³/ч, в окислительный период интенсивность подачи кислорода для дожигания СО увеличивается. Удельный расход кислорода для дожигания СО составляет 9... 10 м³/т стали. Когда не требуется дожигать СО, через фурму для дожигания подается небольшое количество кислорода, чтобы исключить возможность закупоривания сопел фурм.

Использование фурм для дожигания СО обеспечивает снижение удельного расхода электроэнергии на 4...8% и сокращение времени работы печи подтоком на 4...7 %

5.4.5 Глубинная продувка металла

Промышленное опробование глубинной продувки ванны в дуговых электропечах выявило значительные достоинства заглибления дутья в расплав. Идею глубинной продувки металлического расплава впервые реализовал Бессемер в своем конверторе с донной продувкой чугуна воздухом. Практика бессемеровской и томасовской конверторных плавки показала не только несомненные достоинства, но и недостатки донной продувки, прежде всего низкую стойкость днища и продувочных устройств из-за высокой температуры металла в зоне продувки. Низкая стойкость продувочных устройств длительное время тормозила развитие и применение глубинной продувки металлического расплава.

Прорыв в массовом освоении глубинной продувки кислородом был обеспечен разработкой технологий конверторной плавки с донным дутьем (ОВМ, Q-BOP, LWS), предусматривающих внешнюю защиту кислородной струи углеводородной оболочкой (природным газом, мазутом и др.). Эндотермическая реакция разложения углеводородов уменьшает температуру в зоне, прилегающей к фурме, и снижает скорость износа фурменного устройства и футеровки в околофурменной зоне. В таких случаях применяли фурмы типа «труба в трубе» (рисунок 58).

В 1980-е годы конверторный процесс с донной продувкой получил достаточно широкое распространение в металлургической практике. Для образования защитной оболочки вокруг струи кислорода обычно использовали природный газ в количестве 8... 10% от объема вдуваемого кислорода. Наряду с положительным эффектом донной продувки (повышение степени использования кислорода, уменьшение угара железа, сокращение длительности плавки) проявились и негативные стороны такого процесса (снижение стойкости футеровки днища конвертора; необходимость уменьшения доли лома в шихте и активизация процесса образования настыли на горловине конвертора, вызванного уменьшением прихода тепла от экзотермической реакции окисления железа). В конверторном производстве это привело к появлению и применению конверторов с комбинированной подачей кислорода (сверху и снизу).

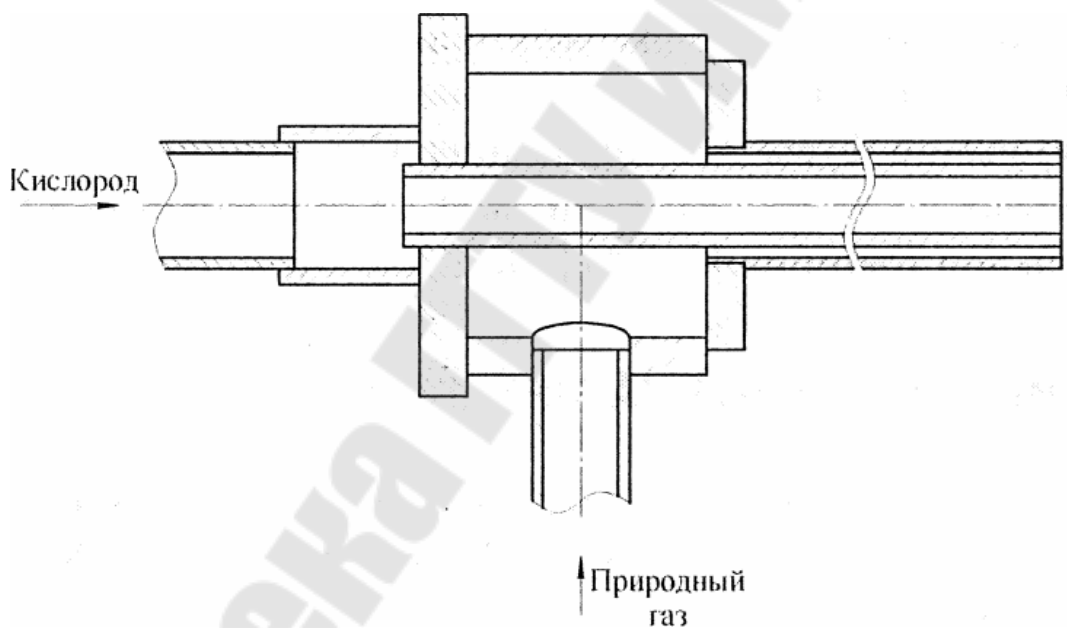


Рис. 58. Схема кислородной фурмы для донной продувки металла

Промышленное применение донной продувки ванны кислородом в дуговых сталеплавильных печах началось с разработки процессов K-ES и Danarc. Схема электропечи, работающей на технологии K-ES, приведена на рисунке 59. Эффективность процесса хорошо иллюстрируется работой печи фирмы Lucchin SpA в Сарессо (Италия). Печь емкостью 92 т с трансформатором 50 МВ · А имеет два корпуса, один из которых неделю находится в работе, а второй - в ремонте.

Основными элементами системы К-ES являются: погружная стендовая фурма для вдувания порошка углерода; шесть комбинированных фурм-горелок (три тангенциальных и три радиальных) мощностью по 0,5...4,5 МВт; три подовых кислородных фурмы (интенсивность подачи кислорода на одну фурму 360 м³/ч); одна расходомерная оконная кислородная фурма; одна водоохлаждаемая кислородная фурма; система анализа технологических газов. Управление всеми этими элементами осуществляется автоматически. Применение К-ES процесса обеспечило снижение расхода электроэнергии на 49 кВт ч/т и электродов на 0,4 кг/т стали, повышение производительности печи на 10% и увеличение выхода годного металла на 2,3 %. Показатели процесса частично улучшены и за счет донной продувки.

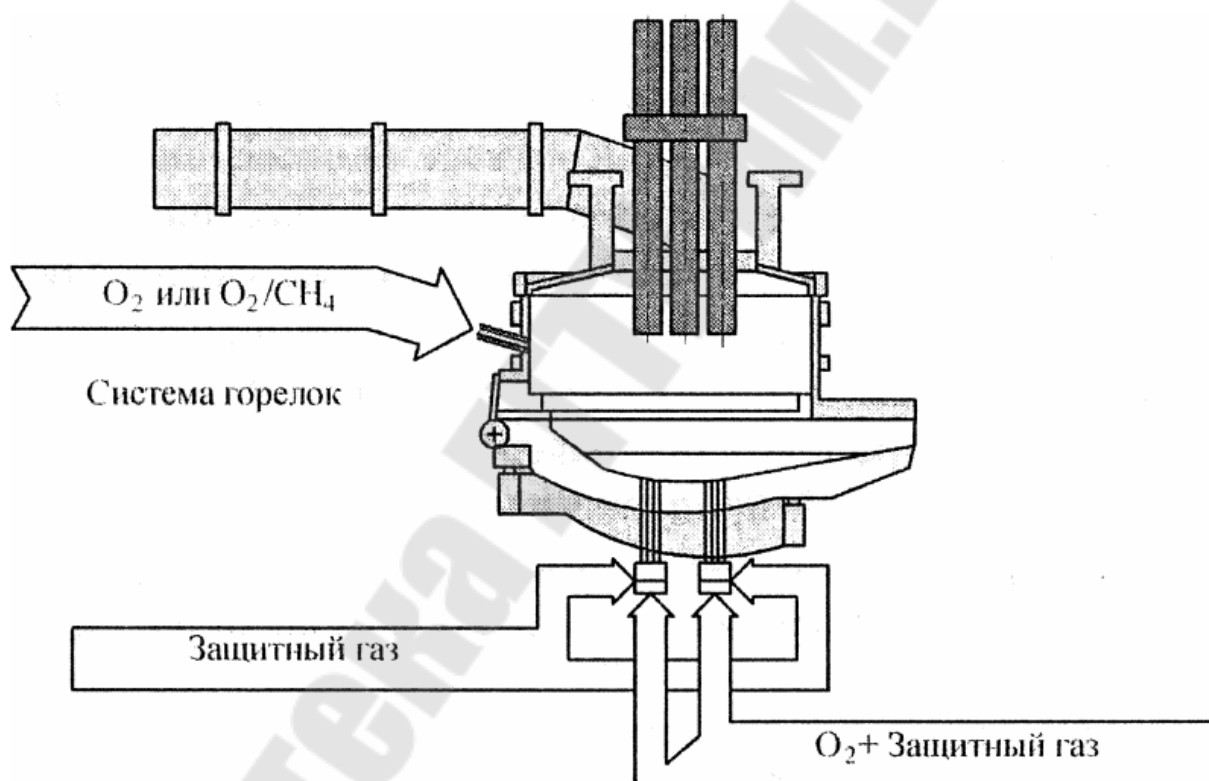


Рис. 59. Схем электропечи, работающей по техноогии К-ES

Технология Danarc, разработанная фирмой Danieli (Италия), начала внедряться в середине 1990-х годов. Промышленное освоение такой технологии на Молдавском металлургическом заводе (ММЗ) начато в 1996 году. В днище печи были установлены четыре фурмы, интенсивность подачи кислорода для каждой 100... 120 м³/ч. В качестве защитной среды использовали природный газ в количестве

18...28% от объема расходуемого кислорода. При общем расходе кислорода 250...400 м³/ч и природного газа 90 м³/ч стойкость продувочных устройств составила 250 плавов. При продувке через донные фурмы только азота (150 м³/ч) для перемешивания ванны средняя стойкость фурм составила 450 плавов. Из-за низкой стойкости донных фурм после 10 опытно-промышленных кампаний их использование было прекращено и начато освоение боковой глубинной продувки с расположением дутьевых устройств на 300...500 мм ниже зеркала ванны.

Применение такой технологии обеспечило сокращение времени под током на 2,7...3,3% и расхода электроэнергии на 20 кВтч/т стали. Эксплуатационная стойкость устройств для боковой глубинной продувки кислородом составила 500 плавов. При замене кислорода нейтральным газом скорость износа огнеупорной футеровки околофурменной зоны снижалась почти в 2 раза (с 0,9... 1,0 мм за плавку до 0,5...0,6 мм).

Из-за низкой стойкости фурм глубинной продувки и огнеупорной футеровки околофурменной зоны глубинная продувка ванны кислородом (особенно с высокой интенсивностью) пока получила лишь ограниченное применение.

Гораздо чаще в дуговых сталеплавильных печах применяется донная продувка ванны инертным газом (аргоном или азотом). В качестве продувочных устройств могут быть использованы огнеупорные пробки системы ДРР фирмы Veitsch-Radex (Австрия). Обычно на печи устанавливают три-четыре таких пробки (рисунок 60).

Применение глубинной продувки ванны нейтральным газом улучшает перемешивание расплава, снижает расход электроэнергии на 5... 7 кВтч/т и сокращает длительность плавки на 3 мин.

В принципе донная продувка ванны должна обеспечить некоторое снижение потерь железа (за счет небольшого уменьшения температуры верхних слоев расплава при его интенсивном перемешивании и соответственно испарения железа).

5.4.6 Применение газокислородных горелок

Интенсификация электроплавки с помощью газокислородных горелок, обеспечивающих повышение производительности дуговых печей и снижение расхода электроэнергии, получила широкое распространение. Газокислородные горелки - практически стандартное оборудование для современных дуговых печей во всем мире. В последние годы стали больше уделять внимание использованию газоки-

слородных горелок, так как возросла стоимость электроэнергии и электродов. Природный газ - более дешевый энергоноситель, а снижение расхода электроэнергии уменьшает и расход электродов.

Энергетическую целесообразность комбинированного применения электроэнергии и топлива при производстве электростали определяет сквозной коэффициент полезного использования первичной энергии топлива (природного газа) при различных вариантах: непосредственно в дуговой печи в горелках или на тепловых электростанциях (ТЭС) для получения электроэнергии, передаваемой в ЭСПЦ и дуговые печи. Такое сопоставление правомерно, поскольку ТЭС, работающие на природном газе или мазуте, производят более 50 % всей электроэнергии.

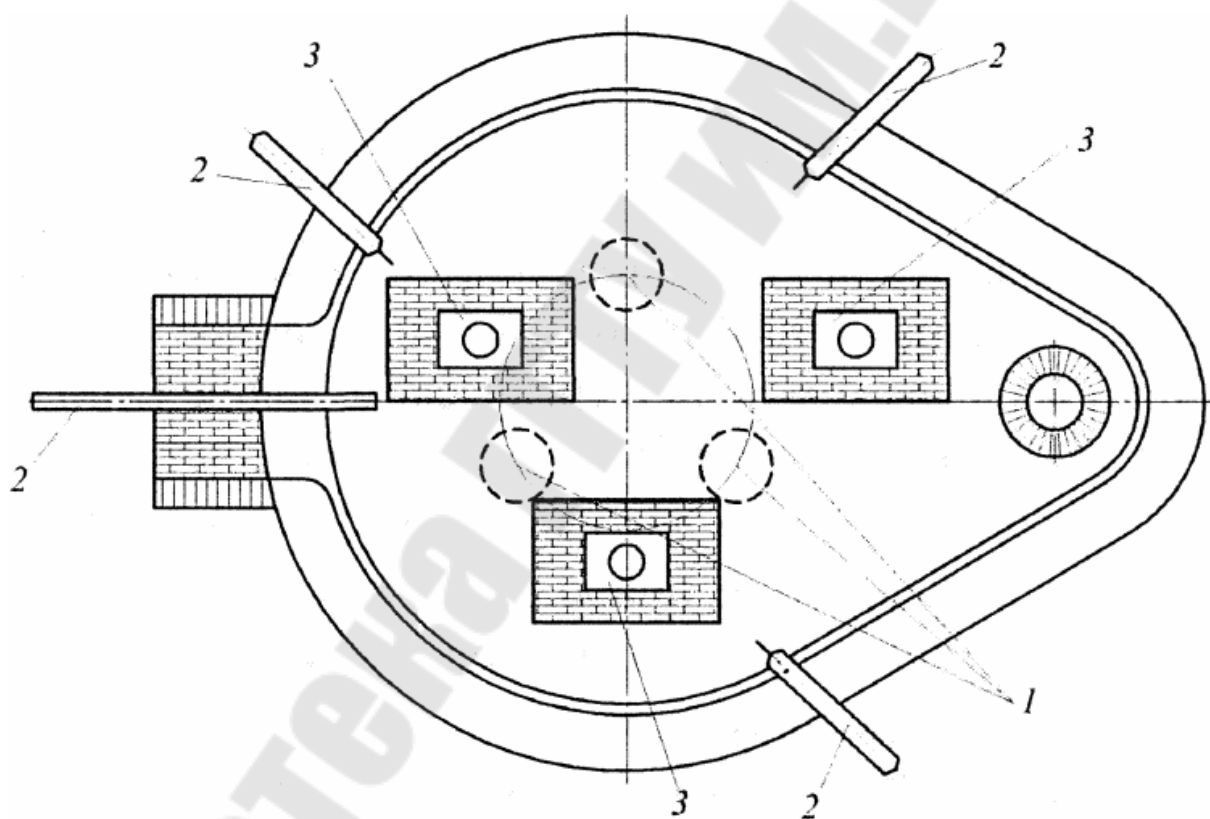


Рис. 60 Схема установки в подине электродной печи огнеупорных блоков для донной продувки металла инертным газом: 1 - электрод; 2 - газокислородные фурмы; 3 - огнеупорные продувочные блоки

Применение горелок для нагрева лома в дуговой печи дает в масштабах экономики страны значительную экономию первичного

топлива - природного газа (или мазута), затрачиваемого в целом на выплавку электростали.

Приведенные данные свидетельствуют об эффективности и целесообразности использования природного газа или мазута в печных топливокислородных горелках при выплавке электростали.

Широкое распространение получила установка трех стеновых газо-кислородных горелок в «холодных» зонах электропечи. Мощность одной горелки обычно составляет 3...5 МВт. Горелки устанавливаются стационарно. Удельные расходы природного газа и кислорода составляют соответственно 5...6 и 10...12 м³/т. При таких расходах природного газа и кислорода применение горелок обеспечивает сокращение длительности периода плавления в современной печи на 10... 15 % и снижение расхода электроэнергии на 40.. .50 кВт · ч/т.

В рабочем пространстве дуговой электропечи тепло от горелок к шихте передается главным образом конвекцией. При этом КПД горелок в значительной мере зависит от скорости истечения горячих газов факела, площади поверхности шихты, омываемой факелом, температуры нагреваемого лома.

Горелки более эффективно работают в начале плавления, когда факел окружает относительно холодный лом. В процессе плавления КПД стационарных горелок снижается (рисунок 61), так как по мере проплавления лом оседает (опускается), факел с ним контактирует все меньше и меньше. Кроме того, при разогреве поверхности кусков шихты до 1300... 1450 оС резко возрастает скорость окисления железа продуктами полного сгорания природного газа, которые восстанавливаются до СО и Н₂, и эффективность работы горелок резко снижается. Поэтому на практике принята продолжительность использования стационарных стеновых горелок в течение примерно 50 % времени плавления лома.

Стеновые стационарные горелки обладают ограниченными теплотехническими возможностями. Конструкция таких горелок не позволяет изменять направление факела во время нагрева металлошихты. Поэтому обычно используют короткофакельные газокислородные горелки малой мощности. Увеличение мощности таких горелок нецелесообразно, так как ускорение нагрева лома в зонах факелов требует соответствующего сокращения длительности их работы.

Для увеличения количества тепла, передаваемого шихте горелками, повышают суммарную мощность горелок за счет увеличения

числа относительно маломощных горелок и их рассредоточения по периметру и высоте печи.

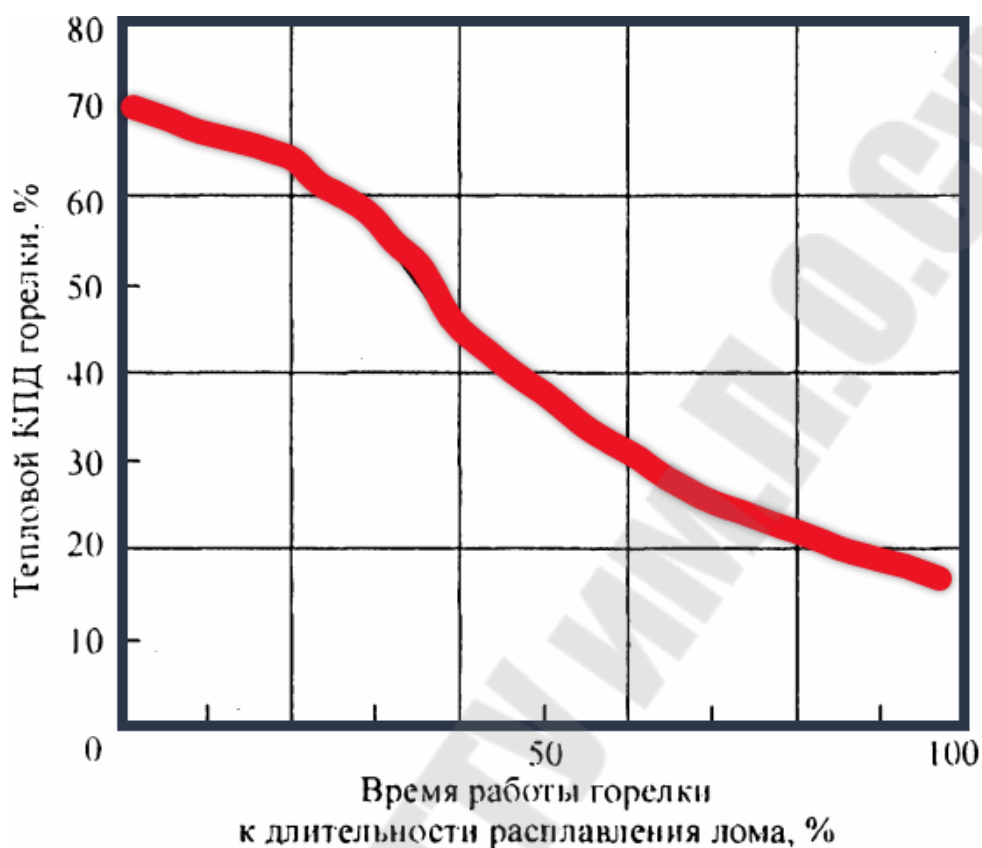


Рис. 61. Время работы горелки к длительности расплавления лома, %

Например, на 90-тонной электропечи Danarc установлены 12 газокислородных горелок: нижний уровень - 8 горелок по 3,5 МВт и верхний уровень - 4 горелки по 3,5 МВт. Общая мощность горелок на электропечи достигла 42 МВт, что составляет почти половину мощности двух используемых трансформаторов (по 43,5 МВ · А).

Однако увеличение числа горелок создает трудности по их размещению в печи, усложняет конструкцию печи и увеличивает затраты на их обслуживание.

Выгоднее вероятно пойти по пути увеличения единичной мощности горелок и перейти от стационарных к поворотным горелкам, способным в значительных пределах изменять направление факела. При работе горелки факел должен перемещаться от уже нагретых к относительно холодным объемам шихты. Таким образом можно расширить зону действия факела в несколько раз и соответственно примерно во столько же раз увеличить полезную мощность горелки.

Эффективна установка высокомогной поворотной горелки в эркере (рисунок 62). Мощность такой горелки может достигать для 100-тонной дуговой печи 20...25 МВт. Горелка вводится в печь через отверстие в своде эркера только во время нагрева лома, а затем выводится из печи и отворачивается в сторону, чтобы не мешать обслуживанию выпускного отверстия. В сочетании с оконной поворотной горелкой суммарная мощность двух горелок может составлять 35...40 МВт, что позволяет заменить шесть-восемь обычных стационарных стеновых горелок и обеспечить при этом получение более высоких результатов (снижение расхода энергии, сокращение времени плавления лома).

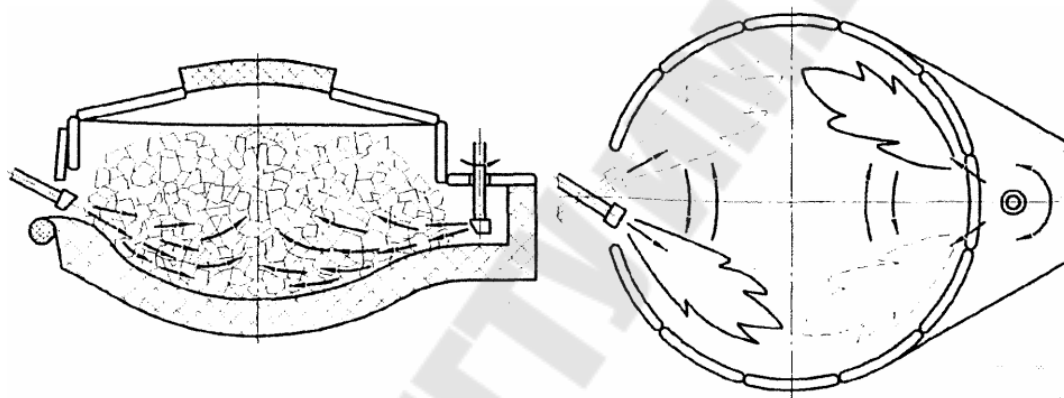


Рис. 62. Установка поворотных горелок в эркере и рабочем окне электропечи

5.4.7. Оценка эффективности использования альтернативных источников тепла при электроплавке

Применяемые на современных сверхмощных электропечах газокислородные горелки, инжекция кислорода и углерода, вспенивание шлака, дожигание СО значительно улучшили энергетические и технико-экономические показатели работы печей. При суммарном удельном расходе кислорода 35...45 м³/т и углерода (кокс/уголь) в завалку + инжестированный порошок (5... 15) + (3...10) кг/т расход электроэнергии составляет 335...420 кВт · ч на 1 т жидкой стали, расход электродов колеблется на уровне 1,4... 1,7 кг на 1 т жидкой стали, а общая длительность плавки сократилась до 40...50 мин.

Тепловой баланс дуговой печи большой емкости, работающей по современной технологии, показан на рисунок 63. Общее количество

во вводимой в рабочее пространство энергии составляет 630 кВт ч/т, при этом только 65 % (410 кВт ч/т) вносится электроэнергией. Энергия, вносимая газокислородными горелками, составляет 10% общей энергии. Около 25 % энергии вносят в рабочее пространство печи экзотермические реакции окисления элементов шихты: углерода, железа, кремния, марганца, а также органических примесей шихты (например, масла и др.).

На отдельных электропечах, оборудованных описанными выше средствами интенсификации, удается добиться лучших результатов по расходу электроэнергии и производительности печи. Так, на 80-тонных печах фирмы BSW с трансформатором 75 МВ А средняя длительность плавки составила 32,8 мин (46 плавов в сутки), а расход электроэнергии - 332 кВтч/т. Дальнейшего снижения расхода электроэнергии в дуговых печах, работающих без использования в шихте жидкого чугуна и без предварительного подогрева лома, вряд ли можно ожидать.

Использование различных альтернативных видов энергии в современной сверхмощной дуговой печи неравноценно с точки зрения эксплуатационных затрат и влияния на себестоимость выплавляемого металла. Экономический эффект от применения конкретного вида альтернативной энергии при выплавке стали в дуговой электропечи в значительной степени определяется стоимостью 1 кВт ч энергии, усвоенной продуктами плавки (металлом и шлаком) при использовании данного вида энергии с учетом цен на энергоносители.

Частично проблема дальнейшего снижения расхода электроэнергии (и общего расхода энергии) может быть решена путем использования тепла отходящих газов, так как примерно 20 % энергии, вводимой в дуговую печь, теряется с отходящими печными газами. Известны попытки внепечного подогрева лома отходящими печными газами в загрузочных бадьях, но из-за выделения дыма в атмосферу цеха и низкой тепловой эффективности этот способ не получил распространения.

Широкое применение метод предварительного подогрева шихты отходящими печными газами получил в агрегатах нового типа: шахтной печи фирмы Fuchs с подогревателем, расположенным на своде печи; печи Consteel с непрерывной загрузкой в жидкую ванну шихты, подогреваемой отходящими газами в конвейерном подогревателе. Подогрев шихты печными газами в специальном подогревателе осуществляется и на печи Danarc Plus, имеющей увеличенную высоту

рабочего пространства, что позволяет производить завалку шихты одной бадьей.

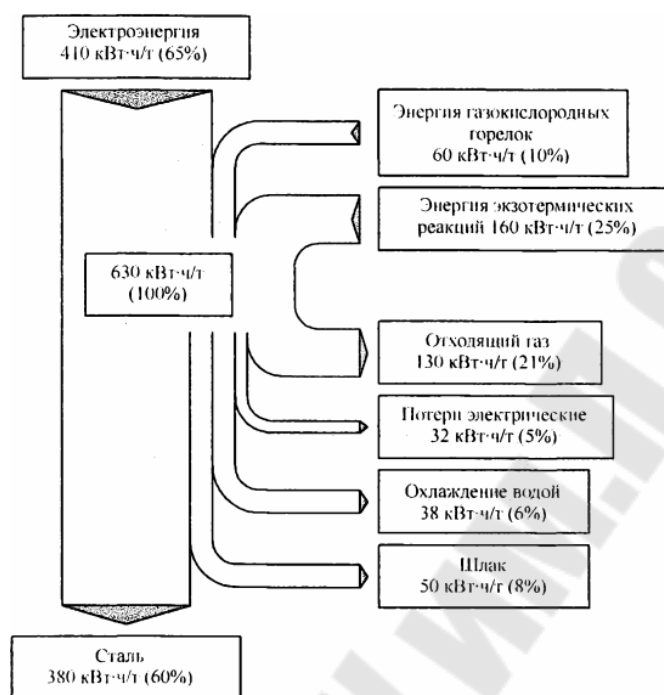


Рис. 63. Типичный энергетический баланс плавки стали в современной сверхмощной дуговой печи

Подогрев лома до температуры 600...700 °С происходит в водоохлаждаемой загрузочной бадье, установленной рядом с печью на подвижной платформе. Применение подогрева лома в печи Consteel снижает расход электроэнергии до 325...350 кВт·ч/т при расходе порошка кокса 5...25 кг/т и кислорода 20...40 м³/т. Печь с шахтным подогревателем шихты по сравнению с печью традиционной конструкции имеет расход электроэнергии примерно на 100 кВт ч/т меньше. На печи Danarc Plus, за счет подогрева лома отходящими печными газами удается снизить расход электроэнергии до 260 кВт ч/т [5.19] при расходе кислорода 35 м³/т и природного газа 7 м³/т. Необходимо принимать во внимание возможность образования диоксинов и фуранов при подогреве лома, загрязненного включениями пластмасс, смазочных материалов и т.д. Поэтому для разрушения диоксинов и фуранов приходится применять повторный нагрев использованного в подогревателе газа в камере дожигания с помощью дополнительных горелок достаточно большой мощности. На печи Danarc Plus мощность горелок в камере дожигания составляет 21 МВт. На дожигание и повтор-

ный нагрев газа с 300 до 900 °С требуется 94 кВт · ч/т . Использование адсорбентов (активированный уголь) для очистки газов от диоксинов и фуранов - достаточно эффективный прием, но при этом появляются значительные затраты на адсорбент и возникает проблема захоронения или утилизации отработанного адсорбента. Все это снижает суммарную эффективность подогрева лома отходящими печными газами.

Значительное повышение работы дуговых печей даже по сравнению с нынешними показателями может быть получено за счет реализации концепции двухстадийного процесса плавки стали так называемой топливно-дуговой сталеплавильной печи (FAF)

5.5 Пример расчёта дуговой печи ёмкостью 120 тонн

5.5.1 Описание технологии выплавки низкоуглеродистых марок стали

Выплавка стали НЕ проводится по одношлаковой технологии (без восстановительного периода) с последующей обработкой на АКП.

Плавка в ДСП состоит из следующих периодов:

- 1) Заправка печи;
- 2) Завалка;
- 3) Период плавления, окислительный период;
- 4) Выпуск в ковш.

1) Для поддержания огнеупорности футеровки печи в рабочем состоянии необходим ремонт наиболее пострадавших ее участков. После выпуска плавки печь необходимо очистить от остатков шлака и металла, чтобы не происходило уменьшение объема ванны из-за заращения подины. Остатки металла из углублений подины удаляют повторным сливом или выдувкой сжатым воздухом (кислородом) предварительно заправив задний откос. Остатки неслившегося металла замораживают на заднем откосе. После этого поврежденные участки ремонтируют. Подину, откосы и шлаковый пояс заправляют при помощи заправочных машин сухим или увлажненным водным раствором жидкого стекла (плотностью от 1,10 до 1,25 т/м³, до 8 % по массе), сухим магнезитовым порошком или смесью магнезитового порошка с порошкообразным науглероживателем (15-30 % по массе).

2) Шихту составляют из углеродистого лома и предельного чугуна. Примерная шихтовка при выплавке низкоуглеродистых марок стали, т:

- | | |
|--------------------------|--------|
| - углеродистый лом 2А,3А | 80-90; |
| - ж/д лом | 20-30; |

- чугун передельный 12;
- оборотный углеродистый лом 6-12.

Загрузку шихты ведут с помощью корзины (бадьи). Ее вводят в открытую печь сверху и, раскрывая дно, высыпают шихту на подину печи. В корзину шихту укладывают в следующей последовательности: на дно кладут часть мелочи, чтобы защитить подину от ударов тяжелых кусков лома, затем в центре укладывают крупный лом, а по периферии средний и сверху – оставшийся мелкий лом.

3) Период плавления совмещают с окислительным периодом.

После окончания завалки электроды опускают почти до касания с шихтой и включают ток. Под действием высокой температуры дуг шихта под электродами плавится, жидкий металл стекает вниз, накапливаясь в центральной части подины. Электроды постепенно опускаются, проплавляя в шихте «колодцы» и достигая крайнего положения. В дальнейшем по мере увеличения количества жидкого металла электроды поднимаются, так как автоматические регуляторы поддерживают длину дуги постоянной.

Задача периода плавления – как можно быстрее перевести металл в жидкое состояние. Во время плавления происходит окисление составляющих шихты, формируется шлак, происходит частичное удаление в шлак фосфора и серы.

Ускорение процесса плавления вне зоны действия дуг достигается применением топливно-кислородных горелок (ТКГ).

Водоохлаждаемые ТКГ в рабочее пространство вводятся через кожух в количестве 3-х штук. Мощность стеновых ТКГ 20МВт; удельный расход природного газа 18 м³/т при расходе кислорода 10 м³/т. Применение ТКГ сокращает удельный расход электроэнергии на 100 кВт·ч/т.

Во время окислительного периода в печь присаживают шлакообразующие 1-1,5% извести. Как только сформировался жидкоподвижный шлак начинают продувку кислородом через ТКГ. Расход кислорода – 30 м³/т. Продувка кислородом вызывает интенсивное окисление углерода с выделением пузырей СО, вспенивающимися шлак, в результате чего он стекает через порог рабочего окна. Общая продолжительность продувки ванны составляет 10-20 минут. В течение всего окислительного периода идет дефосфорация металла. Полнота дефосфорации повышается в результате перемешивания шлака и металла при кипении и вследствие непрерывного обновления шлака. Достижением нужного содержания фосфора, углерода и необходимой

температуры исчерпываются основные задачи окислительного периода. После окончания продувки делают выдержку 8 минут, во время которой отбирают пробу на анализ и замеряют температуру металла.

Во время окислительного периода серы удаляется на 20%, фосфора на 40%, кремний окисляется до следов, марганец окисляется на 75%, углерод – 0,6% (окислительный период + период плавления), угар железа составит 4%. Температура металла на выпуске из печи 1640-1700 °С.

4) Выпуск стали в ковш.

Сталь выпускается нераскисленной. Благодаря эркерному выпуску удается отсечь печной шлак (который мешает провести десульфурацию, вызывает рефосфорацию, насыщает металл наметаллическими включениями. За 10 минут до выпуска металла под печь подают ковш, разогретый до температуры 1000°С. Во время выпуска в ковш присаживаются шлакообразующие, раскислители, ферросплавы.

5.5.2 Назначения основных элементов печи

В ДСП 120т. (см. рисунок 64) можно выделить следующие основные элементы: под; стены; свод; рабочее окно; эркер.

Под. Назначение подины – сформировать ванну соответствующей формы и размеров для жидкого металла и шлака, а также обеспечить тепловую изоляцию металла в ванне.

Рабочий слой подины испытывает механические нагрузки и резкое охлаждение при загрузке холодной твердой металлошихты, активно участвует в физико-химических процессах, происходящих в жидком металле, взаимодействует со шлаками, испытывает эрозионный и коррозионный износ в условиях высокой температуры, ферростатического давления и электромагнитного перемешивания жидкого металла.

Разрушение подин происходит двумя путями – оплавлением и вымыванием участков футеровки с пониженной огнеупорностью; при охлаждении печи в период ремонтов возможно рассыпание в порошок поверхностного слоя, содержащего двухкальциевый силикат.

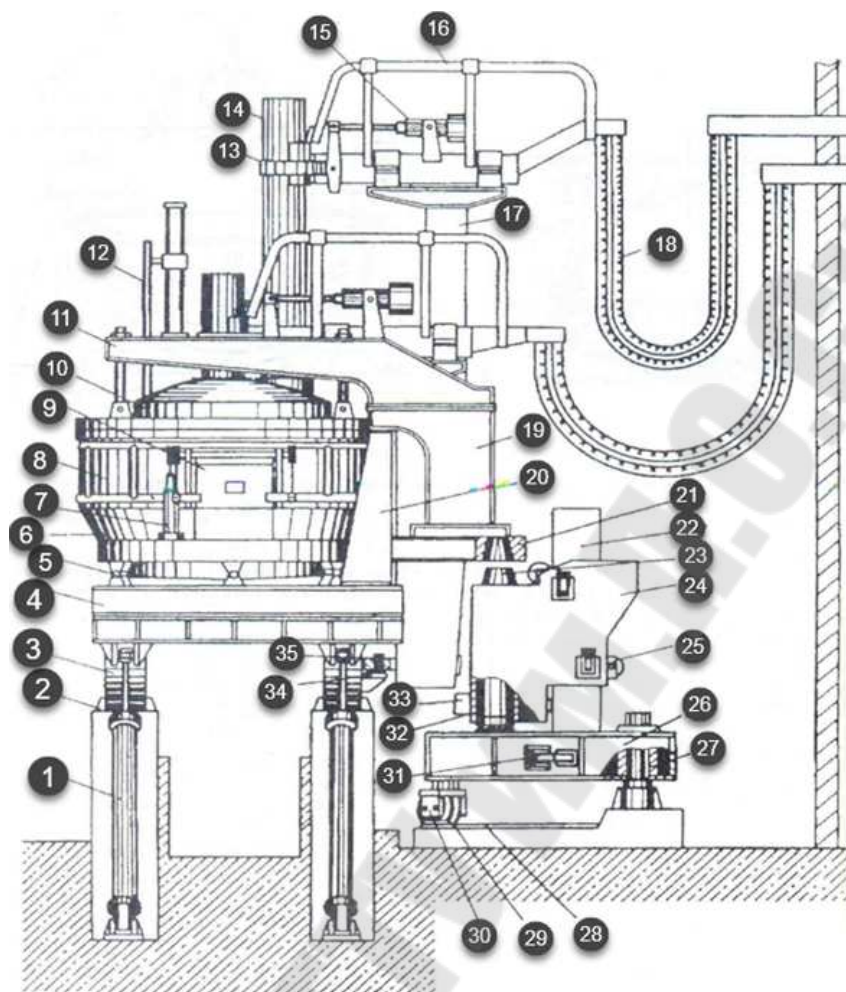


Рис. 64. Общий вид ДСП-120т:

1 – гидроцилиндры наклона печи; 2 – фундаментные балки; 3 – секторы люльки печи; 4 – прямоугольные балки люльки печи; 5 – стационарные опорные ванны печи; 6 – кожух печи; 7 – гидропривод подъема заслонки рабочего окна; 8 – подвод воды к водоохлаждаемым панелям; 9 – заслонка рабочего окна; 10 – водоохлаждаемый свод; 11 – полупортал; 12 – газокислородные горелки; 13 – электрододержатели; 14 – электроды; 15 – пружинно-гидравлический зажим электродов; 16 – токоведущие медные трубки; 17 – трубчатые телескопические стойки; 18 – гибкая часть токопровода; 19 – траверса шахты; 20 – тумбы; 21 – несущая траверса; 22 – стойки; 23 – конический хвостовик; 24 – каретка; 25 – направляющие ролики; 26 – платформа поворота свода; 27 – центральная опора; 28 – кольцевые рельсы; 29 – многократная опорная система; 30 – кронштейн; 31 – гидроцилиндр поворота свода; 32 – гидроцилиндр перемещения каретки 24 вверх; 33 – привалочные плоскости каретки; 34 – кронштейн траверсы; 35 – стопор.

Из назначения и условий работы подины вытекают основные требования к ее футеровке: 1. достаточная огнеупорность; 2. устойчивость против резких колебаний температуры; 3. механическая прочность при высокой температуре против ударов при загрузке шихты (температура подины не менее 1100–1300 К) и против эрозионного износа при воздействии жидкого металла; 4. достаточно большое тепловое сопротивление.

Подина состоит из двух основных слоев: верхнего – рабочего набивного слоя, образующего прочную и плотную чашу для жидкого металла и шлака, и нижнего слоя – кирпичной кладки.

Верхняя часть кирпичной кладки должна обладать высокой огнеупорностью и механической прочностью, чтобы образовать прочное основание для набивного слоя. К нижней части кирпичной кладки, прилегающей к кожуху печи, предъявляются меньшие требования в отношении огнеупорности и механической прочности (более низкая рабочая температура), но от нее требуется более низкая теплопроводность.

Стены. Назначение стен – сформировать свободное пространство как часть рабочего пространства ДСП для размещения загружаемой металлошихты и обеспечения соответствующей схемы направленного теплообмена. Температурные условия тепловой работы футеровки стен значительно тяжелее, чем подины, так как она в период «открытого» горения дуг подвергается непосредственному излучению от них. Скорость изменения температуры внутренней поверхности достигает 30–100 К/мин к концу периода расплавления и даже 150–170 К/мин при скрывании рабочего пространства во время заправки или загрузки металлошихты. В нижних горизонтах стен футеровка подвергается комплексному разрушающему воздействию металла, шлака, печной атмосферы и высоких температур. Разрушение огнеупорной футеровки стен происходит в результате оплавления и стекания расплавленной массы с пониженной огнеупорностью или сколов, вызванных термическими или структурными изменениями.

Из назначения стен и условий их работы вытекают основные требования к их футеровке:

- а) высокая огнеупорность;
- б) высокая термическая устойчивость (термостойкость);
- в) малое тепловое сопротивление.

Последнее условие исключает требование тепловой изоляции, как противоречащее проблеме снижения максимальных температур

на внутренней поверхности футеровки с целью повышения стойкости стен.

В зависимости от величины тепловой мощности ДСП стены могут быть:

1. Футерованы огнеупорной кладкой (на ДСП обычной и повышенной мощности);
2. Выполнены из водоохлаждаемых панелей (на ДСП высокой и сверхвысокой мощности).

Для эксплуатации ДСП сверхвысокой мощности применение водоохлаждаемой футеровки является необходимым условием. На таких печах в результате значительного сокращения длительности плавки, возможно даже уменьшение удельного расхода электроэнергии, несмотря на увеличение мощности тепловых потерь.

Свод. Свод имеет такое же назначение, как и стены, но работает в более тяжелых условиях: более высокие тепловые нагрузки от дуг и от зеркала ванны из-за больших значений локальных и средних угловых коэффициентов; более резкие колебания температуры внутренней поверхности при открывании печи путем поворота свода. Конструкция свода осложняется необходимостью иметь отверстия для электродов (с соответствующей электроизоляцией, если материал свода обладает проводимостью), газоотсоса, кислородной фурмы, топливных горелок и т. д.

В зависимости от величины тепловой мощности ДСП свод может быть:

- 1) кирпичным сферической (купольной) формы на ДСП обычной и повышенной мощности;
- 2) металлическим, плоским, водоохлаждаемым на ДСП высокой и сверхвысокой мощности.

На ДСП высокой и сверхвысокой мощности целесообразно применять металлические водоохлаждаемые своды.

Для уменьшения тепловых потерь рабочую поверхность водоохлаждаемых панелей следует обмазывать огнеупорным бетоном толщиной 50–70 мм. Конструкция водоохлаждаемого металлического свода должна иметь минимальные электрические потери из-за перемагничивания магнитных масс и вихревых токов под влиянием мощных переменных магнитных полей, создаваемых потоками в электродах.

Рабочее окно. Рабочее окно необходимо для обслуживания ДСП во время плавки. Поэтому его размеры должны позволять: ос-

матривать все рабочее пространство, включая центральную часть свода; заправлять всю площадь поверхности подины и нижней части стен; извлекать из печи (при необходимости) обломки графитированных электродов; свободно вводить в печь мульду с необходимыми материалами с помощью завалочной машины. Ширина окна обычно составляет 0,25–0,3 диаметра рабочего пространства ДСП; высота окна в зависимости от принятой высоты расположения свода приблизительно равна 0,8–1,2 ширины окна.

Эркер. Эркер (рисунок 65) служит для выпуска металла из печи. Эркерный выпуск, по сравнению со сливным желобом, позволяет уменьшить угол наклона печи до $\sim 5^\circ$, что в свою очередь сокращает общее время выпуска. Кроме того, эркерный выпуск позволяет практически полностью исключить попадание печного шлака в сталеразливочный ковш.

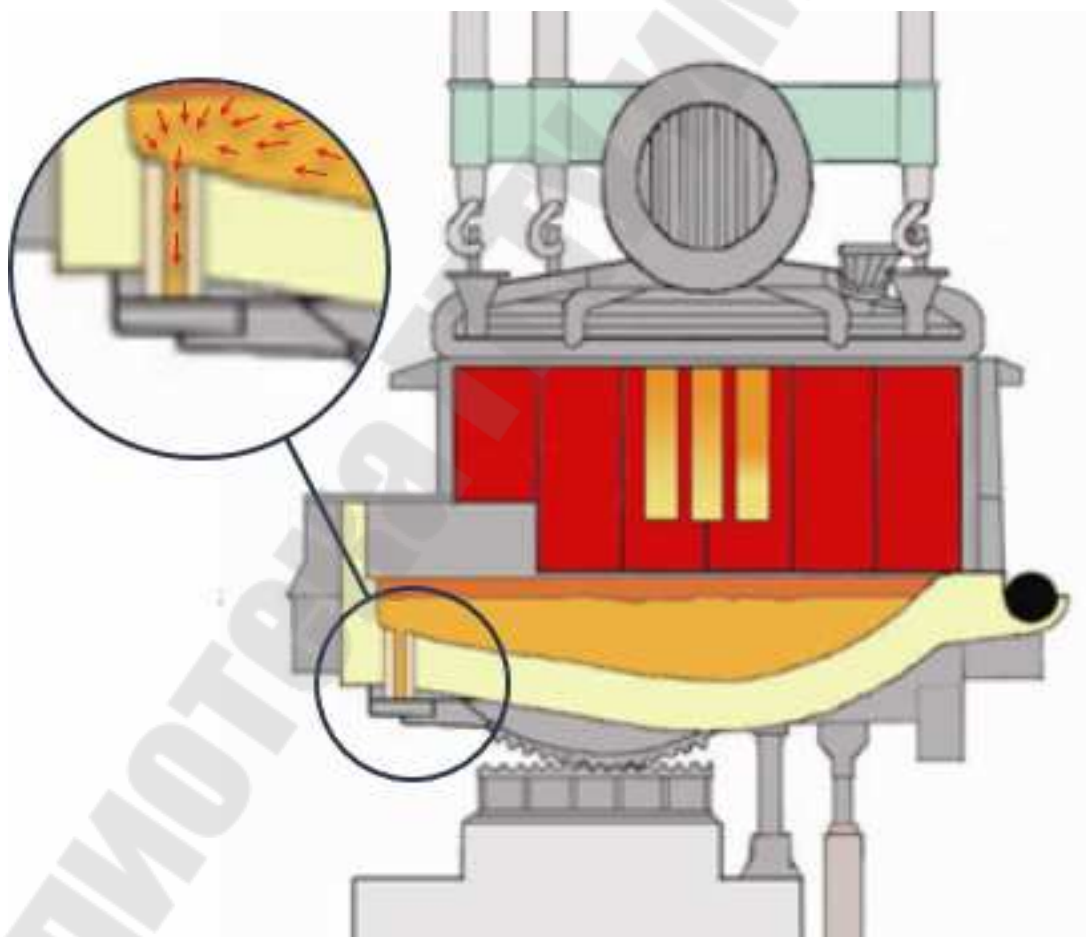


Рис. 65. Схема эркерного выпуска

5.5.3 Определение емкости и расчет геометрических размеров рабочего пространства печи

Определение емкости печи

При заданной годовой производительности емкость печи определяется по формуле 5.1:

$$m_0 = \left[\frac{M_{\Gamma}}{8760 - \tau_{np}} \right] \tau_{nl}, \quad (5.1)$$

где M_{Γ} – годовая производительность ДСП, т;
 τ_{nl} – продолжительность плавки в ДСП, ч (примем $\tau_{nl} = 1$ ч);
 τ_{np} – годовая продолжительность простоев оборудования (примем равным 8% от номинального годового времени работы ДСП).

$$m_0 = \left[\frac{950000}{8760 - 0,08 \cdot 8760} \right] = 117,9 \approx 120 \text{ т.}$$

Расчет геометрических параметров рабочего пространства ДСП

Определение размеров ванны

Для ДСП заданной вместимости необходимый объем металлической ванны определяют по массе жидкого металла:

$$V_M = m_0 / d_{ж}, \quad (5.2)$$

где V_M – объем металлической ванны, м³;
 m_0 – вместимость печи, т ($m_0 = 120$ т);
 $d_{ж}$ – плотность жидкой стали, м³/т ($d_{ж} = 6,9 \text{ т/м}^3$).

$$V_M = 17,4 \text{ м}^3$$

Ванна дуговой сталеплавильной печи имеет сфероконическую форму (рисунок 6б), объем которой состоит из объема усеченного конуса, обращенного бóльшим основанием диаметром вверх, и объема шарового сегмента с диаметром основания, равного диаметру нижнего меньшего основания конической части ванны:

Коническая поверхность ванны образует так называемые «откосы» ванны и характеризуется углом θ между образующей и горизонталью. Учитывая величину угла естественного откоса сухого периклазового порошка, применяемого для заправки подиныпечи, порядка

30...35°. Чтобы во время эксплуатации ДСП подина не «зарастала» примем $\theta = 45^\circ$.

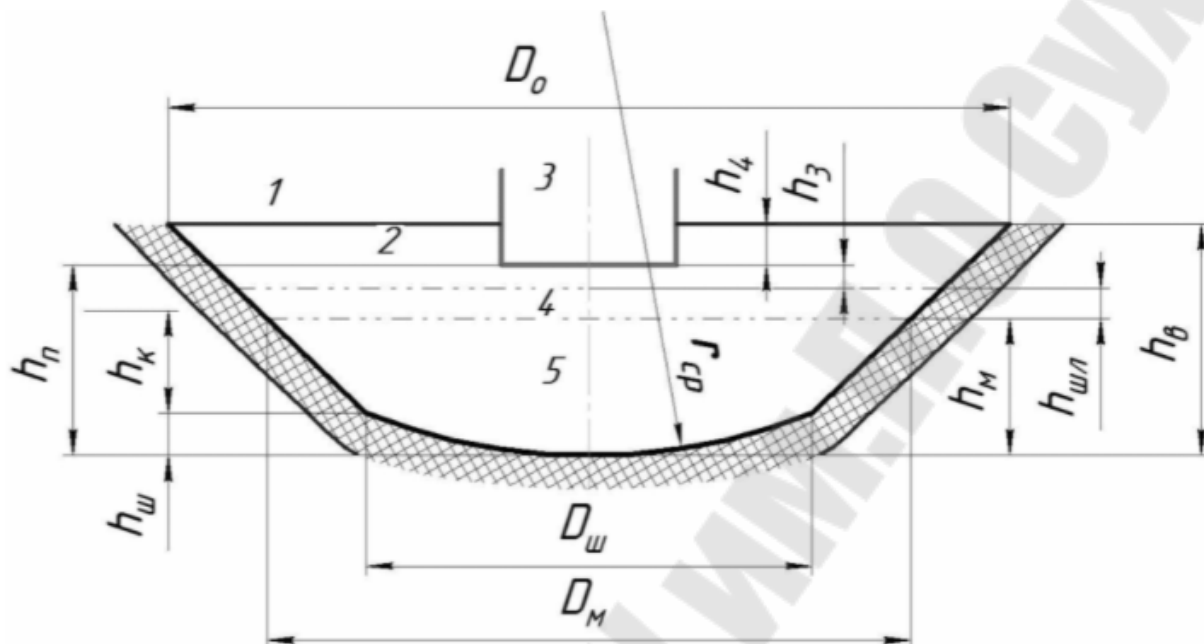


Рис. 66. Форма сфероконической ванны ДСП.

1 - уровень откосов подины; 2 - уровень порога; 3 - рабочее окно; 4 - шлаковая ванна; 5 - металлическая ванна. V_k - объем усеченного конуса, m^3 ; h_k - высота (глубина) усеченного конуса, м; D_m - диаметр основания усеченного конуса, м; $V_{ш}$ - объем шарового сегмента, m^3 ; $h_{ш}$ - высота (глубина) объема шарового сегмента, м; $D_{ш}$ - диаметр основания шарового сегмента, м.

Коэффициент, характеризующий форму металлической ванны ДСП рассчитывается по формуле:

$$K_{\phi} = \sqrt[3]{\frac{24}{\pi \cdot d_{ж} / 3(2 - k_{ш})K^2 - 12 \cdot (1 - k_{ш})K + 4(2 - 3k_{ш} + 2k_{ш}^3)}} \quad (5.3)$$

где $K_{ш} \approx 0,25$

K - соотношение основных геометрических размеров металлической ванны, которое выбирают по теплотехническим и технологическим условиям. Для крупных ДСП с основной футеровкой $K \approx 6$.

$$K_{\phi} = 0,2.$$

С учетом формулы (5.3), глубина металлической ванны определяется:

$$h_M = K_{\phi} \sqrt[3]{m_0} \quad (5.4)$$

где h_M – глубина металлической ванны, м.
 $h_M = 1,2$ м.

Диаметр зеркала металлической ванны:

$$D_M = K h_M \quad (5.5)$$

где D_M – диаметр зеркала металлической ванны, м.
 $D_M = 5,6$ м.

Зная основные размеры ванны, размеры элементов металлической ванны определяются:

$$h_{ш} = k_{ш} \cdot K_{\phi} \sqrt[3]{m_0}; \quad (5.6)$$

$$h_K = h_M - h_{ш} \quad (5.7)$$

$$D_{ш} = D_M - 2h_K \quad (5.8)$$

$$h_{ш} = 0,3 \text{ м}; \quad h_K = 0,9 \text{ м}; \quad D_{ш} = 3,9 \text{ м};$$

Радиус сферы шарового сегмента определяется:

$$R_{сф.} = 0,5 (0,25 D_{ш}^2 + h_{ш}^2) / h_{ш}. \quad (5.9)$$

$$R_{сф.} = 6,5 \text{ м};$$

Объем шлаковой ванны задается в процентах от объема металлической ванны:

$$V_{шл} \approx (0,1 \div 0,15) V_M \quad (5.10)$$

$$V_{\text{шл}} \approx 1,7 \text{ м}^3;$$

Толщину слоя шлака определяют, пренебрегая конусностью шлаковой ванны:

$$h_{\text{шл}} \approx V_{\text{шл}} / (0,25 \pi \cdot D_{\text{м}}^2) \quad (5.11)$$

$$h_{\text{шл}} \approx 0,1 \text{ м};$$

Паспортной характеристикой, т.е. параметром ДСП является глубина ванны от уровня порога рабочего окна:

$$h_{\text{п}} = h_{\text{м}} + h_{\text{шл}} + h_3 \quad (5.12)$$

где h_n - глубина ванны от уровня порога рабочего окна, м;
 h_3 - уровень порога рабочего окна, м (принимают на 20 ÷ 40 мм выше зеркала шлаковой ванны для создания дополнительного объема ванны для “кипения” металла и шлака в окислительный период плавки; $h_3 \approx 0.03$ м.). $h_n = 1.3$ м.

Диаметр ванны на уровне порога рабочего окна:

$$D_{\text{п}} = D_{\text{м}} + 2(h_{\text{шл}} + h_3) \quad (5.13)$$

где D_n - диаметр ванны на уровне порога рабочего окна, м. $D_n = 5,9$ м;

Уровень откосов ванны принимают выше уровня порога рабочего окна на 30÷100 мм во избежание размывания шлаком основания футеровки стен и возможного аварийного выхода жидкого металла:

$$h_4 = (0.1 \div 0.15) h_{\text{п}} \quad (5.14)$$

где h_4 - уровень откосов ванны, м; ($h_4 = 0,15$).

$$h_4 = 0,1 \text{ м.}$$

Суммарная глубина ванны от уровня откосов подины :

$$h_{\text{в}} = h_{\text{м}} + h_{\text{шл}} + h_3 + h_4 = h_{\text{р}} + h_4 \quad (5.15)$$

где $h_{\text{в}}$ - суммарная глубина ванны от уровня откосов подины, м;

$$h_{\text{в}} = 1,4 \text{ м.}$$

Диаметр рабочего пространства на уровне откосов, являющийся паспортной характеристикой ДСП, с учетом формулы 2.5:

$$D_0 = D_m + 2 (h_{шл} + h_3 + h_4) \quad (5.16)$$

где D_0 – диаметр ванны на уровне откосов, м;
 $D_0 = 6,1$ м.

Определение размеров свободного пространства

Высоту «свободного» пространства ДСП как расстояние от уровня откосов ванны до верха стены (или, то же самое, до пят свода) определяют из соотношения:

$$h_{ст} = k_{ст} D_0 = (0,35...0,45) \cdot D_0 \quad (5.17)$$

где $h_{ст}$ – высота свободного пространства, м;
 $k_{ст}$ – коэффициент, принимаемый для крупных ДСП равным 0,35. $h_{ст} = 2,1$ м.

При расчете геометрических размеров рабочего пространства ДСП необходимо проверить возможность загрузки металлошихты с учетом расходного коэффициента:

$$V_{ш} = k_3 \cdot k_p \cdot m_0 / d_{ш}; \quad (5.18)$$

где k_3 - коэффициент, учитывающий технологию загрузки металлошихты, ($k_3 = 1$, при загрузке в один прием;
 $k_3 = 0.6 \div 0.8$, при загрузке в два приема) так как загрузка происходит с подвалкой, то принимаем $k_3 = 0,8$;
 k_p – коэффициент расхода металлошихты, зависящий от химического состава шихты. (Для стали не, примем $k_p = 1,1$).

$d_{ш}$ - насыпная плотность металлошихты; т/м³;

$$V_{ш} = 84 \text{ м}^3$$

$$V_{раб} = V_v + V_{св.пр}; \quad (5.19)$$

где V_v - объем ванны на уровне откосов, м³;
 $V_{св.пр}$ – объем “свободного” пространства, м³.

$$V_B = V_M + \frac{\pi}{12} (h_{\text{шл}} + h_3 + h_4) \cdot (D_M^2 + D_M \cdot D_0 + D_0^2) \quad (5.20)$$

$$V_B = 23,7 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{св.пр}} = \frac{\pi}{12} (h_{\text{ст}} \cdot D_0^2) (h_{\text{ст}} \cdot D_0^2) (h_{\text{ст}} \cdot D_0^2) (h_{\text{ст}} \cdot D_0^2) \quad (5.21)$$

$$V_{\text{св.пр}} = 61,9 \text{ м}^3; V_{\text{раб}} = 86 \text{ м}^3.$$

Высота расположения центральной точки кирпичной секции комбинированного свода с водоохлаждаемыми панелями относительно уровня откосов ванны, где горят дуги, равна:

$$h_{\text{св}} = k_{\text{св}} \cdot D_0 \quad (5.22)$$

где $h_{\text{св}}$ - высота расположения центральной точки комбинированного свода относительно уровня откосов, м;

$k_{\text{св}}$ - коэффициент, удовлетворяющий условию рационального расположения свода по теплотехническим параметрам ($k_{\text{св}} \geq 0,45 \div 0,6$);

$$h_{\text{св}} = 3,042 \text{ м}.$$

Свод ДСП опирается на песчаный затвор корпуса, размер которого характеризует диаметр кожуха.

Выбор мощности трансформатора

Мощность подаваемая в печь:

$$P_n = K_n \cdot S_n \cdot \lambda \cdot \eta_{\text{э}} \quad (5.23)$$

где P_n - мощность печи, МВт

K_n - средний коэффициент использования мощности за энергетический период ($K_n \approx 1$)

λ - коэффициент мощности ($\lambda \approx 0,65$)

$\eta_{\text{э}}$ - электрический к.п.д. ($\eta_{\text{э}} \approx 0,95$)

S_n - номинальное значение полной мощности электропечного трансформатора, МВ·А.

$$P_n = W_{\text{эл.}} \cdot m_{\text{шл}} / = 57 \text{ МВт}$$

$$S_n = P_n / (K_n \cdot \lambda \cdot \eta_{\text{э}}) = 92,3 \sim 95 \text{ МВ} \cdot \text{А}$$

На рисунке 67 представлен чертёж печи, соответствующей ранее проведённым расчётам.

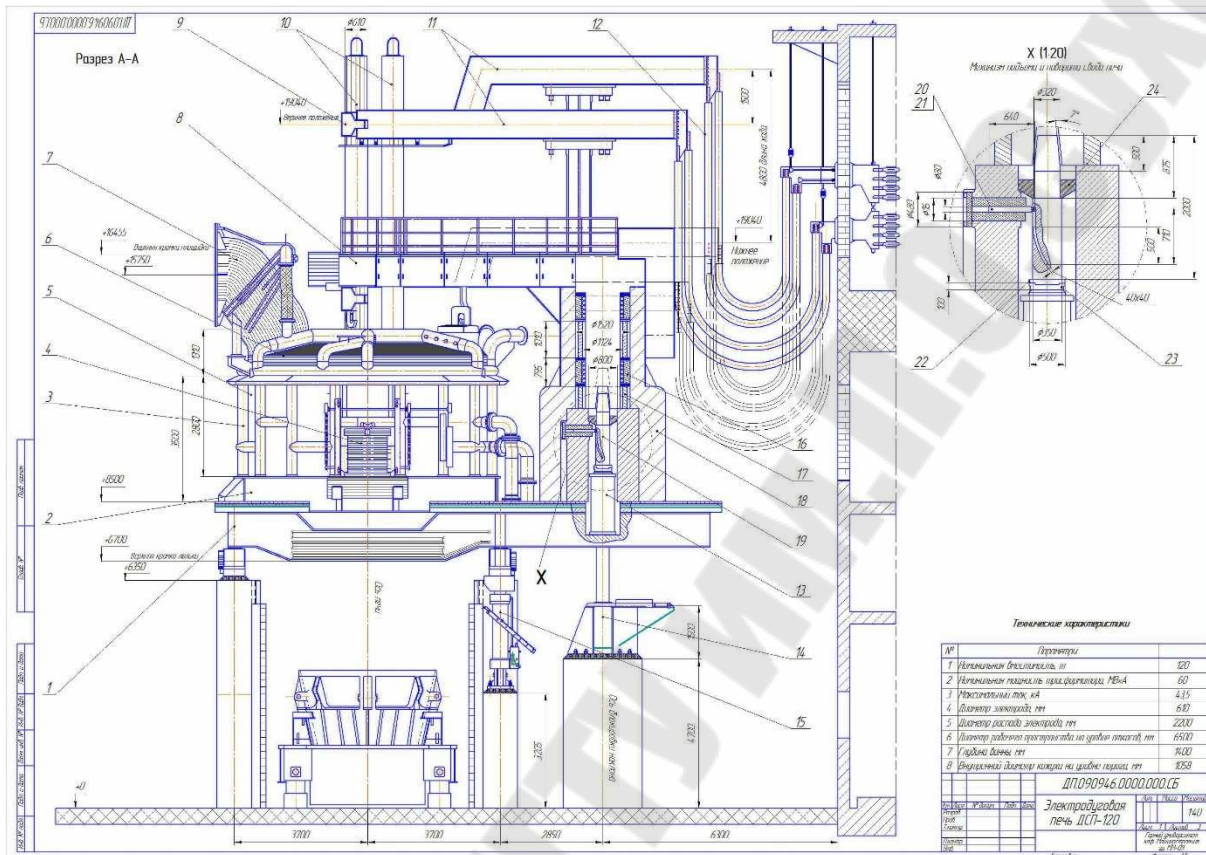


Рис. 67. Чертёж ДСП ёмкостью 120 тонн.

Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров, А.В. Расчёт мощности и параметров электроплавильных печей: учеб. пособие для вузов / А.В. Егоров. – Москва: МИСИС, 2000. – 272 с.
2. Кривандин В.А. Тепловая работа и конструкции печей черной металлургии: учебник для вузов. – Москва: Металлургия, 1989. – 462 с.
3. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов. – Москва: Мир: АСТ, 2003. – 527 с.
4. Теплотехника металлургического производства: учеб. пособие для вузов. Том 2. Конструкции и работа печей / под ред. В.А. Кривандина. – Москва: МИСИС, 2002. – 734 с.
5. Тимофеева, А.С. Теплофизика металлургических процессов: учебное пособие для вузов / А.С. Тимофеева, В.В. Федина; под ред. А.С. Тимофеевой. – 2-е изд. – Старый Оскол: ТНТ, 2018. – 135 с.
6. Электрометаллургия стали и ферросплавов/ Поволоцкий Д.Я., Рошин В.Е., Мальков Н.В. – М.: Металлургия, 1995. – 592 с.
7. Автоматизация металлургических печей [Учебник для студ. вузов, обуч. по спец. "Теплотехника и автоматизация металлург. печей] / под ред. О.М. Блинова. – Москва: Металлургия, 1975. – 376 с
8. Арутюнов В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: учебник для вузов / под науч. ред. В.А. Арутюнова. – Москва: Металлургия, 1990. – 238 с.
9. Багров, О.Н. Испарительное охлаждение печей в цветной металлургии / О.Н. Багров. – Москва: Металлургия, 1979. – 160 с.
10. Байдалов Б.А. Экология и экономика процессов очистки отходящих газов после дуговых электросталеплавильных печей // Литье и металлургия = 2009. – № 2. – С. 225–227.
11. Великин, Б.А. Торкретирование металлургических печей / Б.А. Великин. – Москва: Металлургия, 1972. – 280 с.
12. Воителев, В.В. Механическое оборудование печей: учеб. пособие для вузов / В.В. Воителев, Е.И. Могилевский. – Москва: Металлургия, 1991. – 148 с.
13. Горелочные устройства промышленных печей и топок: (конструкции и технические характеристики): справочник / А.А. Винтовкин [и др.]. – Москва: Интермет Инжиниринг, 1999. – 552 с.

14. Лапшин И.В. Автоматизация дуговых печей. – Москва: МГУ, 2004. – 166 с. Мастрюков Б.С. Теплотехнические расчеты промышленных печей: учебное пособие для техникумов. – Москва: Metallurgy, 1972. – 368 с.
15. Metallurgical heat engineering: учеб. для вузов: в 2 т. / В.А. Кривандин, И.Н. Неведомская, В.В. Кобахидзе и др.; под науч. ред. В.А. Кривандина. – Москва: Metallurgy, 1986. – 590 с.
16. Metallurgical heat engineering: учебник для вузов: в 2 т / В.А. Кривандин, В.А. Арутюнов, Б.С. Мастрюков и др.; под ред. В.А. Кривандина. – Москва: Metallurgy, 1986. – 422 с.
17. Metallurgical heat engineering [Электронный ресурс]: курс лекций по одноименной дисциплине для студентов специальности 1–36 02 01 "Машины и технология литейного производства" дневной и заочной форм обучения / Л.Е. Ровин; Министерство образования Республики Беларусь, Учреждение образования "Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого", Кафедра "Машины и технология литейного производства". – Гомель: ГГТУ, 2010. – 135 с.
18. Metallurgical furnaces: учеб. для вузов: в 2 ч. / А.И. Ващенко, М.А. Глинков, Б.И. Китаев и др.; под науч. ред. М.А. Глинкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Metallurgy, 1964. – 344 с.
19. Metallurgical furnaces: учеб. для вузов: в 2 ч. / Д.В. Будрин, М.А. Глинков, М.В. Канторов и др.; под науч. ред. М.А. Глинкова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Metallurgy, 1963. – 442 с.
20. Соيفер В.М. Огнеупоры для дуговых сталеплавильных печей малой емкости: справочник. – Москва: Metallurgy, 1994. – 192 с.

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Пособие

**для слушателей специальности переподготовки
1-42 01 71 «Металлургическое производство
и материалобработка»
заочной формы обучения**

Составитель Жаранов Виталий Александрович

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 24.01.22.

Рег. № 89Е.

<http://www.gstu.by>