

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

**Кафедра «Металлургические технологии и оборудование»**

**СОВРЕМЕННЫЕ ПЕЧНЫЕ АГРЕГАТЫ**

*Методическая разработка по направлениям подготовки 22.03.02*

*«Металлургия» для студентов всех форм обучения*

Нижний Новгород 2017

Составители: **М.А. Ларин, В.А. Володин, Е.И. Яровая, В.А. Братухин**  
УДК 621.745

**Современные печные агрегаты:** метод. разработка по направлениям подготовки 22.03.02 «Металлургия» для студентов всех форм обучения / НГТУ им. Р. Е. Алексеева; сост.: М.А. Ларин и др. – Н. Новгород, 2017. – 32 с.

Приведены данные о конструктивных и эксплуатационных особенностях современных печных агрегатов. Рассмотрены основные принципы анализа и выбора типа печи для конкретных производственных условий в зависимости от требований к качеству выплавляемого металла, экономических и экологических факторов.

Редактор Э.Б. Абросимова

Подписано в печать 18.09.2017. Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага газетная.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,15 Тираж 100 экз. Заказ

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева.  
Типография НГТУ. 603950, г. Нижний Новгород, ул. К. Минина, 24.

© Нижегородский государственный  
технический университет  
им. Р. Е. Алексеева, 2017

## Содержание

Введение	4
1. Установки типа печь-ковш.....	5
2. Современные печные агрегаты для прямого восстановления железа.....	8
3. Ядерные печные агрегаты в металлургии.....	18
4. Установки электронно-лучевого нагрева.....	20
5. Установки электрошлакового переплава.....	25
6. Вакуумные плавильные печи.....	27
Список литературы.....	32

## Введение

Металлургия — одна из древнейших областей деятельности человека. В глубокой древности была разработана оригинальная технология прямого получения железа. На территории нашей страны еще в 1400 году до нашей эры, как утверждают археологи, уже выплавляли железо так называемым кричным методом. Сначала в горнах при температуре около 1000 градусов (такую температуру можно создать, не применяя современных способов нагрева), восстанавливали железную руду обыкновенным углем, получали так называемую крицу. Затем крицу, своего рода железную губку, многократно проковывали в горячем состоянии. В результате появилось довольно чистое железо, из которого можно было изготовить различные предметы быта и оружие.

Со временем двухступенчатая система восстановления железа углем с последующей ковкой — единственная тогда промышленная схема черной металлургии — прекратила свое существование. Ее заменил доменный процесс, который в сочетании с мартеновским и кислородно-конверторным преобладает в современной металлургии.

Современный металлургический комплекс, являясь базовой отраслью, вносит существенный вклад в экономику России. Высокие цены на металлопродукцию и возможности наращивания ее экспорта обусловили в последние годы значительный вклад металлургии в прирост ВВП и других макроэкономических показателей.

В России достаточно активно идет процесс модернизации существующих производственных мощностей, ориентированных на выпуск качественного продукта. Современная технология приготовления качественных сталей состоит из двух этапов:

1-й этап: получение жидкой стали определенного состава и температуры (кислородный конвертер, дуговая электропечь);

2-й этап: превращение жидкой стали в сталь заданного качества методами ковшевой металлургии, в электроплавильных печах. На этом этапе проводят легирование, модифицирование, раскисление, рафинирование. получение готового качественного продукта.

Ориентация на мировой рынок заставляет изменить принципы формирования процессов обработки черных металлов, а именно:

- сократить неэффективные мощности;
- ориентироваться на импортное оборудование;
- использовать агрегаты типа «печь-ковш», установок вакуумирования.

## **1. Установки типа печь-ковш**

### **1.1. Предпосылки создания**

Промышленные печные агрегаты, применявшиеся ранее в металлургической отрасли, имели как неоспоримые преимущества, так и серьезные недостатки. Так в вагранках невозможно было существенно регулировать химический состав получаемого чугуна по ходу плавки, а тем более очищать его от вредных примесей. В мартеновских печах с основной футеровкой возможно удаление серы и фосфора, но затруднительно применение большого количества и сортамента легирующих элементов. Поэтому использовались комбинации применяемых процессов. Так в доменной печи выплавлялся чугун, затем он переливался в мартеновскую печь, где переделывался в сталь (отсюда название «переделный чугун»), попутно очищаясь при необходимости от вредных примесей. Это вариант дуплекс-процесса. Пример триплекс-процесса - это вагранка (плавка), дуговая печь (очистка от серы и фосфора; нагрев металла до нужной температуры) и третья стадия процесса – перелив металла из разных печей или от различных плавов одной печи в миксер, где металл усреднялся по химическому составу и отбирался по мере надобности на разливку. Стремясь повысить производительность печных плавильных агрегатов, все больше технологических операций переносили на стадию выпуска металла или в ковш, что привело к созданию ковшевой металлургии. Сера активно удалялась при перемешивании со шлаком во время выпуска металла, в это же время на струю расплава вводились основные легирующие компоненты - ферромарганец и ферросилиций, где они и растворялись. При введении легирующих компонентов заранее в печь большая их часть выгорает. Вышеуказанные мероприятия связаны с поглощением тепла, возникла необходимость дополнительного нагрева в ковше – так появились первые прототипы установок типа печь-ковш.

Возможность получения стали с гарантированно низким содержанием вредных примесей обеспечивает условия для роста многих отраслей промышленного производства без увеличения количества выплавляемой стали. Это явилось причиной новой ситуации в экономике, а именно масштабы выплавки стали уже не характеризуют промышленную мощь, главным становится высокое качество, чистота металла и уверенность потребителя в надежности металлопродукции.

Несмотря на многоплановость задач, стоящих при решении проблемы повышения качества металла методами вторичной металлургии, используемые при этом технологические приемы немногочисленны и, по существу, сводятся к интенсификации следующих процессов:

#### **1. Взаимодействия металла с жидким шлаком или твердыми шлако-**

образующими материалами (интенсивное перемешивание, специальной мешалкой, продувкой газом, вдуванием твердых шлакообразующих материалов непосредственно в массу металла, электромагнитное перемешивание и т.п.).

2. Газовыделения (обработка металла вакуумом или продувка инертным газом).

3. Взаимодействия с вводимыми в ванну материалами для раскисления и легирования (подбор комплексных раскислителей оптимального состава; введение раскислителей в глубь металла в виде порошков, блоков, специальной проволоки; с использованием патронов, выстреливаемых в глубь металла; искусственное перемешивание для улучшения условий удаления продуктов раскисления и т.д.; организация тем или иным способом перемешивания ванны, интенсификация процессов массопереноса — обязательное условие эффективности процесса).

В мировой практике получил широкое распространение процесс, названный процессом ковш - печь (в зарубежной литературе процесс получил название LF-процесс (Ladle — ковш. Furnace — печь)). Процесс включает перемешивание продувкой металла в ковше, дуговой подогрев и обработку металла синтетическим шлаком в процессе его перемешивания аргоном; обеспечивает не только получение заданного химического состава и температуры металла, но и снижение количества неметаллических включений в результате удаления серы и кислорода, что приводит к значительному улучшению механических свойств. Такой агрегат может устанавливаться в любом сталеплавильном цехе.

## **1.2. Устройство агрегата печь-ковш**

Типичная конструкция установки LF (печь-ковш) показана на рис. 1. В ковше на сталь наводится рафинирующий шлак, затем в него сверху опускают электроды системы электродугового нагрева таким образом, чтобы обеспечить достаточную эффективную теплопередачу и одновременно защитить огнеупоры ковша от дуги. При этом остаточные оксиды железа в шлаке восстанавливаются графитовыми электродами. В результате получают «ультрачистую» сталь с низким содержанием серы [1].

На рис. 2 показан вариант установки типа печь-ковш, предусматривающий возможность перемешивания металла аргоном под слоем синтетического шлака, вдувание порошкообразных реагентов и подогрев расплава одновременно.

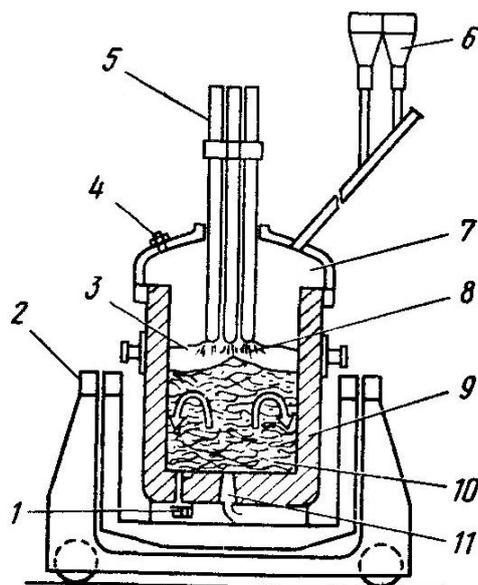


Рис. 1. Схема установки типа печь-ковш: 1 - шиберный затвор; 2 - тележка; 3 - основной шлак; 4 - смотровое окно; 5 - электроды; 6 - бункеры для хранения легирующих добавок; 7 - инертная атмосфера внутри печи; 8 - нагрев погруженной дугой; 9 - жидкая сталь; 10 - перемешивание инертным газом; 11 - пористая пробка

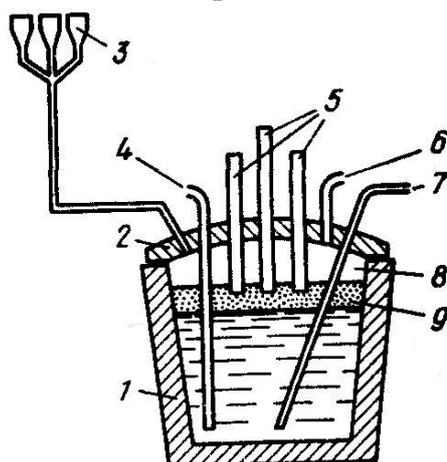


Рис. 2. Схема установки АР (Arc-Process): 1 - ковш; 2 - крышка-свод; 3 -бункера для ферросплавов и флюсов; 4 - фурма для подачи в металл аргона или азота; 5 - электроды; 6 - подача аргона; 7 - фурма для вдувания порошка силикокальция в струе аргона; 8 - безокислительная атмосфера; 9 -шлак ( $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ )

Примером комбинированного процесса с обработкой металла вакуумом, продувкой аргоном и синтетическими шлаковыми смесями может служить VAD – процесс [2]. Схема установки представлена на рис. 3.

Агрегат состоит из камеры, установленной на самодвижущейся тележке, и вакуумного трубопровода в стационарном своде (а не в корпусе камеры). Порядок проведения операций для комбинированного процесса следующий: 1) помещение ковша в VAD-камеру и продувка аргоном в течение 3 мин (без вакуума); 2) отбор пробы металла на химический анализ и перемещение камеры с ковшом на участок скачивания шлака (содержащего  $\text{FeO}$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$ ); перемещение камеры с ковшом к VAD-устройству,

накрывание сводом и вакуумирование с подогревом (или без подогрева); подогрев осуществляется при помощи электродов, опускаемых через свод; 3) одновременно с вакуумированием наводится присадкой  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaF}_2$  и алюминия новый шлак и продолжается продувка аргоном; 4) после 20 - 25 мин такой обработки под вакуумом производится корректировка химического состава и температуры (электроподогревом); 5) после получения требуемых результатов вакуумирование прекращается, и камера с ковшем транспортируется на разливочную площадку.

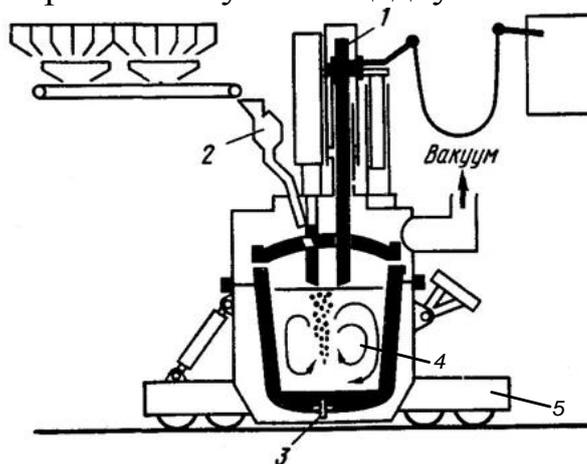


Рис. 3. Схема VAD-процесса: 1 - электроды; 2 - бункер с вакуумным затвором для ввода добавок; 3 - пористая пробка для подачи инертного газа; 4 – металл; 5 - тележка

Помимо установок LF с дуговым подогревом, разработаны установки с использованием методов индукционного нагрева (и перемешивания).

Все современные установки снабжены системой АСУ ТП.

Обработка жидкого металла в печи - ковше значительно улучшает качество металла, слитка или литой заготовки для всех сталеплавильных процессов — от скрап-процесса до конвертерного. Согласно [3], наиболее эффективным является применение печи - ковша в электро- сталеплавильном и мартеновском скрап-процессах. В электросталеплавильном процессе (дуговая электропечь) производительность агрегата может быть увеличена до двух раз, а энергоемкость повышается примерно на 10 %. В мартеновском скрап-процессе производительность повышается на 20 %, а энергоемкость снижается примерно на 30 %.

## **2. Современное печные агрегаты для прямого восстановления железа**

### **2.1. Общая характеристика процессов прямого восстановления железа**

Главными недостатками общепринятой схемы производства стали являются: двухстадийность процесса (руда - чугун - сталь), необходимость

специальной подготовки шихты для доменной печи (измельчение, обогащение и окускование руды, получение кокса), дефицит и высокая стоимость коксующихся углей, загрязнение стали серой из кокса, вредные экологические выбросы коксохимзаводов, аглофабрик и доменных печей. Поэтому металлургами многих стран неоднократно предпринимались попытки устранить частично или полностью указанные недостатки. Разработки, направленные на изменение и усовершенствование классической схемы производства стали, можно разделить условно на две группы: 1) разработки по созданию методов прямого восстановления железа из руды; 2) разработки, направленные на получение из руды чугуна без использования кокса, аглофабрик и доменных печей [4, 5].

Под процессами прямого восстановления железа понимают такие процессы, которые дают возможность получать непосредственно из руды металлическое железо, минуя доменную печь. Способы прямого получения железа позволяют вести процесс, не расходуя металлургический кокс, заменяя его другими видами топлива.

Известно, что использование железа прямого восстановления при выплавке стали (в основном, в электродуговых печах) позволяет производить наиболее высококачественный, экономически выгодный (с относительно низкой энергоемкостью) и экологически чистый металл без примесей серы и фосфора, пригодный для удовлетворения самых высоких требований таких отраслей-потребителей, как машиностроение (авиа-, судостроение и т. д.). В настоящее время предложено более 20 различных способов прямого получения железа.

Железо прямого восстановления (или губчатое железо) в основном производят в виде металлизированных окатышей: холодных CDRI (Cool Direct Reduced Iron) или горячих HDRI (Hot Direct Reduced Iron), а также горячебрикетированного железа HBI (Hot Briquetted Iron). Окатыши CDRI получают в основном в шахтных печах с охлаждением в нижней части печи до 50° С, после чего отправляются на склад, а затем загружаются в электропечь. Окатыши HDRI выгружаются из установки прямого восстановления в горячем состоянии и загружаются в расположенную рядом электропечь при температуре 600° С и выше.

Горячебрикетированное железо HBI получается путем прессования брикетов размерами 30×50×110 мм в формы в виде подушек из металлизированного продукта, который выгружается из печи при температуре около 700 °С.

Наибольшее распространение получили технологии компании Midrex (США). Процесс протекает в шахтной печи, в верхнюю часть которой подаются окатыши или кусковая руда. Установки Midrex действуют на многих предприятиях крупнейшей металлургической компании

ArcelorMittal, расположенных в Германии, Канаде, Мексике, Тринидаде и Тобаго и ЮАР.

Второй по распространенности технологией прямого восстановления железа является HYL/Energiron. Процесс HYL был разработан мексиканской компанией Тепова для прямого восстановления железной руды (кусковой или окатышей) в металлическое железо с помощью восстановительного газа в реакторе с подвижным слоем.

Менее известна технология Finmet, которая позволяет использовать железорудную мелочь без предварительного окускования в процессе газового восстановления в кипящем (псевдосжиженном) слое. По этой технологии пока действует только одно предприятие — Orinoco Iron в Венесуэле.

Для получения железа прямого восстановления также применяется целый ряд угольных технологий — SL/RN, Jindal, DRC, SII, Tisco, Codir и др. В основном все они действуют на базе печей с вращающимся подом с использованием угля или пылеугольной смеси.

Такие предприятия работают в Индии, а также в ЮАР, Китае, Перу и в некоторых других странах. Хотя экологичность таких производств и качество получаемого металла существенно ниже, чем у «газовых» предприятий, однако они дешевле, что и обеспечивает им значительную долю в структуре мирового производства DRI.

Существуют также жидкофазные способы прямого восстановления и альтернативные доменной печи установки для получения чугуна.

Структура производства железа прямого восстановления в мире в последние годы приведена на рис. 4.

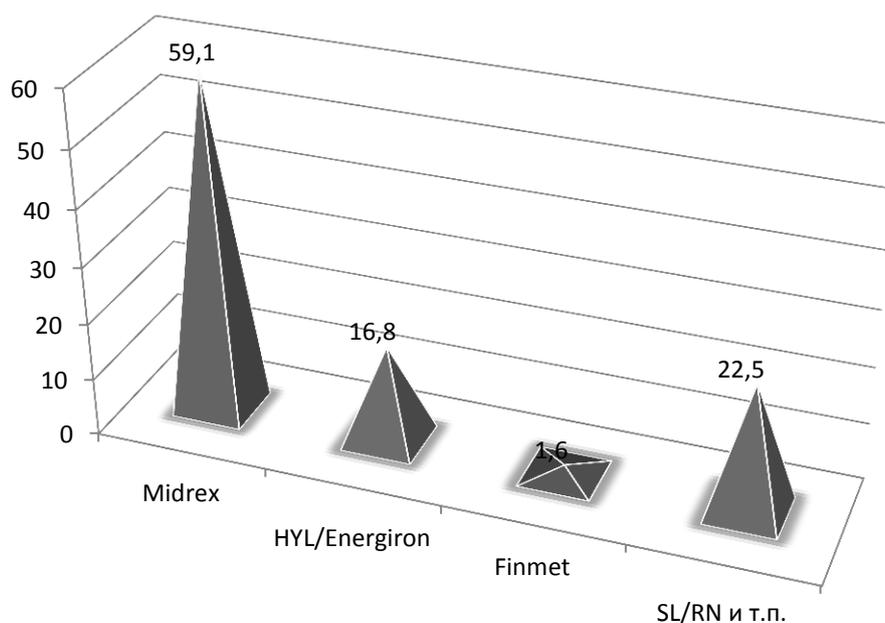


Рис. 4. Доля способов производства железа прямого восстановления в мире

## 2.2. Производство железа в шахтных печах (технология Midrex)

В шахтных печах получают губчатое железо газообразными восстановителями в толстом слое железосодержащих окатышей. Схема производства различных видов железа прямого восстановления с использованием шахтной печи приведена на рис. 5.

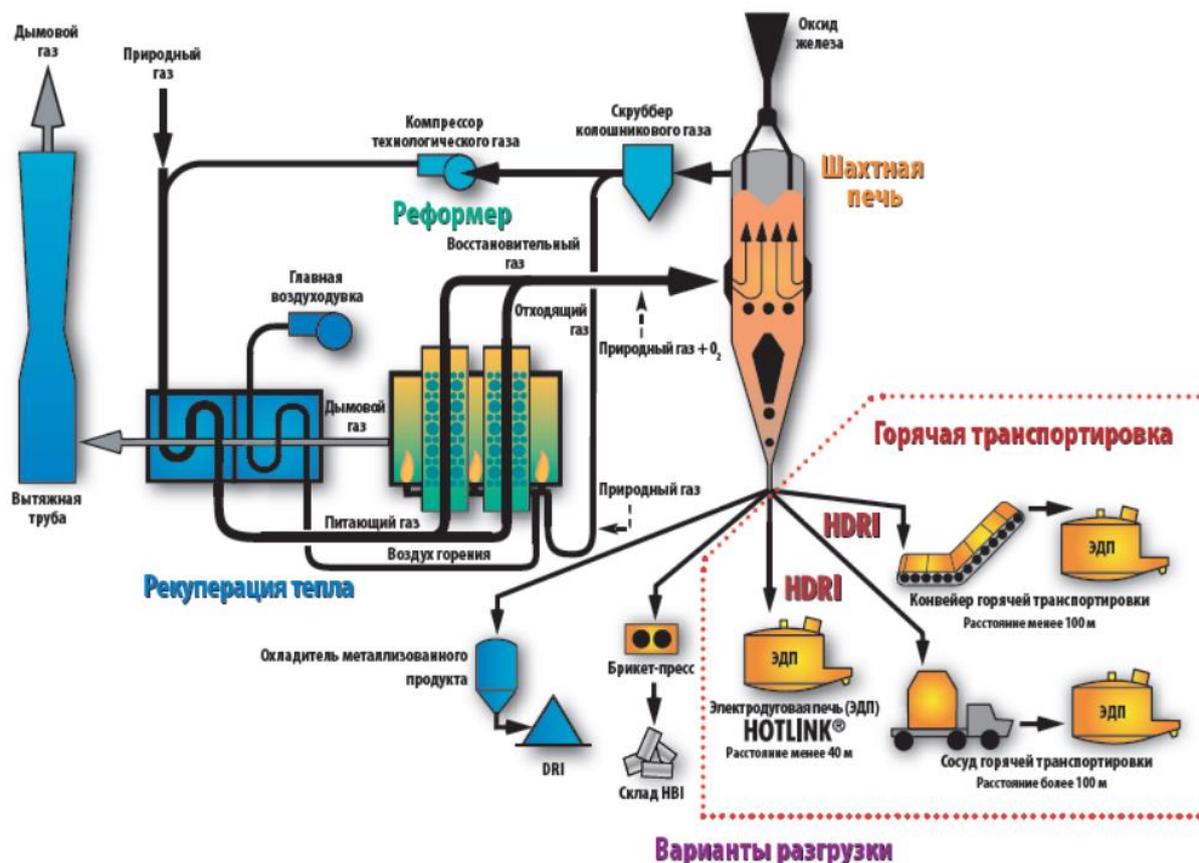


Рис. 5. Технологическая схема производства железа прямого восстановления в шахтных печах

Процесс производства железа осуществляют в противотоке железорудных материалов, загружаемых в агрегат сверху, и нагретых восстановительных газов, подаваемых снизу. Работа агрегата в противотоке дает возможность достигать высокой производительности при хорошем использовании газа.

В качестве восстановителей применяют конвертированный природный газ, состоящий в основном из водорода ( $H_2$ ) и оксида углерода ( $CO$ ). Восстановительный газ получают в кислородном реакторе (реформере), путем неполного сжигания природного газа в кислороде. Полученный газ, содержащий 29%  $CO$ , 55%  $H_2$  и 13% окислителей ( $H_2O$  и  $CO_2$ ), освобождают частично от окислителей, затем нагревают, до температуры 1100 - 1150 °С и через фурмы подают в печь.

Добытую руду обогащают и получают окатыши. Окатыши из бункера загружают в шахтную печь, работающую по принципу противотока. Для вос-

становления железа из окатышей в среднюю часть печи по трубопроводу подают конвертированный природный газ. В восстановительной зоне печи создается температура 1000 - 1100 °С, при которой  $H_2$  и  $CO$  восстанавливают железную руду в окатышах до твёрдого губчатого железа. Содержание железа в окатышах достигает 90 – 95 %. Для охлаждения железных окатышей, снизу печи в зону охлаждения подают воздух. Охлаждённые окатыши выдаются на конвейер и поступают на выплавку стали в электропечах. Если производятся горячие окатыши или горячебрикетированное железо, то охлаждение восстановленного железа в нижней зоне печи не производится.

### 2.3. Производство железа в периодически действующих ретортах (технология HYL/Energiron)

Еще одним способом производства железа прямого восстановления является процесс, протекающий в периодически действующих ретортах, используемых в качестве агрегатов восстановления. На установке расположено четыре реторты (рис. 6). Емкость каждой реторты 100 - 150 т.

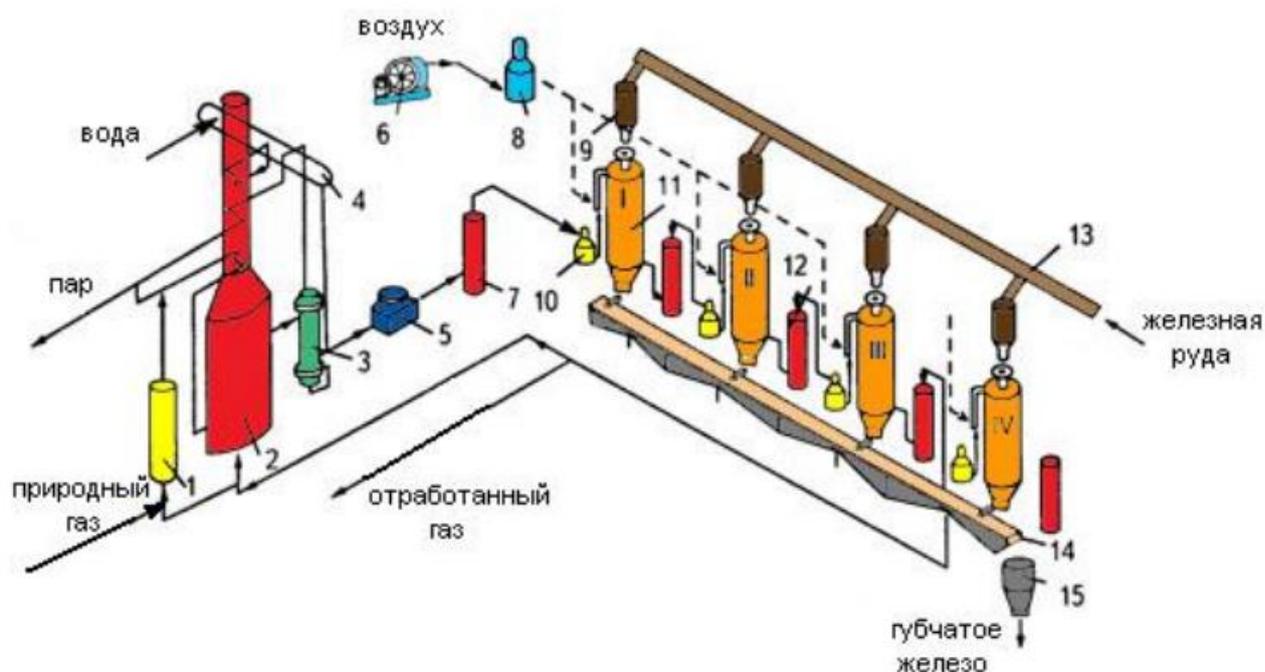


Рис. 6. Схема установки HYL: 1 – десульфуратор природного газа; 2 – установка конверсии; 3 – котел-утилизатор; 4 – барабан для производства пара; 5 – воздушный охладитель; 6 – воздуходувка; 7 – скруббер; 8 – воздухонагреватель; 9 – загрузочный бункер; 10 – нагреватель газа; 11 – реторты (I – IV); 12 – скруббер; 13 – конвейер подачи руды; 14 – конвейер уборки губчатого железа; 15 – сборный бункер губчатого железа

Реторты переставляются с одной позиции на другую, что обуславливает циклический характер процесса, состоящего из последовательных операций загрузки, нагрева и восстановления шихты, охлаждения и выгрузки губчатого железа. Реторты загружают и подают газ сверху. В каче-

стве сырья используют чистые руды, содержащие не менее 60 % железа, крупностью 12 - 50 мм.

Восстановление ведется в неподвижном слое кусковой руды или окатышей при избыточном давлении 0,35 - 0,4 МПа и температуре 870 – 1040 °С. Нагрев руды и компенсацию тепловых потерь процесса осуществляют за счет физического тепла восстановительного газа, который нагревают до 980 - 1240 °С. При выдержке 4 - 6 часов средняя степень металлизации железа составляет 85 %. Выгрузку губчатого железа производят снизу с помощью специальных скребков. Губчатое железо поступает на конвейер транспортирующий губку в сталеплавильное отделение. На рис. 7 показана схема стационарной реторты со съемной крышкой и откидным днищем.

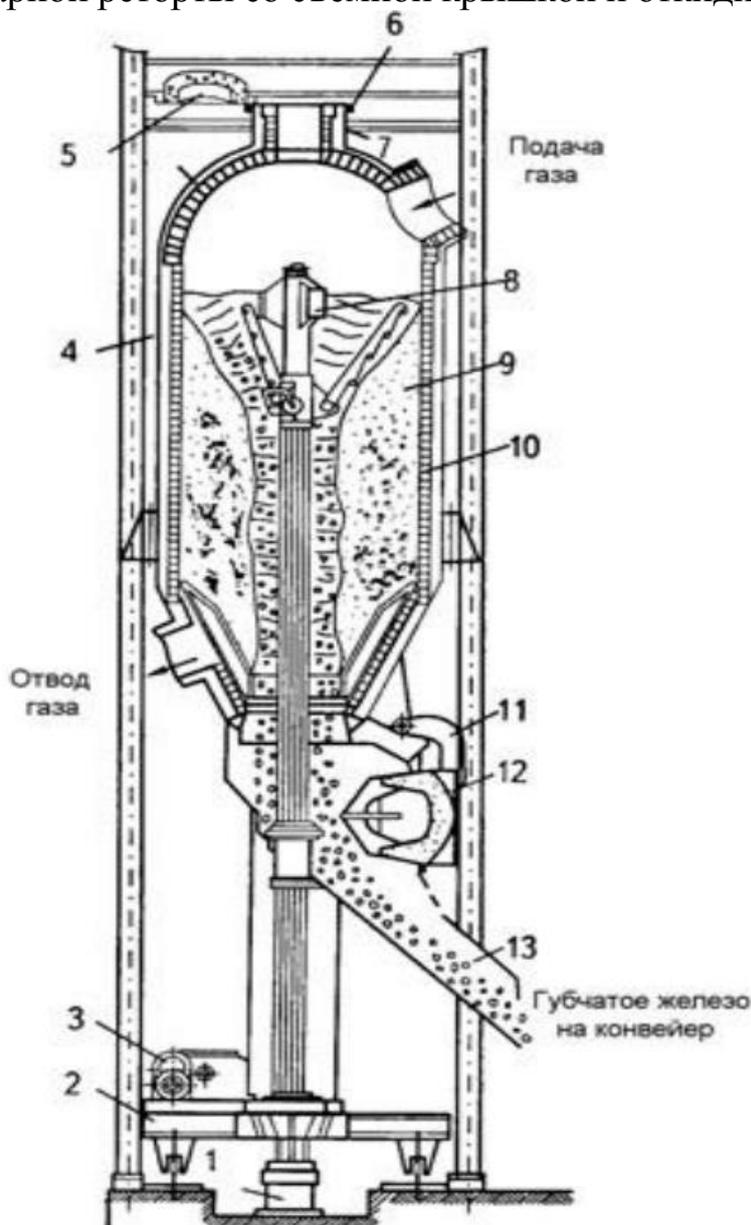


Рис. 7. Конструкция реторты: 1 – гидравлический цилиндр; 2 – тележка; 3 – привод; 4 – кожух; 5 – крышка; 6 – загрузочная горловина; 7 – площадка для обслуживания; 8 – резец с рычагом для удаления губчатого железа; 9 – губчатое железо; 10 – футеровка; 11 – механизм управления откидным днищем; 12 – откидное днище; 13 – разгрузочный желоб

В каждой из четырех реторт протекают различные процессы. В одной реторте происходит предварительный нагрев и восстановление шихты газом, выходящим из других реторт. В двух ретортах происходит довосстановление железа подогретым газом, получаемым в конверсионной установке. В четвертой происходит науглероживание губчатого железа. Готовое железо поступает на конвейер, а в освобожденную реторту загружают исходную шихту.

К недостаткам метода относят: периодичность процесса; неравномерность металлизации по высоте; низкая степень металлизации в сравнении с процессами, осуществляемыми в шахтных печах.

#### 2.4. Производство железа на движущейся колосниковой решетке

Процесс получения железа на движущейся колосниковой решетке (рис. 8) напоминает работу агломерационной машины. В этом случае конвертируемый газ проходит сверху вниз через слой шихты.

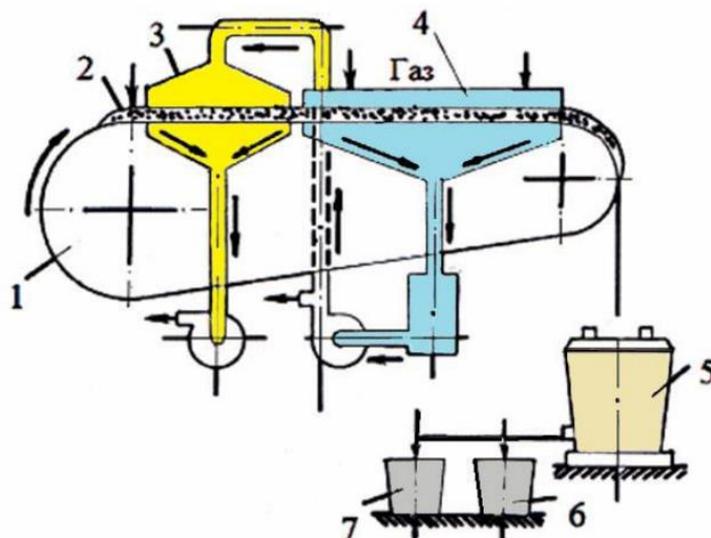


Рис. 8. Схема процесса получения железа на движущейся колосниковой решётке: 1 – обжиговая конвейерная машина, 2 – шихта, 3 – зона сушки, 4 – зона обжига и восстановления, 5 – электропечь, 6 – ковш для жидкого металла, 7 – ковш для шлака

Существует разновидность процесса получения железа на движущейся колосниковой решетке, когда вместо конвертированного газа используют твердый восстановитель (каменный уголь, кокс и т.д.).

В этом случае сырые окатыши в головной части установки сушат рециркулируемыми газами, после чего окатыши поступают в зону обжига, где в результате просасывания горячих газов происходит нагрев и восстановление оксидов железа. Основным преимуществом этого процесса является возможность подавать в установку для восстановления неупрочненные обжигом окатыши. Недостатком этого процесса является загрязнение губчатого железа пустой породой, серой и фосфором твердого топлива.

## 2.5. Производство железа во вращающихся трубчатых печах

Другой разновидностью процесса с использованием твердого восстановителя является способ получения железа во вращающихся трубчатых печах (рис. 9).

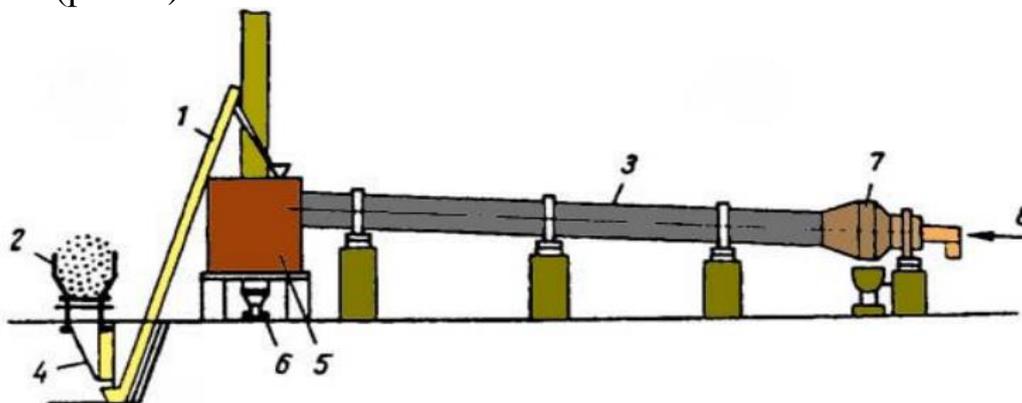


Рис. 9. Схема установки с применением трубчатых вращающихся печей: 1 – элеватор; 2 – исходная шихта; 3 – вращающаяся печь; 4 – вибропитатель; 5 – пылеуловитель; 6 – уборка пыли; 7 – зона горения топлива и плавления материалов; 8 – горелка

По этому способу во вращающуюся трубчатую печь, установленную под небольшим углом к горизонту, загружается шихта, состоящая из руды, твердого топлива и доломита или известняка. Доломит и известняк используются для десульфурации. Печь отапливается газообразным или жидким топливом при помощи горелок, установленных на разгрузочном конце печи.

По мере продвижения шихты от загрузочного конца печи к разгрузочному, навстречу газообразным продуктам горения, происходит восстановление оксидов железа. Восстановление протекает в основном через газовую фазу при участии твердого углерода. На разгрузочном конце печи восстановленный материал для предупреждения окисления охлаждается в специальном вращающемся охладителе и после дробления и последующего магнитного обогащения используется в сталеплавильном производстве.

## 2.6. Производство железа в реакторах кипящего слоя

В основу этого способа положен эффект «кипящего слоя», при котором создаются условия для хорошего контакта мелких железорудных материалов с газообразным восстановителем. Для создания «кипящего слоя» под горизонтальную решетку реактора, на которую загружают исходный железорудный материал, подается горячий восстановительный газ с определенной скоростью, слой материала приобретает свойства кипящей жидкости.

Чтобы предотвратить спекание восстановленного железа, процесс ведется при низкой температуре (около 500 °С). Железо, полученное при этой температуре, характеризуется повышенной пирофорностью (самовозгораемостью на воздухе). Для предотвращения пирофорности полу-

ченное железо нагревают до 820 - 880 °С с последующим охлаждением в восстановительной или нейтральной атмосфере.

## 2.7. Агрегаты FASTMET и ITmk3

В данных агрегатах осуществляется получение железа из руды и не-косоугощегося угля. В агрегатах FASTMET также могут утилизироваться побочные продукты (пыли и шламы), содержащие железо, которые образуются на заводах с полным металлургическим циклом. Развитие этой технологии привело к созданию в 1996 г. процесса ITmk3 производства «передельного чугуна высшего качества» из окатышей или брикетов, схема процессов приведена на рис. 10.

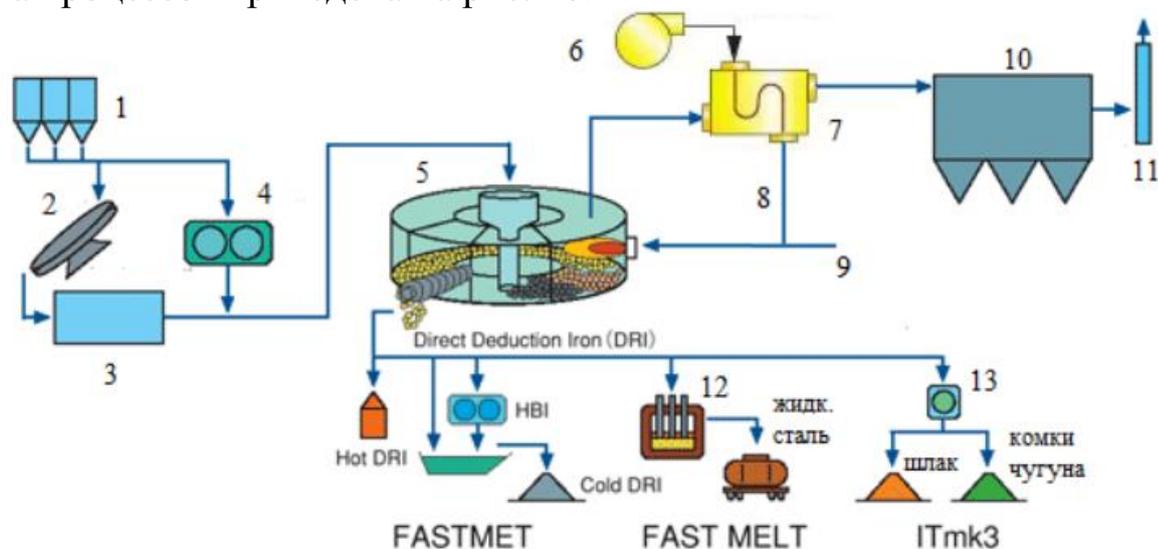


Рис. 10. Схема процессов FASTMET, FAST MELT и ITmk3: 1-бункера с компонентами шихты; 2 — окомкование; 3 — сушка; 4 — брикетирование; 5 — печь с вращающимся подом; 6 — компрессор; 7 — регенератор; 8 — воздух для горелки; 9 — топливо для горелки; 10 — газочистка; 11 — дымовая труба; 12 — электросталеплавильная печь; 13 — сепаратор

Из мелкой железной руды после ее смешивания с углем получают гранулы, которые высушивают и загружают в печь с вращающимся подом. Процесс по существу выполняется на большом поворотном столе, который вращается в пределах тороидального огражденного пространства.

Гранулы из шихты загружаются на вращающийся под печи одним или двумя слоями и во время вращения нагреваются горелками, расположенными над слоем, где также происходит дожигание оксида углерода и летучих угля, выделяющихся при нагреве и восстановлении оксидов. Один оборот вращающейся печи осуществляется за 10 мин.

В случае процесса FASTMET продукцией является губчатое железо, FASTMELT — жидкая сталь, а в процессе ITmk3 данные комки плавятся в последней зоне этого пода, тем самым получают гранулы чугуна и шлак. Конечным этапом является разделение чугунных комков и шлака.

## 2.8. Химико-термический способ получения железа

Данный метод применяется для получения очень чистого железа из труднообогатимого рудного сырья, содержащего большое количество вредных примесей. Он может быть использован также для получения легированной железной губки из комплексных руд.

Схема технологического процесса получения железа по этому методу включает следующие операции (рис. 11).

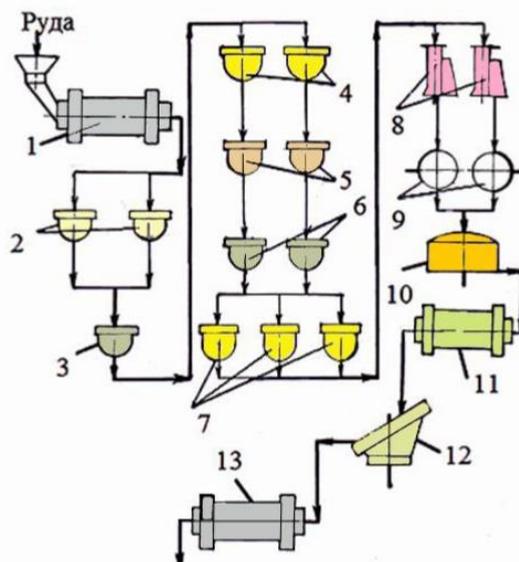


Рис. 11. Схема технологического процесса прямого получения железа химико-термическим способом: 1 – печь восстановительного обжига; 2 – реакторы растворения; 3, 5 – промежуточные ёмкости; 4 – фильтры; 6 – выпарные аппараты; 7 – кристаллизаторы; 8 – центрифуга; 9 – вакуум-сушилка; 10 – печь сушки хлоридов; 11 – печь окисления хлоридов; 12 – гранулятор; 13 – печь восстановления хлоридов

Усредненная на рудном дворе руда поступает в дробильное отделение, а затем - в печь обжига. Для ускорения процесса обжиг руды проводится с использованием твердого восстановителя. Для этого приёмные бункеры мельниц оборудуются дозаторами для приготовления шихты, состоящей из руды и твердого восстановителя.

Подготовленная шихта поставляется в печь для восстановительного обжига. Обжиг проводится при температуре 900 - 1000 °С. После обжига руда поступает в реакторы растворения руды, заполненные соляной кислотой. Начальная стадия растворения происходит очень бурно и сопровождается выделением водорода. По мере снижения концентрации кислоты и сокращения поверхности твердой фазы скорость реакции растворения падает. Для ускорения процесса на конечном этапе реакционный объём подогревается паром с температурой 80 - 90 °С, подаваемом в паровые рубашки реакторов.

Выделяющийся при растворении водород после очистки направляется в печь восстановления хлоридов, где используется как газообразный

восстановитель. Пары соляной кислоты, сконденсировавшиеся в процессе растворения, поступают в систему сбора кислоты, откуда направляются в реактор растворения.

Полученная в результате растворения пульпа подаётся в фильтры для отделения раствора от нерастворимого остатка. Отфильтрованный раствор поступает в выпарные аппараты, где проводится выпаривание до насыщения по хлористому железу. Далее раствор направляется в кристаллизаторы, из которых смесь кристаллов и раствора подается на центрифуги. Из центрифуг кристаллы направляются в печь сушки и затем в печь восстановления хлоридов, отапливаемую природным газом.

Для восстановления хлоридов используется водород. Температура восстановления составляет 600 - 700 °С. В результате, после восстановления, образуется химически чистое железо.

Отходящий из печей газ, содержащий водород и пары воды, подвергается осушке, очистке и используется как восстановитель при восстановлении хлоридов. Кислота, образующаяся в результате охлаждения и очистки отходящих газов, поступает в систему сбора соляной кислоты, откуда направляется в реакторы растворения руды.

Таким образом, процесс построен максимально рационально, поскольку обеспечивается рециркуляция всех реагентов, участвующих в процессе.

### **3. Ядерные печные агрегаты в металлургии**

Черная металлургия является крупнейшим потребителем топлива. В связи с тем, что запасы органического топлива ограничены, усложняется его добыча, повышается стоимость, увеличивается дефицит коксующихся углей, большое внимание уделяется исследованию перспектив использования в черной металлургии тепла ядерных реакторов. Новый источник энергии, заложенный в ядрах атомов урана и плутония, по своим энергетическим возможностям превосходит все ранее найденные и используемые виды энергии. Одним из преимуществ ядерной энергии является концентрация ее в очень малом объеме. Соотношение масс угля и урана, необходимых для выработки одинакового количества энергии, составляет 24000:1.

Основными перспективными направлениями использования тепла высокотемпературных атомных реакторов являются: производство и нагрев восстановительных газов, газификация угля, получение водорода из воды с последующим использованием его для восстановления железа. Большое внимание уделяется вопросам создания атомных энергометаллургических комплексов.

Как показывают расчеты, преобразование тепловой энергии в электрическую, а затем снова в тепловую в металлургическом производстве приводит к потере 60 - 70% первичной энергии. Этим оправдано стремление к непосредственному использованию выделяемой в атомном реакторе

энергии в ее первичном виде. Препятствием служит то, что в реакторе с газовым охлаждением температура охладителя  $500 - 750^{\circ}\text{C}$ , что ограничивает его применение в металлургии. Для восстановления железа температура газа должна быть не ниже  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Современная технология получения черных металлов требует достаточно высоких температур: выплавка чугуна –  $1600^{\circ}\text{C}$ , нагрев –  $1400^{\circ}\text{C}$ , термическая обработка проката –  $1250^{\circ}\text{C}$ .

Напрямую воспользоваться атомными реакторами в настоящий момент невозможно, так как подобные температуры наблюдаются лишь внутри активной зоны. Применение атомной энергии требует принципиального изменения всей технологии черной металлургии.

Есть классический путь использования атомной энергии – преобразовать ее в электрическую, но генеральный путь развития черной металлургии на базе атомной энергии другой. Необходимо коренное изменение технологии, что, прежде всего, означает переход к прямому восстановлению железа.

В настоящий момент существуют три принципиально отличающихся друг от друга вида технологических процессов такого рода с участием атомной энергии.

Первый — высокотемпературное восстановление. Процесс требует  $1600^{\circ}\text{C}$ . Так как атомные реакторы такой температуры дать не могут, главным агрегатом служит струйно-плазменный реактор, использующий для генерации плазмы - ядерную энергию (рис. 12).

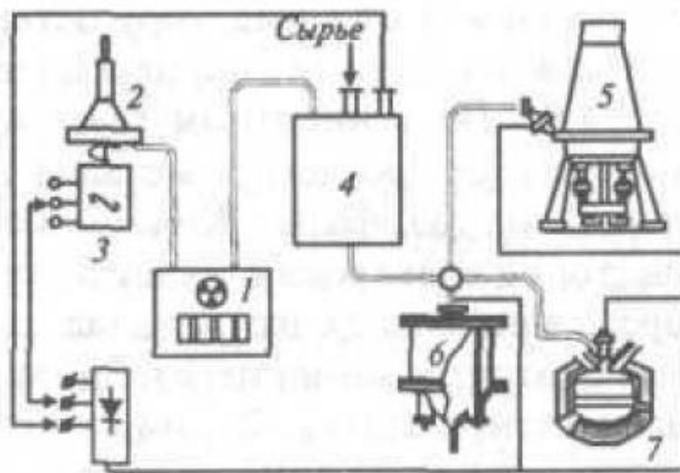


Рис. 12. Принципиальная схема атомно-плазменного металлургического комплекса: 1 - атомный реактор; 2 - паровая турбина; 3 — генератор тока; 4 — блок подогрева сырья и получения газа-восстановителя; 5 — плазменная шахтная печь; 6 — плазменная рулнотермическая или плавильная печь; 7 - струйно-плазменный реактор

Восстановительный газ – водород, смешанный или без посторонних примесей, расплавляет железо и его сплавы, восстанавливает, и в виде до-

жда жидких капель металл попадает в плавильную печь, где идут операции легирования.

Второй процесс - среднетемпературное восстановление, температура протекания процесса 900 °С. Восстановитель – чистый водород или с примесью окиси углерода. Железо находится в твердом состоянии, образуя при восстановлении своеобразную губку. Метод позволяет полностью без промежуточных звеньев использовать атомно-энергетическую установку. Большую часть газа-восстановителя нагревают в теплообменнике атомного реактора, где температура сравнительно невелика, далее к такому «холодному» газу подмешивают более горячий, нагретый за счет электроэнергии ядерного реактора.

Третий процесс - низкотемпературное восстановление, при котором тепло поставляется исключительно атомным реактором. В данном методе в чистом виде используется ядерная энергия.

Конечным продуктом всех схем являются железо, вода и углекислый газ, причем воду можно снова использовать для получения водорода и кислорода. Таким образом, появляются реальные возможности осуществить замкнутый цикл восстановления железа, создать безотходное производство.

В нашей стране разработана схема ядерно-металлургического комплекса (ЯМК). Предварительные расчеты показали, что использование тепла ядерных реакторов непосредственно для восстановления более эффективно по сравнению с использованием этого тепла на стадии получения восстановительных газов.

В разработанной схеме ЯМК предусмотрены: высокая производительность агрегата, непрерывность процесса, рециркуляция восстановительных газов, так как агрегаты устанавливаются в непосредственной близости от ядерных реакторов. В качестве теплоносителя (от реакторной установки) выбран гелий. Восстановителем выбран природный газ, конвертируемый теплом гелия, нагретого от атомного реактора.

Согласно схеме, железорудные материалы должны поступать в шахтную печь, где при температуре около 850 °С произойдет восстановление железа. Полученный продукт предусмотрено использовать в качестве шихтового материала в сталеплавильных печах. По схеме ЯМК отходящие из шахтной печи газы должны очищаться от  $H_2O$  и  $CO_2$  и многократно использоваться.

#### **4. Установки электронно-лучевого нагрева**

Техника электронно-лучевого нагрева (плавка и рафинирование металлов, размерная обработка, сварка, термообработка, нанесение покрытий испарением, декоративная обработка поверхности) создана на основе достижений физики, электроники, электронной оптики и вакуумной техники [6].

Первые электронно-лучевые установки (ЭЛУ) для плавки ниобия и тантала были созданы в 1950-х г.г. С 1960 г. ЭЛУ стали использоваться для нанесения покрытий, а затем и для обработки поверхности и размерной обработки, с 1970 г. - для нетермической микрообработки и химической обработки полимеров.

#### 4.1. Электронно-лучевой переплав

Электронно-лучевые печи делят на четыре группы: переплавные, рафинировочные, литейные и печи для нанесения покрытий. Для получения особо чистых металлов и сплавов применяют метод электронно-лучевого переплава [7]. Суммарное содержание примесей в материалах электронно-лучевого переплава составляет  $10^{-3}$  -  $10^{-4}$  % масс.

Этот метод сочетает в себе возможность плавки металла в глубоком вакууме ( $1,3 \cdot 10^{-2}$  Па) с нагревом до высокой температуры. Электронно-лучевой переплав эффективнее, чем вакуумно-дуговая плавка, так как имеет независимый источник нагрева; что позволяет точнее и в более широких пределах регулировать температуру расплава. Принцип метода состоит в том, что пучок электронов, обладающий высокой энергией, бомбардирует шихту или металлическую заготовку, которая расплавляется в водоохлаждаемом кристаллизаторе. Устройство, предназначенное для получения электронов, сообщения им больших скоростей и концентрирования потока электронов в луч с выводением его в плавильное пространство печи, называется электронно-лучевой (электронной) пушкой, или нагревателем.

Распространение в металлургическом производстве получили печи с радиальными или аксиальными электронными пушками (рис. 13). В печах, снабженных радиальными пушками (рис. 13, а), сплавляемая заготовка подается сверху, что является недостатком печей, так как из-за этого их высотные габариты при прочих равных условиях вдвое больше, чем с горизонтальной подачей заготовки и аксиальными пушками (рис. 13, б). В последние годы получили распространение печи с промежуточной емкостью (рис. 13, в). Благодаря увеличению поверхности расплава ускоряется процесс рафинирования, за счет чего возрастает производительность. Наряду с переплавом металлических заготовок, в электронно-лучевых печах переплавляют и мелкую шихту. Такие печи оборудованы герметичными бункерами и питателями (рис. 13, г).

Кроме рабочего объема, электронной пушки, системы вакуумирования и механического оборудования подачи и вытягивания слитка в состав печей входят также комплексная система водяного охлаждения, высоковольтная и выпрямительная аппаратура, система энергоснабжения и пульт управления. В целом такие печи являются довольно сложным производ-

ственным комплексом. Электрический КПД современных печей с аксиальной пушкой достигает 80 %, а тепловой КПД лишь 15 %.

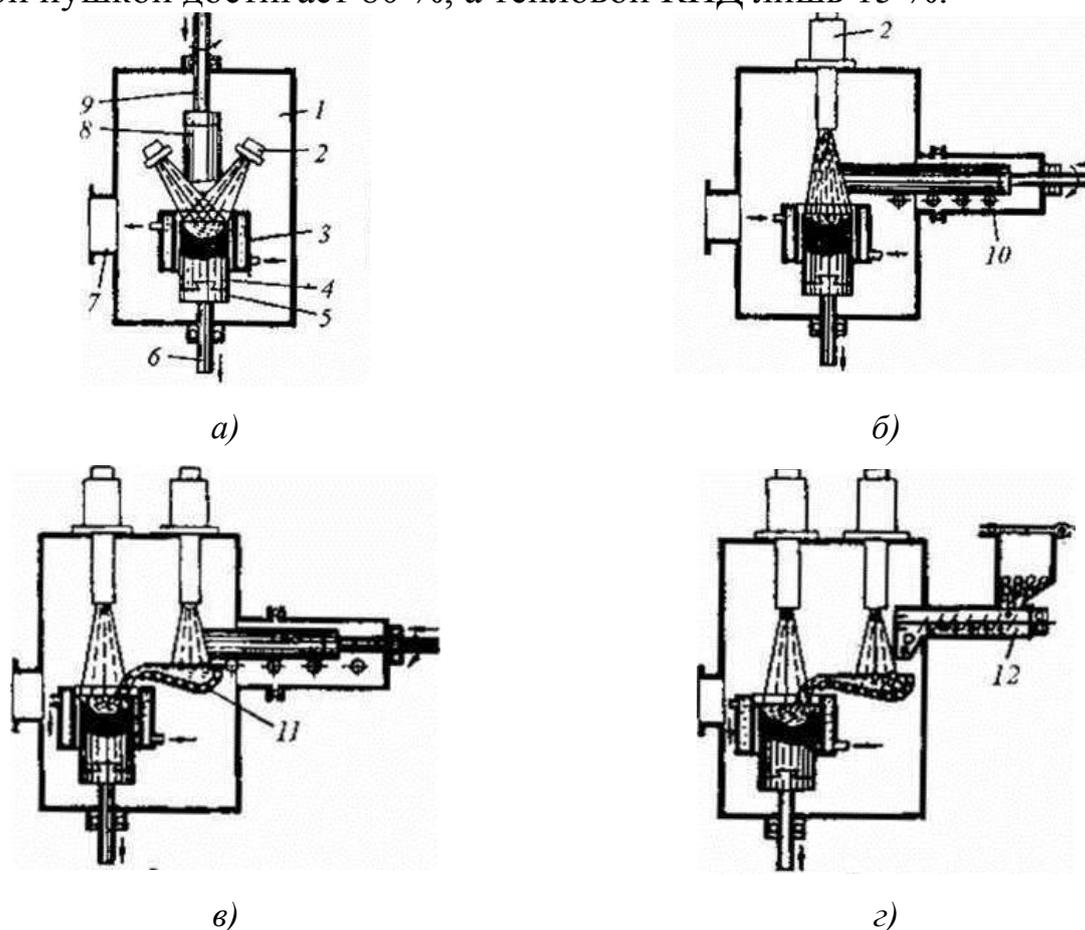


Рис. 13. Разновидности печей электронно-лучевого переплава: *а* — с радиальными пушками; *б* — с аксиальной пушкой и горизонтальной подачей заготовки; *в* — с промежуточной емкостью; *г* — для переплава кусковой шихты; 1 - рабочая камера; 2 — пушка; 3 — кристаллизатор; 4 — слиток; 5 — поддон; 6 — шток затравки; 7 — патрубков вакуумной системы; 8 — заготовка; 9 — шток заготовки; 10 — ролики; 11 — промежуточная емкость; 12 - питатель шихты

## 4.2. Электронные пушки

Электронные пушки изготовляют трех типов: с кольцевым катодом, радиальные и аксиальные.

Электронные пушки с кольцевым катодом являются наиболее простыми по конструкции (рис. 14). Катод 1 действует в электрическом поле непосредственно на анод 2, которым является переплавляемый металл. Анод при этом расходует. Обычно применяют экран электростатической фокусировки 3. Переплавленный металл 5, находящийся в кристаллизаторе 4, также используется как анод. Электронный пучок 6 направляется на анод - расходующий и на анод - ванну. Используют кольцевые катоды различной формы: плоские, конусообразные без дополнительной фокусировки и конусообразные с фокусировкой пучка.

Основным достоинством кольцевых пушек является повышенная мощность электронного пучка благодаря развитой поверхности катода.

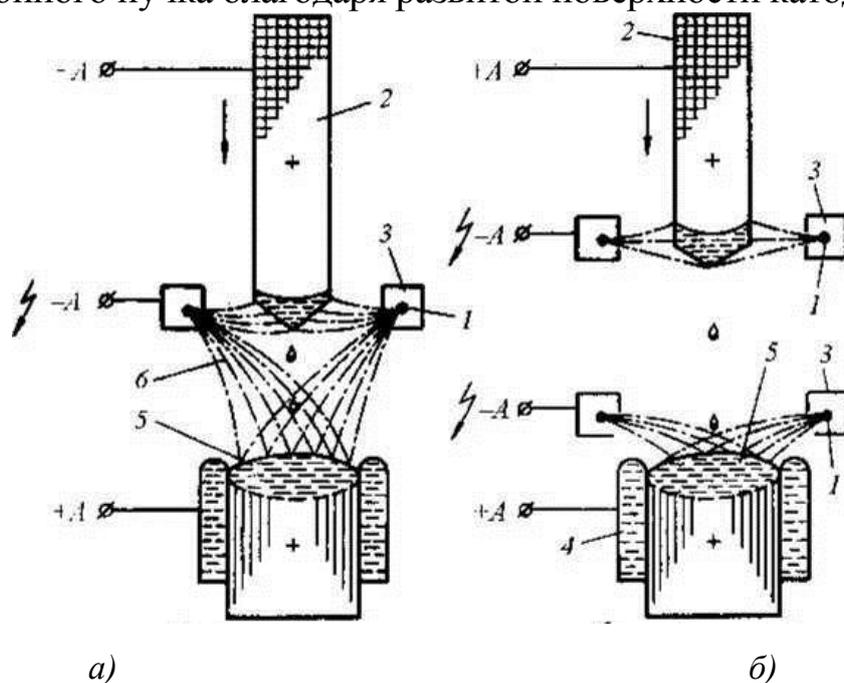


Рис. 14. Схема плавильной печи с кольцевым катодом; а — с одним; б — с двумя катодами

Иногда принимают два кольцевых катода с фокусировкой либо на расходимый анод, либо на анод — ванну (рис. 14, б). Из-за геометрического расположения катода вокруг анода почти все электроны, эмитируемые катодом, достигают анода. Используют обычно ускоряющее напряжение до 15 кВ, при этом мощности печей достигают 225 кВт.

Недостатками этих пушек являются: сложность смены катода; не-универсальность пушки, так как каждый диаметр кристаллизатора требует катода определенного размера; необходимость поддержания низкого давления в рабочей камере ( $<10^{-2}$  Па); сложность создания отдельного вакуума для катода; возникающее газовыделение из переплавляемого металла, приводящее к износу вакуумных насосов; попадание паров металлов на катод с постепенным разрушением его; наличие высоковольтного напряжения на переплавляемом металле. В силу перечисленных недостатков применение кольцевых электронных пушек ограничено.

При использовании радиальной электронной пушки между катодом и металлом устанавливают ускоряющий электрод с узкой щелью для прохода электронного пучка и соединяют его с положительным полюсом электрической высоковольтной сети. Таким образом, переплавляемый металл уже не соединен с высоковольтным напряжением. Радиальные электронные пушки (рис. 15) существуют в нескольких вариантах. Обычно, кроме фокусирующего электрода, они имеют дополнительные магнитные

катушки для фокусировки электронного пучка.

Радиальные пушки, как и кольцевые, работают обычно в рабочем вакууме камеры. Мощность радиальных пушек достигает 35 кВт при ускоряющем напряжении до 15 кВ. Существенным преимуществом установок с радиальными пушками является наличие отдельного анода с диафрагмой, направляющей электронный пучок на нагреваемый металл. Этим осуществляется независимость параметров электронного пучка от переплавляемого металла. Кроме того, это позволяет удалить катод от металла и организовать самостоятельную откачку из прикатодного пространства. Расширяются также технологические возможности, связанные с размерами слитков.

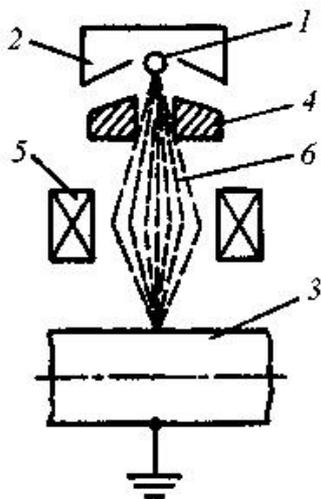


Рис. 15. Схема радиальной электронной пушки: 1 — катод; 2 - экранирующий электрод фокусировки; 3 — нагреваемое изделие; 4 — ускоряющий анод; 5 — магнитная катушка фокусировки; 6 — электронный пучок

Недостатками радиальных пушек являются: сложность монтажа и обслуживания пушек из-за повышенного числа элементов; сложность одновременного электропитания большого числа пушек в одной печи; относительно большие размеры элементов пушки и сложность их расположения в рабочей камере; недостаточное разделение вакуума рабочей камеры и зоны генерации электронных пучков; сложность создания печей с повышенной мощностью (выше 1 МВт).

Стремление избежать указанных недостатков и необходимость создания электронных пушек повышенной мощности привели в свое время к разработке конструкций аксиальных пушек.

Аксиальная электронная пушка позволяет получить мощности выше 1 МВт. В состав аксиальной электронной пушки (рис. 16) входят вспомогательный 1 и рабочий 2 катоды, причем вспомогательный катод имеет отдельное электропитание. Электроны, которые эмиттируют вспомогательный катод, нагревают рабочий катод, эмиттирующий, в свою очередь, элек-

тронный пучок. У рабочего катода имеется фокусирующий электрод 3. Пучок ускоряется положительным потенциалом на аноде 4. Для магнитной фокусировки и управления пучком применяют специальные катушки 5 и 6. Аксиальные пушки имеют систему многокамерного диафрагмирования 7, что позволяет определить систему вакуумирования рабочей камеры от системы электронной пушки. Благодаря этому обеспечивается стабильная работа таких установок и легко достигается глубокий вакуум (до  $10^{-4}$  Па), тогда как в рабочей камере давление может повышаться до 1 Па. Это упрощает вакуумную систему, устраняет пробой в результате газовыделения при плавке металла. Именно с использованием таких аксиальных пушек созданы электроннолучевые печи большой мощности.

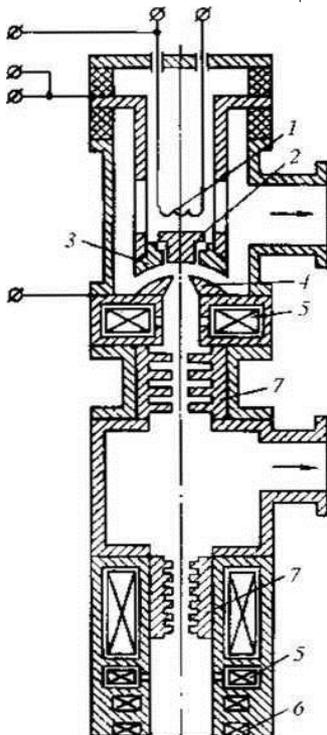


Рис. 16. Схема аксиальной электронной пушки

## 5. Установки электрошлакового переплава

Увеличение цены на стальной прокат дало стимул к освоению новых литейных технологий получения качественных металлов, а также к развитию новых видов электрошлакового оборудования [8].

Электрошлаковый переплав (ЭШП), разработанный в институте электросварки им. Е.О. Патона, является одним из наиболее эффективных методов повышения качества стали. В этом способе расходующий электрод (первичный слиток) переплавляют в водоохлаждаемом кристаллизаторе под слоем синтетического шлака, который под воздействием пропус-

каемого тока разогревается до 2000 °С, что обеспечивает бездуговое плавление электрода, погруженного в шлак.

Принципиальная схема установки ЭШП приведена на рис. 17.

Питание печей проводится переменным током от однофазного трансформатора. Перемещение электрода по мере его расплавления проводится путем опускания каретки с электрододержателем.

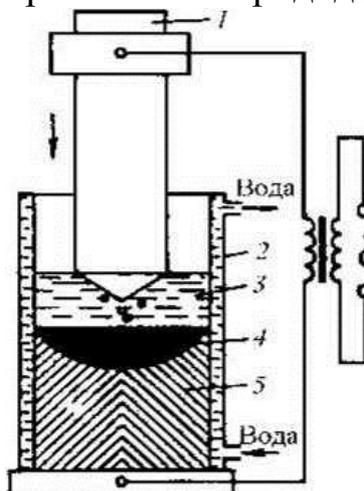


Рис. 17. Схема установки электрошлакового переплава: 1 - расходный электрод; 2 - кристаллизатор; 3 - расплавленный синтетический шлак; 4 - ванна металла; 5 - слиток

В начале плавки на поддон кристаллизатора заливают жидкий шлак, приготовленный в специальной шлакоплавильной печи. Наиболее распространенным является шлак, содержащий 70 %  $\text{CaF}_2$  и 30%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Такой шлак обеспечивает минимальный расход электроэнергии, обладает высокой десульфурационной способностью и хорошо адсорбирует оксидные включения. После заливки шлака в него погружают нижний конец электрода и включают ток, пропускание которого вызывает разогрев шлака и плавление электрода. По окончании плавки, когда весь металл в кристаллизаторе затвердеет, поддон опускают и готовый слиток снимают краном. Расходуемые электроды для ЭШП получают отливкой в специальные длинные изложницы или путем прокатки иликовки.

Методом ЭШП выплавляют слитки массой до 60 т различного поперечного сечения. Разработаны установки для выплавки этим методом полых слитков-гильз, которые используют для производства труб. Кроме однофазных печей, в нашей стране созданы трехфазные печи, позволяющие одновременно переплавлять три электрода.

В результате ЭШП содержание серы снижается до 0,001 %, а неметаллических включений — в 2 - 2,5 раза. Методом электрошлакового переплава получают стали для дисков и лопаток газотурбинных авиационных двигателей, газовых турбин, электро- и парогенераторов, прокатных валков и других деталей различного оборудования, работающих в особо

сложных условиях. В настоящее время метод ЭШП широко распространен в отечественной металлургической промышленности и за рубежом.

Тепловая мощность генерируется в шлаке по закону Ленца-Джоуля. Расходуемый электрод нагревается и плавится в результате внешней теплопередачи от шлаковой ванны: через торец - теплопроводностью, через боковую поверхность - излучением с зеркала шлаковой ванны и внутренней теплогенерации по закону Джоуля-Ленца. По мере оплавления и опускания электрода в результате теплообмена температура его поверхности резко возрастает, достигая 1400-1500 К. Погружаясь в шлаковую ванну с температурой 2000-2300 К (в зависимости от электрической мощности и теплофизических свойств шлака), электрод оплавляется. На торце формируется подвижная пленка расплавленного металла толщиной около 1 мм, удерживаемая поверхностными силами межфазного натяжения. При этом металл перегревается на 35-50 К и рафинируется от неметаллических включений. Электродный металл, стекая каплями с оплаваемого торца, падает в жидкометаллическую ванну слитка.

Малое активное сопротивление шлаковой ванны предопределяет работу ЭШП на напряжениях в несколько десятков вольт, что при высокой мощности крупных печей вызывает протекание в токоподводе токов силой в десятки тысяч ампер. Поэтому электрический КПД установок ЭШП не очень высокий и составляет 0,66 - 0,85. Большие тепловые потери в шлаковой ванне, особенно через стенку кристаллизатора (40-70 %), делают процесс ЭШП как процесс переплава стали в водоохлаждаемом кристаллизаторе теплотехнически несовершенным (тепловой КПД от 0,15 до 0,40). Удельный расход электроэнергии в печах ЭШП порядка 1 – 2 кВт·ч/кг. Поэтому применение печей ЭШП оправдано только в тех случаях, когда требуется металл особо высокого качества, который в печах другого типа получить не представляется возможным.

## **6. Вакуумные плавильные печи**

### **6.1. Вакуумные дуговые печи**

Вакуумные дуговые печи (ВДП) являются одними из основных электрометаллургических агрегатов, позволяющих получать металлы с высокими свойствами. В ВДП выплавляют тугоплавкие и высокореакционные металлы (титан, вольфрам, молибден, ниобий, цирконий и др.); стали и сплавы специального назначения - жаропрочные, нержавеющие, шарикоподшипниковые и другие для новых видов техники (авиационной, космической, химической, атомной и др.).

Высокое качество металлов достигается в результате проведения плавки в вакууме, который одновременно является и защитной средой и технологическим фактором. Вакуум способствует активному освобождению металла от растворенных газов и твердых примесных включений. Во

избежание загрязнения металла применяют медный водоохлаждаемый кристаллизатор, в котором плавится металл и формируется слиток. Источником теплоты в этом виде плавки является электрическая дуга, возникающая между твердым электродом и расплавом металла. В качестве исходного материала используют продукты металлургического передела, например губку при плавке титана и циркония. В результате обжата ее на мощных прессах или частичного сплавления получают расходоуемые электроды. При плавке вольфрама, молибдена и некоторых других тугоплавких металлов расходоуемые электроды получают гидростатическим прессованием или свариванием в пакеты штабиков — методом порошковой металлургии.

Существуют три разновидности печей для вакуумно-дугового переплава (рис. 18). Самое широкое распространение получили печи с расходоуемым электродом и глухим кристаллизатором (рис. 18, *а*). Печи с вытягиванием слитка путем опускания поддона кристаллизатора (рис. 18, *б*) применяют в основном для плавки тугоплавких металлов, качество которых значительно зависит от величины давления выделяющегося в процессе плавки газа. Для повышения степени дегазации металла уровень расплава в верхней части кристаллизатора поддерживается постоянным. Печи с нерасходоуемым (обычно вольфрамовым) электродом (рис. 18, *в*) применяют для производства расходоуемых электродов сплавлением губчатого металла или компонентов сплавов тугоплавких металлов. Исходные материалы в этом случае подаются в зону «горения» дуги из специального бункера-дозатора. Недостатком печей данного типа является загрязнение расплава материалом электрода - углеродом, вольфрамом и т.п.

В печах с расходоуемым электродом дуга горит между переплавляемым электродом и поверхностью ванны жидкого металла, а в печах с нерасходоуемым электродом - между графитовым или металлическим (вольфрамовым) электродом и расплавляемым металлом. В обоих случаях плавление ведется в вакуумной камере. В печах с расходоуемым электродом расплавленный металл может стекать в водоохлаждаемый кристаллизатор или в металлический водоохлаждаемый тигель. В последнем случае на стенках тигля образуется корочка переплавляемого металла, и расплав контактирует не с материалом тигля, а с гарнисажем из этого же металла. Поэтому печи такого типа называют гарнисажными.

Плавка в вакуумных дуговых печах с расходоуемым электродом позволяет получать металл высокой степени чистоты, так как при этом устраняются возможные источники загрязнения (огнеупорная футеровка, шлак, атмосфера) и имеются благоприятные условия для рафинирования металла вакуумом. Кроме того, учитывая условия кристаллизации металла в водоохлаждаемом кристаллизаторе и последовательное наплавление слитка, можно в значительной мере ослабить ликвационные процессы. Интенсивный теплоотвод в кри-

сталлизаторе и наличие жидкой ванны на поверхности формирующегося слитка обеспечивают мелкозернистую структуру и направленное затвердевание.

Дуговая плавка отличается высокой концентрацией тепла в дуге. Этим объясняется широкое распространение вакуумной дуговой плавки с расходуемым электродом заданного химического состава в производстве тугоплавких и активных металлов (титана, циркония, ниобия, тантала, молибдена и др.) и для получения стали и сплавов высокого качества.

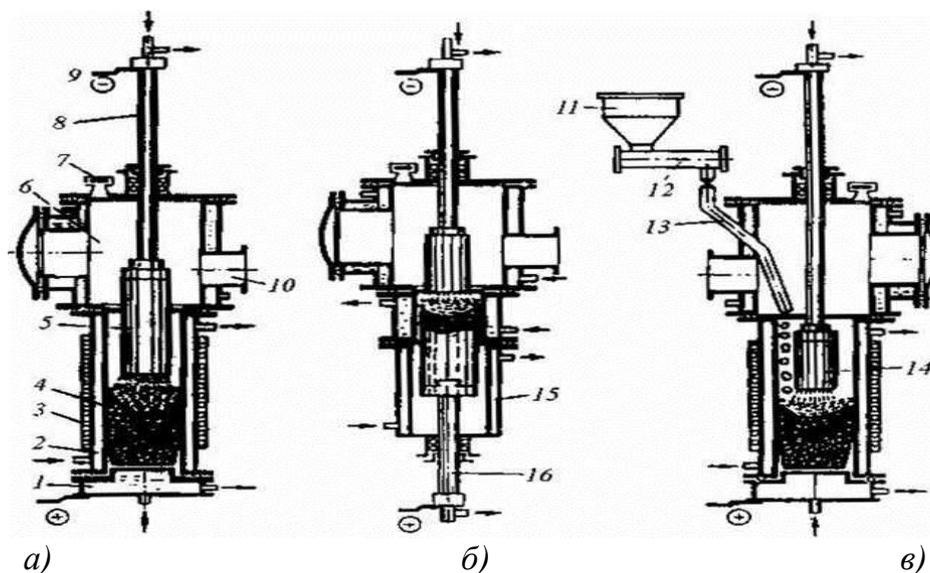


Рис. 18. Разновидности печей вакуумно-дуговой плавки: *а* - с расходуемым электродом и глухим кристаллизатором; *б* - с вытягиванием слитка; *в* - с нерасходуемым электродом; 1 - водоохлаждаемый поддон; 2 - водоохлаждаемый кристаллизатор; 3 - соленоид; 4 - слиток; 5 - расходуемый электрод; 6 - вакуумная рабочая камера; 7 - смотровое окно; 8 - шток электрода; 9 - токоподвод; 10 - патрубок вакуумной системы; 11 - бункер для шихты; 12 - питатель; 13 - течка; 14 - нерасходуемый электрод; 15 - камера слитка; 16 - шток слитка

Главная особенность процесса заключается в том, что дуга горит при пониженном давлении, остаточное давление не превышает 1,33 Па. Благодаря наличию вакуума, жидкий металл очищается от газов, оксидных неметаллических включений, вредных примесей. При изготовлении сплавов легирующие добавки можно вводить также в шихту для получения расходуемого электрода. Как правило первичный слиток дуговой вакуумной плавки требует повторной переплавки с целью повышения равномерности состава слитка. При переплавке первичный слиток вакуумно-дуговой плавки используют в качестве расходуемого электрода. В результате в ВДП получают слитки с высокими механическими и эксплуатационными свойствами [9].

## 6.2. Вакуумно-индукционные печи

Вакуумные индукционные печи (ВИП) используются для выплавки нержавеющей и жаропрочных сталей повышенного качества для деталей

ответственного назначения; для выплавки цветных металлов и сплавов. Кроме того, эти печи могут быть применены для зонной очистки, варки стекла, термообработки металлических деталей, получения монокристаллов [10].

Вакуумная индукционная плавка позволяет получать сплавы химически активных элементов, сплавы с низким содержанием нежелательных примесей и неметаллических включений. Наиболее часто вакуумная индукционная плавка применяется при получении фасонных отливок и слитков для последующего передела на листы, трубы и фасонный прокат. В последние годы ВИП используют для получения электродов с последующим переплавом их в электрошлаковых, в вакуумно-дуговых и электроннолучевых печах. ВИП является одним из самых распространенных процессов индукционной плавки, как в промышленности, так и в области лабораторного эксперимента.

Расплавление металла в вакуумных индукционных печах осуществляется за счет индукционного нагрева, основанного на наведении в электропроводящем материале вихревых токов Фуко переменным магнитным полем, создаваемым индуктором. При этом в металле, согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, наводится ЭДС индукции, создающая в металле вихревой ток. При прохождении через металл вихревого тока металл нагревается и плавится. Вихревой ток нагревает только поверхность шихты, при увеличении частоты тока наблюдается скин-эффект: ток «выжимается» на поверхность проводника. Таким образом, для увеличения силы тока нагрева необходимо увеличивать частоту тока, питающего индуктор, или магнитный поток. Обычно в промышленности индукционные печи питают токами с частотой от 50 Гц до 10 кГц, которые получают в генераторах токов высокой частоты различных конструкций (тиристорные, ламповые, машинные). Вакуумная индукционная печь представляет собой высокочастотную печь, помещенную в герметичный корпус, из которого при помощи вакуумных насосов откачиваются газы. Эти печи обладают рядом преимуществ перед другими вакуумными плавильными установками. Вакуумные индукционные печи являются высокомеханизированными и автоматизированными устройствами. Загрузка шихты, введение добавок и присадок, разливка и выдача металла осуществляются механизмами с электрическим и гидравлическим приводом.

Компактность электромагнитной системы «индуктор – металл», характерная для индукционных тигельных печей, определила развитие на их основе разнообразных конструкций индукционных вакуумных плавильных (рис. 19) и нагревательных печей, различающихся расположением индуктора вне (рис. 19, а) или внутри (рис. 19, б-г) вакуумной камеры. Слив металла из тигля плавильных печей может осуществляться через донное отверстие, путем наклона корпуса печи малых размеров (рис. 19, б) или тигля внутри вакуумной камеры больших габаритов (рис. 19, в, г) в изложницы или литейные формы.

Нагревательные печи периодического действия в зависимости от способа загрузки изделий могут быть камерные, шахтные, элеваторные; возможно создание печей непрерывного действия. Плавильные печи, работающие без нарушения вакуума в течение всей кампании тигля, называют печами полунепрерывного действия. Такие печи - наиболее сложные агрегаты (рис. 19, *з*), имеющие, помимо плавильной вакуумной камеры с индукционной печью, ряд вспомогательных шлюзовых камер для загрузки шихты, разливки, подачи изложниц или литейных форм, дозаторы для присадок, устройство для отбора проб и измерения температуры жидкого металла по ходу плавки и другое технологическое оборудование.

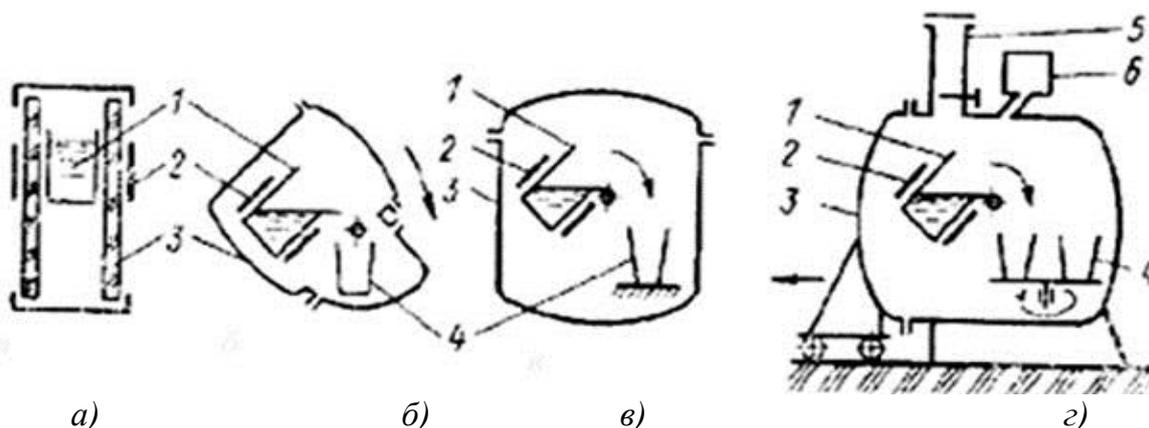


Рис. 19. Схема вакуумной индукционной плавки: *а* - индуктор расположен вне вакуумной камеры; *б-з* - индуктор расположен внутри вакуумной камеры; *в* - разливка путем наклона вакуумной камеры; *г, з* - разливка путем наклона тигля; *з* - ВИП полунепрерывного действия; 1 - тигель; 2 - индуктор; 3 - кожух; 4 - изложница; 5 - камера загрузки; 6 - дозатор

Кожух вакуумной камеры изготавливают из немагнитной стали. При расположении индуктора вне вакуумной камеры кожух представляет собой кварцевую трубу (рис. 19, *а*). Тигель вакуумных индукционных печей изготавливают из молотых порошкообразных высокоогнеупорных материалов (двуокись циркония, окись магния, окись алюминия) набивкой в индукторе по металлическому шаблону. Раскисление металла в вакуумной индукционной печи осуществляют сильными раскислителями - алюминием, церием и их сплавами. Индукционные вакуумные печи работают в условиях среднего вакуума с остаточным давлением 0,01 - 0,1 Па при нагреве и 0,1 - 1 Па при плавке. Химически активные и особо чистые материалы получают в индукционных вакуумных печах с так называемым холодным тиглем, представляющим собой медный водоохлаждаемый тигель с продольными разрезами, через которые электромагнитные волны проходят к расплавляемому материалу, не поглощаясь в электропроводном тигле. Строительство индукционных вакуумных печей связано с большими дополнительными инвестициями, что в сочетании с высокими расходами по пределу делает вакуумную индукционную плавку достаточно дорогостоящей, целесообразной только для получения металлов и сплавов особо высокого качества.

## Список литературы

1. Кудрин, В.А. Внепечная обработка стали и чугуна / В.А. Кудрин. - М.: МИСиС. - 1992. - 256 с.
2. Бигеев, А.М. Metallургия стали / А.М. Бигеев, В.А. Бигеев. - Магнитогорск: МГТУ. - 2000. - 544 с.
3. Лисиенко, В.Г. Хрестоматия энергосбережения: справ. издание: В 2 кн. Книга 1 / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. — М.: Теплоэнергетик, 2002. — 688 с.
4. Кудрин, В.А. Metallургия стали В.А. Кудрин. - М.: Metallургия, 1989. - 560 с.
5. Егоров, А.В. Электроплавильные печи черной металлургии / А.В. Егоров. – М.: Metallургия, 1985. – 280 с.
6. Лисиенко, В.Г. Сооружение промышленных печей: справ. издание: В 3 т. Т.1, кн.1 : Проектирование плавильных комплексов / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев; под ред. А.М. Прохорова, В.Г. Лисиенко. - М.: Теплотехник, 2006. - 567 с.
7. Лисиенко, В.Г. Сооружение промышленных печей: справ. издание: В 3 т. Т.1, кн.2 : Проектирование плавильных комплексов / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев ; под ред. А.М. Прохорова, В.Г. Лисиенко. - М.: Теплотехник, 2006. - 756 с.
8. Лисиенко, В.Г. Сооружение промышленных печей: справ. издание: В 3 т. Т.1, кн.3 : Проектирование плавильных комплексов / В. Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под ред. А.М. Прохорова, В.Г. Лисиенко. - М.: Теплотехник, 2007. - 866 с.
9. Ижорин, М.Н. Сооружение промышленных печей: справ. издание. Т. 2: Строительство печей / М.Н. Ижорин, Ю. П. Сторожков; под ред. М.Н. Ижорина. - М.: Теплотехник, 2006. - 672 с.
10. Теплотехника: учебник / А.А. Александров [и др.]; под общ. ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. - 792 с.