

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Тульский государственный университет»

Политехнический институт ТулГУ

Кафедра «Сварка, литье и технология конструкционных материалов»



УТВЕРЖДАЮ

Декан МТ факультета

Ларин С.Н.

СОГЛАСОВАНО

Председатель НМС МТ факультета

Судаков С.П.

Протокол № 11 от 19 июня 2013 г.

Г.А. Дорофеев, канд. техн. наук, доцент,  
А.А. Протопопов, д-р техн. наук, заведующий кафедрой, профессор,  
П.И. Маленко, канд. техн. наук, доцент,  
Я.М. Степанов, студент,  
Е.В. Фокина, студент

**Научно-популярные материалы**

**«Энергометаллургическая технология будущего»**

2013 г.

## Лекция №1

**Прямое получение железа на зарубежных и отечественных предприятиях**

## 1. Обзор технологий прямого восстановления

Существующая технологическая схема получения чёрных металлов (чугуна и стали) рассчитана на потребление качественного сырья и выплавки металла обыкновенного качества. Но качество природного сырья непрерывно снижается, а требования к качеству металла постоянно повышается. В будущем разрыв между качеством сырья и металлопродукции будет возрастать. Это связано с тем, что запасы высококачественного сырья истощены или находятся в необжитых районах, а также ухудшением горно-геологических условий добычи и необходимостью организации дальних перевозок. Поэтому работа по существующей технологической схеме может привести к дальнейшему снижению эффективности получения чёрных металлов. Необходимы коренные изменения в этой схеме, предусматривающие применение принципиально новых технологических процессов и агрегатов.

Структура металлургического производства исторически сложилась в течение последних 700 лет и к началу XXI века достигла предела технических возможностей, исчерпав потенциал дальнейшего развития. Поэтому черная металлургия расходует неоправданно большое количество энергии и сырья на производство 1 т готовой металлопродукции (проката) и наносит природе колоссальный экологический ущерб.

Наиболее неблагоприятной частью общего металлургического цикла является доменное производство вместе с обслуживающим его процессами агломерации и кокса. На долю этой стадии приходится 70-80 % расхода всей энергии и наибольшая доля вредных выбросов. В общем объеме выбросов доля агломерации дает более 60 % монооксида углерода, свыше 80 % диоксида серы и 30 % пыли. К этому добавляются непереложимые углеводороды, источником которых является коксохимическое производство.

Таким образом, основным расточителем энергии и сырья и загрязнителем окружающей среды служит производство чугуна с обслуживающим его производствами агломерата и кокса. Исходя из этого, приоритетной задачей черной металлургии является создание принципиально новой экологически чистой энерго- и ресурсосберегающей технологии, способной произвести подлинную революцию и прорыв в производстве металлов.

Можно ожидать, что уже в ближайшей перспективе инновационный путь развития черной металлургии позволит решить основные назревшие проблемы отрасли и сформировать новый высокотехнологичный облик производства стали. Дальнейшая привязанность в черной металлургии к существующим зрелым технологиям, уже утратившим ресурсы развития, должна быть преодолена и заменена стратегией инновационного наукоемкого развития отрасли.

Один из мировых гигантов черной металлургии компания „Ниппон Стил” (Япония) начала промышленное внедрение процесса жидкофазного получения металла ”Ромелт”. В целом процесс жидкофазного восстановления Ромелт по

своим технико-экономическим и качественным параметрам, безусловно, относится к значительным научно-инженерным достижениям современной металлургии. По мнению российских и зарубежных экспертов, эта технология может сыграть существенную роль в будущем техническом и экологическом обновлении металлургического производства.

## 2. Варианты и технологические схемы организации внедоменного промышленного производства железа

В мире разработано множество схем прямого получения металла из добываемой руды, причем большинство из них кардинально между собой не различаются. Но технологическая схема прямого получения железа значительно отличается от классической схемы получения стали с использованием доменной печи. В связи с тем, что при получении металла напрямую из добываемой руды, на базе некоторых процессов, исчезает необходимость использования не только доменной печи, но и аглофабрики, коксохимического производства, а в некоторых случаях возможно даже отказаться от обогатительной фабрики. Для сравнения рассмотрим две схемы производства, классическую (с использованием доменной печи) и с использованием агрегата прямого восстановления железной руды. На рис. 1 представлено сравнение наиболее распространенных промышленных схем производства стали.

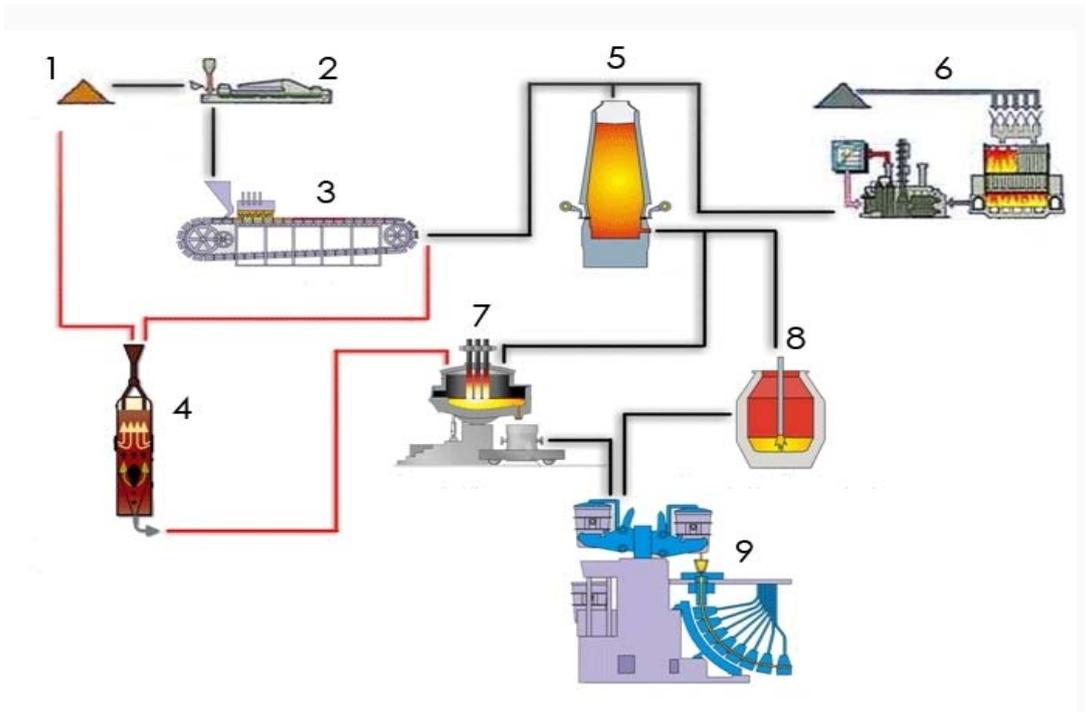


Рис. 1. Технологические схемы производства стали различными методами:  
 1 – шихта; 2 – обогащение; 3 – окускование; 4 – агрегат прямого восстановления железа; 5 – доменная печь; 6 – коксохимическое производство; 7 – ЭСП;  
 8 – кислородный конвертер; 9 – МНЛЗ

Передвижение сырья по классической схеме обозначено черными стрелками. Схема берет свое начало с железной руды, которая после добычи передается

на обогатительные фабрики для разделения рудной части и породы, с последующим получением металлического концентрата. Далее концентрат проходит процедуру окускования на агломашине, после чего спекшийся агломерат загружается в доменную печь. Так же важным элементом данной производственной схемы является коксохимический завод, т.к. без кокса невозможна доменная плавка, готовый кокс загружается в доменную печь вместе с агломератом. Продуктом доменной плавки является железо с высоким содержанием углерода т.е. чугун. Далее, следуя классической схеме чугун направляется на плавку в кислородный конвертер или в электродуговую сталеплавильную печь. В традиционной схеме производства стали могут использоваться оба этих агрегата, в зависимости от необходимости получения определенных характеристик конечного металла.

Далее из сталеплавильных агрегатов жидкая сталь поступает на машину непрерывного литья заготовки и в результате кристаллизации получают конечную продукцию - слябы. Передвижение сырья по альтернативной схеме обозначено красными стрелками. Особенностью внедоменного производства является то, что в агрегате (установка Midrex) возможно использование в качестве исходного сырья как продукции агломерации так и напрямую применение не обогащенной железной руды. В агрегате прямого восстановления железа, продуктом плавки является губчатое железо, которое впоследствии отправляется в электросталеплавильную печь для получения стали заданного химического состава и физических свойств. На рис. 2 приведена схема установки с применением трубчатых вращающихся печей.

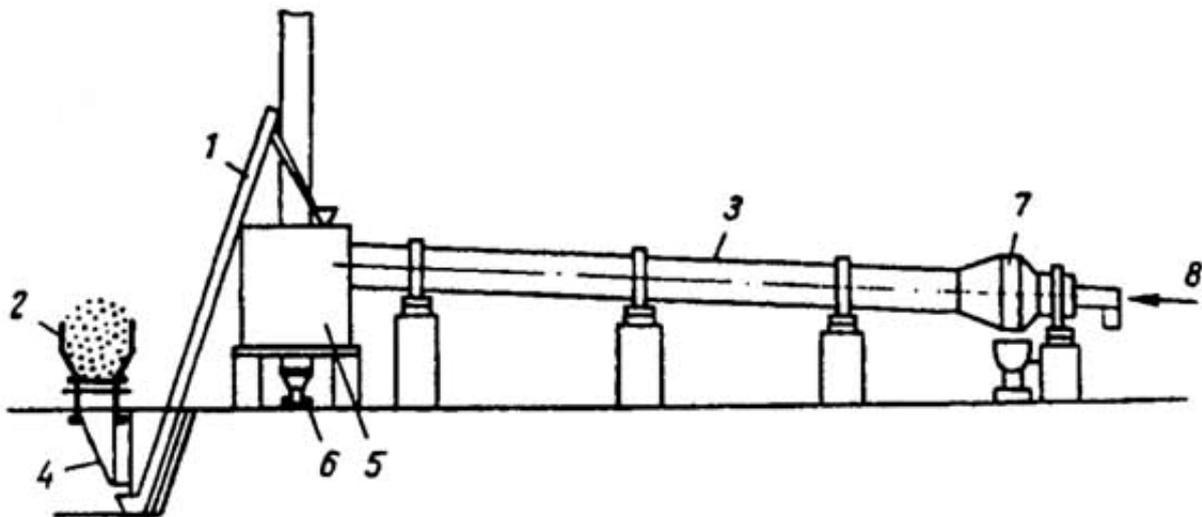


Рис. 2. Схема установки с применением трубчатых вращающихся печей (способ Азникур):

- 1 – элеватор; 2 – исходная шихта; 3 – вращающаяся печь; 4 – вибропитатель; 5 – пылеуловитель; 6 – уборка пыли; 7 – зона горения топлива и плавления материалов; 8 – горелка

### 3. Возможности переработки бедных железных руд

Доменный процесс обеспечивает получение кондиционного чугуна из же-

лезных руд с любым содержанием железа. При этом содержание железа влияет лишь на технико-экономические показатели процесса. Металлизация бедных руд (применение для этих целей металлургии железа) может быть эффективна лишь для получения кричного железа и жидкого металла. Частично металлизированные материалы и губчатое железо получать из бедных руд неэффективно.

Доменная печь обеспечивает получение кондиционного по сере чугуна. Удаление из чугуна меди, фосфора, мышьяка невозможно. Низкотемпературные процессы внедоменного восстановления не обеспечивают удаления практически ни одного попутного элемента кроме серы, степень удаления которой в шахтных печах составляет 30 %. Иначе говоря, все попутные элементы, присутствующие в исходной руде, остаются в губчатом железе и попадают в сталеплавильный агрегат. Это же относится к получению кричного металла (здесь возможна некоторая степень удаления серы). Получение жидкого металла позволяет удалить из процесса цинк, щелочи, а степень десульфурации и удаление мышьяка и, возможно, фосфора зависят от режима процесса.

**Физические свойства руды.** В доменной печи перерабатывают исключительно кусковой железорудный материал, причем размер кусков не должен быть меньше 3-5 мм. Отсюда вытекает необходимость процесса окускования руд (агломерация, производство окатышей). Это требование остается обязательным для процессов получения губчатого и кричного железа в шахтных и вращающихся печах.

**Использование недефицитных видов топлива.** Для современных доменных печей невозможно использование другого вида топлива, кроме металлургического кокса. Это прежде всего связано с высокими прочностными качествами кокса, сохраняющимися при высоких температурах. Ни один из известных ныне видов твердого топлива не может в этом отношении конкурировать с коксом. Можно определенно утверждать, что отсутствие или исчезновение источников получения кокса будет означать конец доменного способа производства металла.

**Использование новых видов энергии.** Несмотря на то, что использование энергии плазмы, атомной и других новых источников энергии для доменного производства не исключается, наибольший эффект от их применения соответствует внедоменному получению металла. Это повышает шансы новых технологий в конкуренции с доменным процессом в обозримом будущем. Основным вопросом, который определяет и в будущем будет определять преимущество того или иного способа получения металла, является расход энергии на процесс. В упрощенном виде его можно свести к расходу тепла (или источника тепла) на единицу получаемого продукта.

#### 4. Экологическая оценка эффективности организации внедоменного производства железа

В сознании людей металлургия ассоциируется с большим экологическим злом. Колоссальные объемы перерабатываемого сырья, широчайшее использование высокотемпературных технологий и процессов горения определяют соответствующее воздействие на окружающую среду. Влияние металлургии на при-

роду и человека особенно велико в регионах расположения металлургических комбинатов большой мощности. Это дополнительная плата за получение металлов - основы современной цивилизации. Жизнь человека невозможно представить без металлов, что находит отражение даже в классификации эпох (бронзовый, железный века). Так что, металлургия действительно неизбежное экологическое зло?

**Образование отходов в металлургии.** Ухудшение экологической обстановки металлургией небезосновательно связано с загрязнением атмосферы, но его не следует и преувеличивать. В выбросах оксида серы мировой вклад металлургии составляет 15 % (более половины из них дает цветная металлургия), столько же - химия, а лидирует энергетика (70 %). Аналогичное соотношение характерно и для оксидов азота. Методы очистки газов хорошо разработаны и одинаковы для всех отраслей промышленности, поэтому мы не затрагиваем эти вопросы. Однако металлургия является источником и огромной массы твердых отходов.

Обогащение руд приводит к образованию хвостов - дисперсной фракции с низким содержанием основного компонента. Другой пример - красные шламы, отходы переработки бокситов на глинозем  $Al_2O_3$ . Они содержат до 50-60 %  $Fe_2O_3$ , а их запасы превышают 150 млн. т. Отходы, сопутствующие металлургическим переделам, включают несколько видов. При выплавке металлов формируются шлаки, основу которых составляют оксиды. Это наиболее массовый вид отходов. Работа металлургических агрегатов сопровождается выносом пыли с отходящими газами. При мокрой газоочистке эта пыль в отстойниках превращается в кашеобразную массу (шлам).

**Утилизация отходов в металлургии.** Главными факторами, определяющими возможность экологически безопасной утилизации отходов, вновь становятся их физическое состояние и химический состав. На это накладываются технические возможности существующих технологий и экономическая целесообразность с учетом экологической перспективы. Можно выделить три подхода к утилизации отходов: прямое использование, переработка с извлечением полезных компонентов, уничтожение. Наиболее рациональны первые два, но не все отходы можно переработать. Несмотря на наличие полезных компонентов, на настоящем этапе может не существовать эффективных технологий их извлечения. Такие отходы дешевле и безопаснее уничтожить. Рассмотрим направления утилизации отходов в черной металлургии, которая становится их потребителем.

Прямое использование отходов. Прямое использование - наиболее простой и эффективный путь утилизации отходов, предполагающий минимальные затраты на их переработку. Оно возможно и рационально, если отходы экологически безопасны и не содержат извлекаемых компонентов. Без какой-либо подготовки, кроме сортировки по составу, его используют при выплавке стали. Аналогично утилизируют отходы машиностроения, армейскую технику и любой металлолом, то есть перерабатывают несобственные отходы металлургии. Другим примером прямого использования является окалина.

## 5. Пути развития процессов внедоменного получения железа

К черной металлургии относится широкий круг производств и предприятий,

задействованных в выпуске металла. Это предприятия по добыче и обогащению рудного и нерудного сырья, доменного и сталеплавильного производства, предприятия коксохимического производства, ферросплавного производства, производства огнеупоров, прокатного производства и другие.

Основные элементы современной производственно-технологической структуры черной металлургии и связи между ними представлены на рис. 3.



Рис. 3. Основные элементы современной производственно-технологической структуры черной металлургии и связи между ними

Предлагаемый процесс открывает возможность использовать многомиллиардные разведанные запасы железных руд, переработка которых в доменных печах или экономически нецелесообразна (бакальские сидераты) или исключена вообще (южно-уральские титаномагнетиты) из-за высокого содержания в них  $TiO_2$  (до 10 %). Новый процесс позволяет использовать эти природнолегированные полиметаллические руды, решая тем самым задачу сырьевого обеспечения металлургии.

Таким образом, применение разработанного процесса придаст металлургии новое качество – черная металлургия из энергопотребляющей станет энергопроизводящей отраслью промышленности.

Лекция №2  
**Энергометаллургическая технология производства металла  
в процессе Ромелт**

1. Общие сведения

Процесс Ромелт является непрерывным способом получения чугуна из железосодержащего сырья и отходов с применением недефицитных и дешевых марок некоксуемых углей. Принципиальная схема печи Ромелт представлена на рис. 1, печь с расплавом шлака через нижние фурмы вдвигается кислородно-воздушная смесь, которая интенсивно перемешивает шлак. Печь футерована только до уровня нижних фурм. Остальная часть выполнена из водоохлаждаемых элементов - кессонов. На холодной поверхности кессонов шлак образует твердую корку - гарнисаж. Так решается проблема стойкости футеровки в контакте со шлаковым расплавом. Шихта – руда или железосодержащие отходы (шламы, окалина) и уголь - непрерывно загружаются сверху на поверхность шлакового расплава с температурой 1400-1500 °С. Предварительной подготовки пылевидного сырья или угля не требуется. Уголь выполняет две функции. Его горение совместно с дожиганием газов поддерживает температуру в печи. Кроме того, он обеспечивает восстановление оксидов железа и формирование чугуна, который в виде капелек осаждается на дно (подину) печи. Металл и шлак выпускают через отверстия (летки), выполненные на разных уровнях.

Для дожигания выделяющихся газов (СО, Н<sub>2</sub>, летучие углеводороды угля) и возврата тепла в ванну через верхние фурмы подается кислород. В опытной установке выходящие из печи газы поступают в котел-охладитель, где окончательно дожигаются за счет естественного подсоса воздуха, охлаждаются и подаются на газоочистку. В промышленном агрегате они будут использованы для выработки электроэнергии.

Процесс Ромелт, рис. 1, расширяет возможности прямого использования отходов. На время эксплуатации печи накоплен опыт переработки различных материалов, включая шламы доменного и конвертерного производств, окалину, шлак свинцово-цинкового комбината. Из них извлекали главный полезный компонент (железо) и получали чугун, который использовали для производства стали.

В печи Ромелт компоненты распределяются между чугуном, шлаком и газом. Опыт показал, что легковосстановимые нелетучие элементы Си, Ni восстанавливаются и переходят в чугун. Поэтому комплексный подбор шихты позволит получить легированный чугун со специальными свойствами.

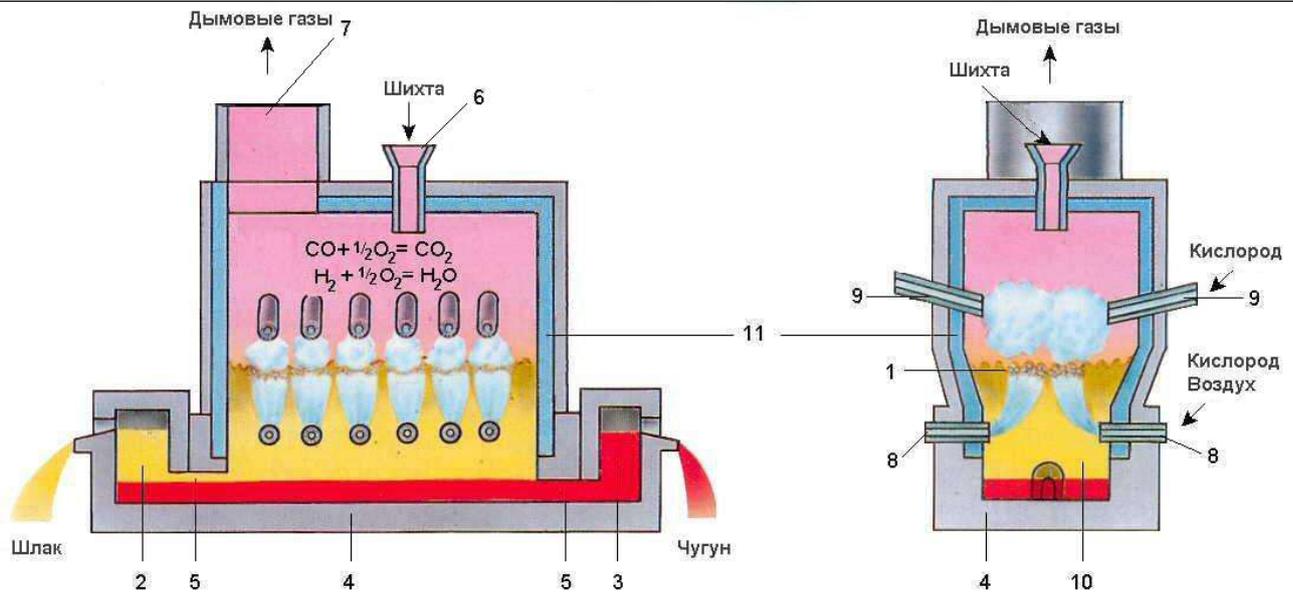


Рис. 1. Схема процесса Ромелт и агрегата для его реализации:

1 – барботажная зона шлака, 2 – шлаковый отстойник, 3 – металлический отстойник, 4 – футерованная подина, 5 – шлаковый и металлический перетоки, 6 – загрузочное отверстие, 7 – аптейк печи, 8 – нижние фурмы, 9 – верхние фурмы, 10 – зона спокойного шлака, 11 – водоохлаждаемые панели

Для такого использования пыли важно знать, в какие соединения связываются элементы, и уметь управлять этим процессом. Теоретическое решение задачи можно получить расчетом сложных химических равновесий, а практическая реализация достигается изменением степени дожигания.

## 2. Описание процесса жидкофазного восстановления железа Ромелт: разработка и реализация

Московский институт стали и сплавов заявил в 1979 г. новый процесс получения металла путем восстановительной плавки железосодержащих материалов в барботируемой шлаковой ванне - процесс жидкофазного восстановления (ПЖВ).

Металлургическое извлечение железа из окисленных руд и его дальнейшая термическая и механическая обработка сопровождаются большими затратами энергии. В производстве стального проката с использованием аглококсодоменной технологии основная доля этих затрат приходится на стадию получения жидкого чугуна. В себестоимости чугуна доля затрат на энергоресурсы (кокс, природный газ, кислород, электроэнергию и пр.) превышает 50 %. Поэтому усилия специалистов направлены на повышение экономической эффективности производства чугуна путем совершенствования технологии его выплавки, а также на разработку принципиально новых способов извлечения железа из руд.

Основой нового процесса является восстановительная плавка, проводимая в одну стадию в плавильно-восстановительном агрегате (рис. 1). Кроме снижения капиталоемкости и эксплуатационных затрат, это обеспечивает повышение производственной надежности процесса в результате устранения неувязок между аг-

регатами в тепловом балансе, технологии и организации работы. При этом главной целью было использование железосодержащего сырья без подготовки окискованием, в том числе пылевидного, при возможно широком диапазоне содержания железа. В качестве восстановителя и энергоносителя используется энергетический уголь без предварительной подготовки его в виде пылеугля.

Железосодержащая шихта и уголь подаются к агрегату из бункеров через весовые дозаторы системой конвейеров без специального смешения. Загрузка осуществляется через обычное отверстие в своде на шлаковую ванну. В ванне при температуре 1500-1600 °С происходит быстрое плавление железосодержащего сырья и замешивание угля в барботируемую зону при его пиролизе и удалении летучих.

Дутье обеспечивает необходимый барботаж ванны и генерирование тепла в результате неполного сжигания углерода до СО. Капли восстановленного в шлаковой ванне железа из его оксида науглероживаются, укрупняются и опускаются на подину агрегата через зону спокойного шлака, образуя металлическую ванну с температурой 1375-1450 °С.

Удаление из печи металла и шлака проводится через отдельные сифонные устройства с отстойниками безнапорным способом, что обеспечивает поддержание в печи необходимого постоянного уровня металла и шлака.

Газы удаляются из рабочего пространства при 1500-1800 °С в зависимости от степени их дожигания через дымоотводящий патрубок, проходят котел-утилизатор, мокрую или сухую газоочистку. Газоотводящий тракт агрегата ПЖВ принципиально не отличается от тракта конвертеров.

Для промышленного опробования ПЖВ на Новолипецком металлургическом комбинате была построена опытная установка, рис. 2. Печь имеет площадь 20 м<sup>2</sup> и рассчитана на производительность по металлу до 45 т/ч.

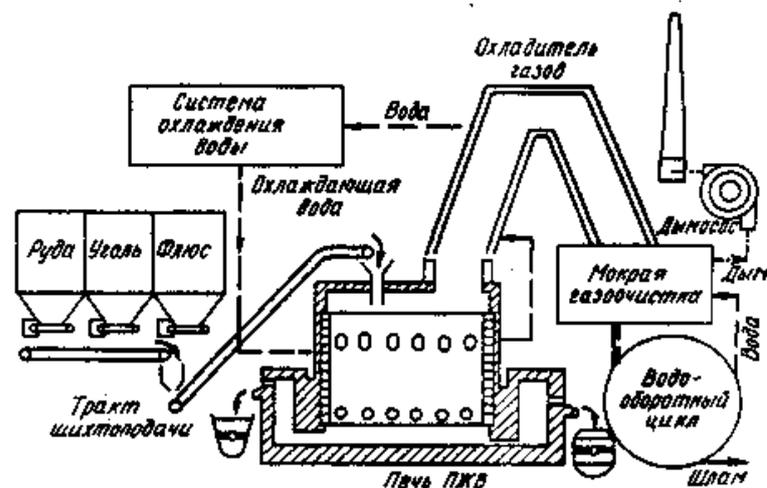


Рис. 2. Схема опытной установки ПЖВ

Агрегат из-за недостаточной мощности системы охлаждения и газоочистки не работает длительное время с необходимой высокой степенью дожигания 0,75-0,95. Обычным был режим работы с неполным дожиганием (в пределах 0,40-0,50). При этом возникает недостаток тепла, поступающего в шлаковую ванну от дожи-

гания, для реакции восстановления оксидов железа. Это компенсируется увеличением неполного сжигания угля непосредственно в шлаковой ванне с соответствующим повышением расхода угля и кислорода.

Барботируемая через боковые фурмы шлаковая ванна ПЖВ с замешанным в ней углем является аналогом горна доменной печи с коксовой насадкой и фурмами для подачи дутья. В обоих агрегатах здесь протекают процессы прямого жидко-фазного восстановления железа из его оксида. Высокая эффективность доменного процесса определяется дальнейшим использованием физической и химической энергии горнового газа в шахте печи для протекания процесса косвенного восстановления. Это облегчает по расходу тепла прямое восстановление в горне. В агрегате ПЖВ аналогом шахты доменной печи является надшлаковое пространство с дожиганием здесь выделяющегося газа. При этом происходит возвращение его химической энергии в виде тепла в шлаковую ванну, обеспечивающее протекание процессов восстановления. Энергия отходящих из доменной печи и агрегата ПЖВ газов используется в качестве вторичных энергетических ресурсов (ВЭР).

Общая схема расположения технологического оборудования, реализующего процесс Ромелт представлена на рис. 3.

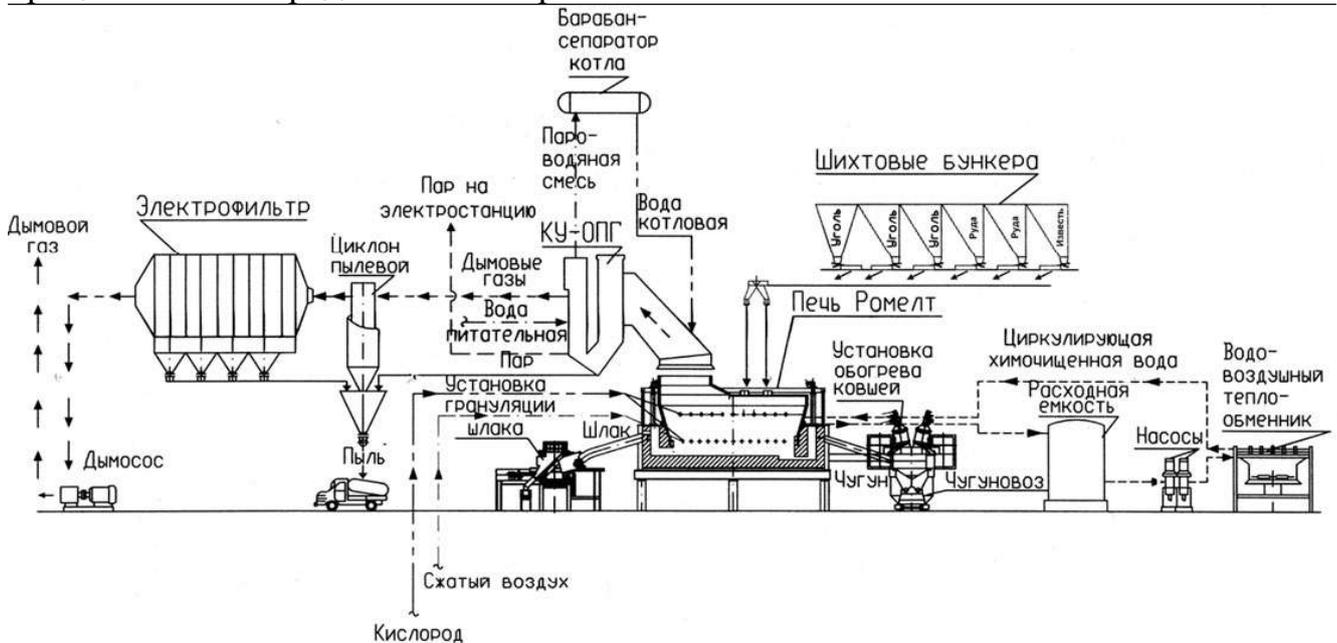


Рис. 3. Общая схема расположения технологического оборудования, реализующего процесс Ромелт

Структура системы «шлак - металлические капли - частицы угля» влияет на технологические показатели ПЖВ.

В ПЖВ восстановление осуществляется: твердым углеродом угля; углеродом, растворенным в каплях металла, находящихся в шлаковой ванне; пузырями  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ .

Барботажа ванны обеспечивает ее однородный состав как в продольном, так и поперечном направлениях. В тоже время именно барботируемый шлак является конвективным переносчиком тепла из зоны дожигания в шлаковую ванну. Наличие в шлаковой ванне на границе с металлом зоны спокойного шлака предохраня-

ет его от окисления, обеспечивает рафинирование проходящих капель металла, исключает попадание угля в отработанный шлак.

Науглероживание капель железа происходит в зоне барботируемого шлака, причем скорость этого процесса в исследованных пределах не ограничивала производительность печи.

Поведение серы в ПЖВ отличается от ее поведения в доменном процессе. Установлено, что основная масса серы, внесенной шихтой (80-90 %) удаляется из печи с отходящими газами. Причем значительная часть этой серы находится в пыли, а другая часть - в газах в виде двуокиси. Содержание серы в газах после газоочистки составляет 4-10 % прихода. На распределение серы между газами и пылью оказывает влияние степень дожигания газов в печи.

Формирование шлакового расплава в ПЖВ происходит в результате плавления или растворения пустой породы железосодержащего сырья, золы угля и флюса при интенсивном перемешивании ванны газами. Состав шлакового расплава определяется составом загружаемой шихты. Содержание закиси железа в шлаке составляет 1,5-3,0 % и не имеет существенных отличий во всем объеме шлаковой ванны и в отработанном шлаке.

Интенсивность тепломассообмена в шлаковой ванне определяется мощностью ее барботажа, вязкостью шлакового расплава и степенью дожигания газов в надшлаковом пространстве. Жидкий шлаковый расплав воспринимает до 85 % всего тепла, выделяющегося в надшлаковом пространстве при дожигании газов. Высокая интенсивность теплообмена между зоной дожигания и шлаковой ванной обеспечивается увеличением поверхности ванны при ее барботаже. Достижение высоких степеней дожигания в ПЖВ не лимитируется окислением брызг металла в надшлаковом пространстве с получением равновесной атмосферы по  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ . Возможность дожигания в ПЖВ позволяет использовать угли с повышенным содержанием летучих. В условиях экспериментов на опытной установке тепловые потоки на ванну составляли 2-5 МВт/м<sup>2</sup>.

Анализ состава газовой фазы над поверхностью расплава до дожигания показал, что она в основном состоит из  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ , а содержание  $\text{CO}_2$  не превышает 5 %.

Степень дожигания газов в надшлаковом рабочем пространстве является определяющим фактором часовой производительности печи, уровня расходных коэффициентов угля и кислорода на тонну чугуна (рис. 4).

Чем выше степень дожигания, тем больше тепла передается шлаковой ванне сверху и тем меньшая генерация тепла требуется непосредственно в шлаковой ванне за счет неполного сгорания угля для плавления шихты, восстановления и науглероживания металла

Горизонтальное расположение ванны с боковым дутьем обеспечивает увеличение поверхностей взаимодействия фаз в печи и уменьшает скорость движения газов в ней.

В настоящее время отработана технология жидкофазного восстановления для переработки железорудного сырья с содержанием более 30 % железа. Чем выше количество железа в руде или в концентрате после ее обогащения, тем ниже выход шлака и расходные коэффициенты угля и кислорода. Однако нет препятст-

вий для использования необогащенной железной руды. При этом лимитирующим фактором производительности агрегата будет не скорость восстановления, а протекание процессов тепломассопереноса в шлаковой ванне, определяемых интенсивностью ее барботажа.

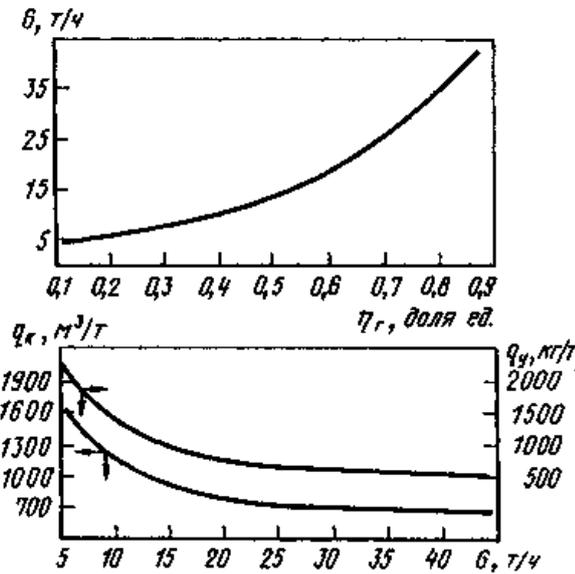


Рис. 4. Зависимость производительности  $G$  от степени дожига газов в печи  $\eta_r$  и расхода угля  $q_y$  и кислорода  $q_k$  от производительности печи ПЖВ (содержание кислорода в дутье - 0 60 %)

Оптимальное содержание железа в сырье в конкретных условиях необходимо определять экономическими расчетами на основе показателей ПЖВ при различном содержании железа в шихте и затратами на обогащение железорудного сырья.

На рис. 5 показаны схемы циклов производства при использовании в качестве исходного сырья окисленных железистых кварцитов; для ПЖВ рассмотрена работа с концентратами и непосредственно на кусковой или пылевидной исходной руде. Потери железа, не используемые и используемые на разных стадиях, приняты по фактическим данным. Жидкофазное восстановление по сравнению с твердофазным характеризуется повышенной степенью сквозного извлечения железа.

В результате для одинакового объема производства металла снижается необходимый уровень добычи руды, исключается или уменьшается степень обогащения с безвозвратными потерями железа в «хвостах», исключается окускование и окомкование железосодержащего сырья.

При использовании ПЖВ решается проблема переработки шламов аглодоменного и сталеплавильного производств, которые содержат 35-55 % железа, примеси щелочных и тяжелых цветных металлов, в частности, цинка и свинца. Использование шламов в качестве железосодержащей составляющей в аглодоменном производстве затруднительно в технологическом отношении и резко ухудшает технико-экономические показатели. Хранение таких шламов приводит к загрязнению водного и воздушного бассейнов и отторжению земельных угодий под шламонакопители. Часть шламов текущего производства используется нера-

ционально (с потерей железа, цинка, свинца).

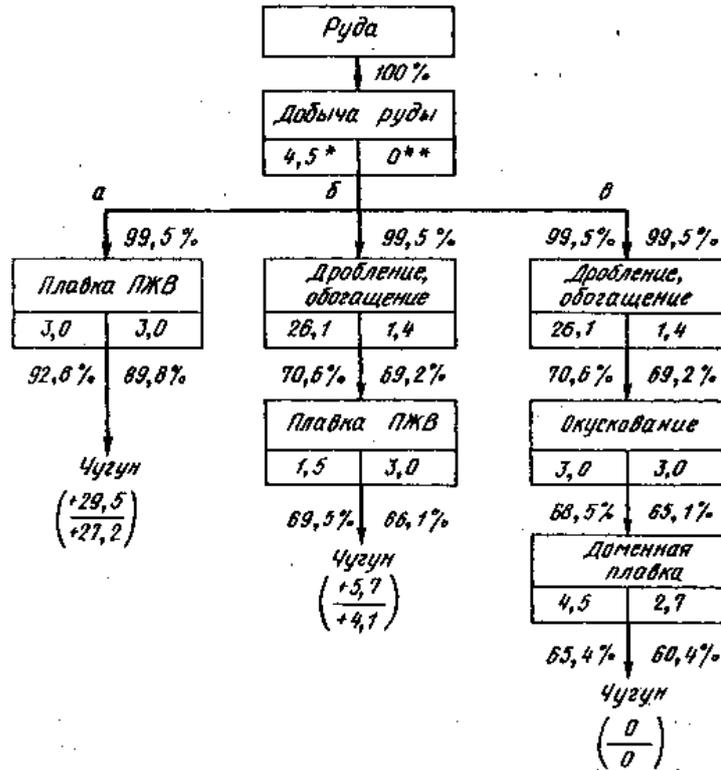


Рис. 5. Сквозное извлечение железа из железорудного сырья ПЖВ соответственно с обогащением сырья (а) и без его обогащения (б), аглодоменная схема (в); (цифры у стрелок справа - извлечение железа без учета возврата, слева - с учетом возврата; цифры в круглых скобках - изменение сквозного извлечения железа по сравнению с аглодоменной схемой: числитель - без учета возврата, знаменатель - с учетом возврата); \* и \*\* - здесь и для других технологических схем соответственно неиспользуемые и используемые потери железа

Технология переработки железосодержащих шламов и пыли, освоенная в агрегате ПЖВ, предусматривает получение наряду с чугуном концентратов цинка и свинца, образующихся при очистке газов ПЖВ от пыли. При этом в пыль, например, переходит 99,5 % цинка, содержащегося в шихте ПЖВ.

Экспериментально доказана возможность использовать для продувки через нижние фурмы дутье с содержанием кислорода до 50 %. При этом зарастание фурм шлаком не происходило. Отдельные фурмы работали без кислорода на компрессорном воздухе. Возможно, применение теплообменника после котла-утилизатора для подогрева воздуха отходящими газами с целью снизить удельный расход кислорода.

На агрегате ПЖВ опробовано использование природного газа для технологических нужд путем вдувания его через фурмы одновременно с кислородом в шлаковую ванну. При этом не возникало затруднений, в ванне происходила конверсия газа с приходом тепла от дожигания над ванной продуктов конверсии (окиси углерода и водорода). Однако не выявили технологические преимущества и обнаружили охлаждающий эффект от конверсии. В дальнейшем отказались от применения газа, используя его только для разогрева печи после ремонта, обогрева

ва желобов и ковшей и для других вспомогательных нужд. Не вызывает сомнений возможность вдувания в шлаковую ванну через фурмы пылеугольного топлива. Однако при этом не будет технологических преимуществ по сравнению с подачей угля на шлаковую ванну, так как в этом случае возникают технические и экономические проблемы, связанные с получением, транспортировкой и вдуванием пылеугля в ванну.

На основании экспериментальных данных составлены материальные балансы ПЖВ для различных степеней дожигания газов при использовании конвертерных шламов. Большому значению степени дожигания соответствует большая часовая производительность печи по чугуна. С ростом степени дожигания снижается удельный расход угля, кислорода и дутья, т. е. уменьшается приходная часть материального баланса. Снижение расходного коэффициента железосодержащей шихты при увеличении степени дожигания связано с уменьшением выхода шлака и потерь с ним железа из-за снижения прихода золы угля.

Соответственно, в расходной части баланса с ростом степени дожигания снижается выход дымовых газов, шлака и пыли на 1 т. чугуна.

### 3. Основные технико-экономические показатели процесса Ромелт

Для энергетической оценки ПЖВ по сравнению с другими процессами необходимо проводить сопоставление не только по прямым затратам топлива, но и по общему расходу первичной энергии по соответствующим технологическим схемам получения металла.

При низкой степени дожигания чугун ПЖВ уступает по экономическим показателям чугуна доменной плавки. Однако уже при степени дожигания 0,74 и 0,93 экономические показатели ПЖВ выше, причем себестоимость ниже на 2,6-14,3 %, а удельные капитальные затраты меньше на 40,1-51,2 %.

Использование ПЖВ имеет принципиальное значение для решения экологических проблем в черной металлургии. При этом из металлургического цикла исключаются производства, на которые приходится в пределах 2/3 выбросов металлургических предприятий. Вредные выбросы ПЖВ по  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_2$  не превышают выбросов для доменных печей, а несколько повышенная запыленность отходящих из печи газов устраняется обязательной системой газоочистки с замкнутым циклом использования шламов. Это позволяет решать конкретные проблемы загрязнения окружающей среды на отдельных металлургических предприятиях сокращением коксохимического, агломерационного и доменного производств при использовании ПЖВ. Таким же путем можно на предприятиях наращивать объемы производства металла без увеличения вредных выбросов.

С серьезными экологическими проблемами связано хранение неиспользуемых красных шламов глиноземного производства и отходов производства серной кислоты - пиритных огарков. Они содержат от 30 до 60 % железа и не могут перерабатываться по аглодоменной схеме получения чугуна. Особенности ПЖВ позволяют комплексно использовать эти отходы и накопленные железосодержащие отходы цветной металлургии (шлаки, шламы, кеки). При этом могут попутно извлекаться цветные (цинк, свинец), редкие (скандий и др.) и благородные (серебро)

металлы. С помощью ПЖВ может решаться проблема комплексной переработки сернистых железных руд, нередко содержащих благородные металлы. Здесь требуется сочетание окислительной плавки по процессу Ванюкова и восстановительной плавки по ПЖВ.

При работе агрегата ПЖВ без дожигания на выходе из шлаковой ванны восстановительный газ по экспериментальным данным содержит: 55 % CO; 30 % H<sub>2</sub>; 4 % CO<sub>2</sub>; 11 % N<sub>2</sub>. Кроме использования для металлургических целей этот газ может быть также применен на тепловых электростанциях. Дальнейшие разработки здесь целесообразны в направлении использования под котлами экологически чистой ТЭС горючего газа, получаемого из энергетических углей в ПЖВ, по технологии, обеспечивающей чистоту газа по NO<sub>x</sub> и SO<sub>2</sub>.

## Лекция 3

**Энергоемкость производства железуглеродистого полупродукта для выплавки стали процессом Ромелт**

## 1. Общие сведения

Сравнение энергоемкости получения методом жидкофазного восстановления (процесс Ромелт, европейский патент № 0302111В1) железуглеродистого полупродукта для выплавки стали, заменяющего передельный чугуна, с энергоемкостью чугуна, производимого по традиционной аглококсодоменной схеме, продолжает оставаться дискуссионной темой.

При определении комплексных затрат энергоресурсов на металл Ромелт и доменный чугун учитывали затраты энергоносителей на всех стадиях передела железорудного сырья, подготовки топлива и добавочных материалов, начиная от их добычи до получения жидкого металла. Все затраты энергоносителей приведены к энергетическому эквиваленту, выраженному в килограммах условного топлива.

## 2. Оценка энергозатрат в процессе Ромелт

Энергозатраты непосредственно на процесс Ромелт при основности шлака  $B = 1,03$ , аналогичной для доменного передела, и при степени дожигания  $\phi = 0,9$  в сопоставимых условиях (т.е. при содержании железа в перерабатываемом концентрате 64,5 %) на 6,6 % меньше и составляют 838,2 кг/т чугуна. При содержании железа 68 % это преимущество возрастает до 10,2 %, а при уменьшении содержания железа в перерабатываемых концентратах в процессе Ромелт до 61 % сокращается до 2,2 %.

При 45 % железа в шихте энергозатраты в процессе Ромелт выше на 33,7 %. Однако следует иметь в виду, что переработка такого концентрата в доменной печи без предварительного его обогащения и окомкования невозможна. Кроме того, в доменной плавке доля дефицитных высококачественных энергоресурсов (природный газ, кислород, коксующийся уголь) составляет 80 %, тогда как в процессе Ромелт - только 13 %.

Комплексные затраты энергоресурсов на доменный чугун и металл Ромелт с учетом энергозатрат в предыдущие переделы при 64,5 % железа в перерабатываемом концентрате ниже на 25,8 % , при 68 % - на 27,7 %, при 61 % - на 21,7 %, а при переработке концентратов в процессе Ромелт, содержащих 45 % железа, уступают доменному чугуну только 1 %.

Энергозатраты на металл Ромелт сокращаются при уменьшении основности шлака. Ее можно снизить до 0,6-0,8 без значительного увеличения содержания серы в металле. В доменном процессе уменьшение основности приводит к возрастанию содержания серы в чугуне, а ведение плавки при основности менее 0,8 практически невозможно.

При уменьшении основности шлака в процессе Ромелт с 1,03 до 0,8 энергозатраты на процесс сокращаются на 0,5 % при высоком содержании железа (68 %)

в железорудном сырье и на 6,1 % при низком (45 %). При основности шлака 0,8 в процессе Ромелт и степени дожигания 0,9 даже при переработке концентратов с содержанием железа 45 % затраты энергоресурсов меньше по сравнению с базой на 6,5 %, при переработке богатых концентратов, содержащих 61; 64,5 и 68 % железа, затраты ниже соответственно на 25,8; 27,7 и 31,4 %.

Из сравнения процессов при разных технологических условиях ведения плавки в печи Ромелт видно, что расход энергоресурсов на металл Ромелт меньше в сравнении с аглококсодовой схемой при переработке концентратов с содержанием железа 61; 64,5 и 68 % при степени дожигания 0,9 и практически одинаков при переработке концентратов, содержащих 45 % железа, при той же степени дожигания 0,9 и основности 1,03.

При уменьшении степени дожигания газов в печи Ромелт с 0,9 до 0,6 расход энергоресурсов на плавку возрастает на 32-37,5 % при содержании железа в сырье 45-68 %. Энергоемкость при степени дожигания 0,6 больше энергоемкости доменного чугуна при содержании железа в концентрате менее 64,5 %. Однако увеличение общих энергозатрат при уменьшении степени дожигания объясняется главным образом увеличением ВЭР в виде химической энергии отходящих газов. При рациональном использовании ВЭР технология Ромелт может быть весьма конкурентоспособной по сравнению с аглококсодовой технологией и при низких степенях дожигания. Более того, печь Ромелт можно рассматривать как энерготехнологический агрегат, в котором производимая энергия может рассматриваться как самостоятельный продукт.

При улучшении качества железорудного сырья (увеличение содержания железа в перерабатываемых концентратах) сокращается расход энергоресурсов на производство чугуна и возрастает доля затрат энергоресурсов на подготовку сырья с 5,5 до 8,1 %. В аглококсодовой схеме эта величина составляет 18,8 %. Анализ структуры комплексных энергозатрат показывает, что в энергоемкости доменного чугуна основную долю составляют высококачественные и дефицитные ресурсы: коксующийся уголь - 49 %, природный газ - 12,8 % (в сумме 61,8 %). В энергоемкости металла Ромелт доля природного газа весьма мала (1,5-1,7 %), а вместо коксующегося угля используется энергетический уголь (65,7-72,5 %). На технический кислород приходится 9,4% общих затрат энергии. Производится же кислород на базе электроэнергии или теплоэнергии, которые, в свою очередь, получают преимущественно на основе энергетических углей, или за счет использования топливных ВЭР, или высокопотенциальных вторичных тепловых энергетических ресурсов. В частности, физическое и химическое тепло высокотемпературных (до 1850 °С) отходящих газов процесса Ромелт можно использовать на тепловых утилизационных электрических станциях (ТУЭС) для производства электроэнергии на собственные нужды и тем самым сократить ее расход из внешних сетей.

При учете использования образующихся в процессе Ромелт вторичных тепловых энергетических ресурсов и при их стоимостной оценке по действующим инструкциям уменьшение стоимости энергоресурсов на металл Ромелт по сравнению с доменным чугуном составляют 29,4; 27,7; 24,1 и 6,5 % соответственно для содержания железа в концентрате для процесса Ромелт 68; 64,5; 61 и 45 %.

## Лекция №4

**Энергометаллургическая технология производства металла  
в процессе ORIEN**

## 1. Общие сведения

Процесс ORIEN представляет собой энергометаллургический процесс нового поколения. В его основе лежит высокоэффективная комбинированная технология получения железа прямого восстановления, искусственного газообразного топлива и электрической/тепловой энергии на основе угля.

Данный процесс отличает низкая капиталоемкость и эксплуатационные затраты, а также высокий уровень экологической эффективности и безопасности, обусловленные энергометаллургическим характером технологии ORIEN.

Принципиальной основой технологического процесса ORIEN является восстановление оксидов железа, подаваемых внутрь объема железоуглеродного расплава, углеродом, растворённым в железе и присутствующем в нём в атомнодисперсном состоянии. В результате перехода из твердого в расплавленное состояние восстановление железа приобретает жидкофазный характер, который протекает с исключительно большими скоростями. Удельная скорость при этом составляет значительную величину –  $5 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$  и более, что на два порядка превышает аналогичный показатель в доменных и шахтных печах, равный  $0,04\text{-}0,05 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ .

Отличительной чертой технологии ORIEN является недоступная в других способах возможность переработки некоксуемых углей и неокискованного железорудного сырья в дефицитные и ценные товарные продукты с повышенной добавленной стоимостью.

Одновременно процесс решает задачу использования природнолегированных руд, содержащих оксиды хрома, титана, ванадия, марганца, позволяя на основе пирометаллургического принципа обогащения руд разделить исходное сырьё на железо и кондиционный самородный шлак, содержащий в повышенных количествах оксиды легирующих элементов и пригодный в качестве исходного сырья для получения ферросплавов соответствующего состава.

Другой отличительной особенностью данной технологии является использование для энергообеспечения технологического процесса собственной электрической и тепловой энергии, получаемой соответственно от утилизации вторичных энергоресурсов (ВЭР) в виде физического и химического тепла отходящих газов, а также в результате неполного сжигания (окисления) углерода металла, поступающего из угля газообразным кислородом.

Кардинальным отличием разработанной технологии от существующих способов служит особый характер энергетики процесса, заключающийся в получении из угля методом синтеза искусственного газообразного топлива непосредственно в технологическом цикле и отводе образующихся газов без их дожигания за пределы печи с целью последующего преобразования энерго- и химического потенциала этих газов в электрическую и тепловую энергию на принципе паротурбинной или парогазовой схем.

Отмеченные выше особенности придают процессу ORIEN энергометаллур-

гический характер и принципиально отличают его от чисто металлургических процессов прямого получения железа, базирующихся на использовании товарной энергии поступающей извне.

## 2. Описание процесса ORIEN

В качестве восстановительного агрегата в процессе ORIEN служит электродуговая печь сталеплавильного типа, а исходными материалами являются железорудное сырьё в виде концентрата и/или порошкообразной руды, уголь, а также газообразный кислород и воздух. Схема процесса ORIEN в дуговой печи представлена на рис. 1.

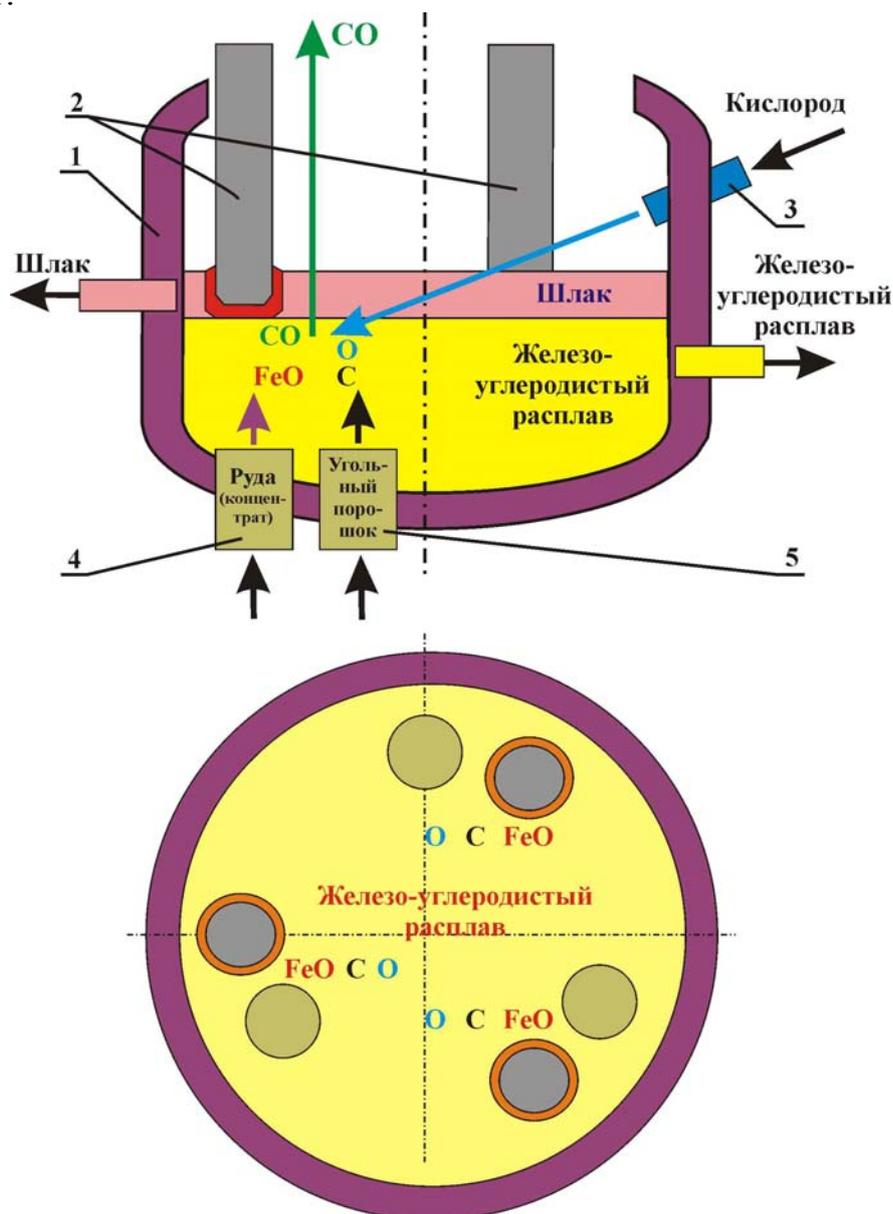


Рис. 1. Схема процесса ORIEN в ДСП

Возможность получения железуглеродистых сплавов с регулируемым широким диапазоном концентрации углерода в конечном металле является существенным преимуществом процесса ORIEN над доменными печами и другими агре-

гатами восстановительной плавки. В частности, более низкое исходное содержание углерода в железе прямого восстановления по сравнению с чугуном резко уменьшает объём парниковых газов, образующихся при выплавке стали, открывая возможность практического решения давно назревшей проблемы экологии.

Искусственный технологический газ, образующийся в процессе ORIEN, состоит из смеси синтез-газа ( $\text{CO}$ ;  $\text{H}_2$ ), получаемого в результате газификации угля оксидами железа, и монооксида углерода ( $\text{CO}$ ), образующегося в процессе окисления углерода, растворённого в железе, вдуваемым кислородным дутьём. Данные газы в виде их смеси отводятся из печи в энергоблок и далее сжигаются в газовой турбине или паровом котле для получения электрической и тепловой энергии. Общая схема процесса представлена на рис. 2.

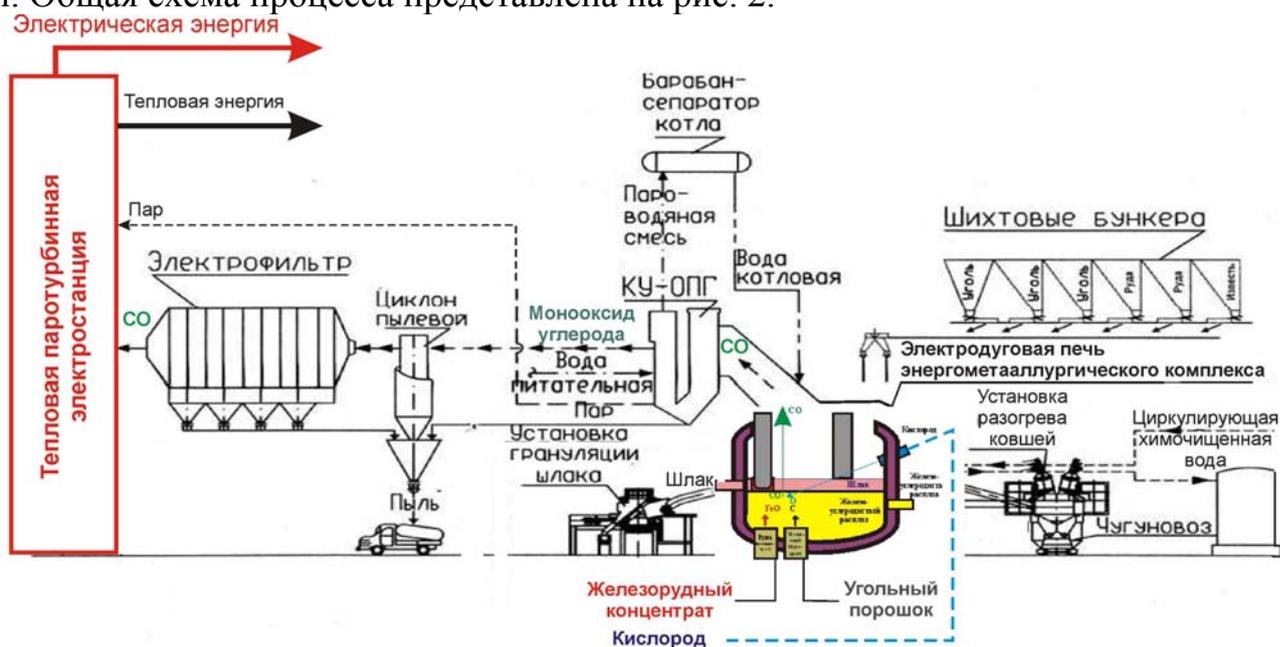


Рис. 2. Общая схема и основное технологическое оборудование для реализации процесса ORIEN

Вырабатываемая электроэнергия частично возвращается в технологический процесс, обеспечивая энергопотребность в тепле, а частично поступает в сеть в качестве товарного продукта для реализации электроэнергии внешним потребителям. Отходящий газ может также применяться в качестве топлива или сырья в других отраслях промышленности. Тем самым решается задача преобразования твердого топлива-угля в газифицированное топливо, которая до сих пор не нашла эффективного решения.

Удельные вредные выбросы при сжигании газифицированного угля значительно ниже, чем при традиционном использовании твердого органического топлива (угля). При сжигании последнего на электростанциях часть угля не сгорает и остаётся в золе в виде кокса, ошлакованного зольной частью. Доля несгоревшего углерода достигает 18-25 %, соответственно снижая тем самым степень использования теплотворной способности углерода. Образующиеся золы требуют хранения, занимая часть земель, пригодных для использования. Одновременно проис-

ходит загрязнение воздушного и водного бассейнов оксидами серы и азота, усиление кислотных дождей, а также увеличение содержания в воздухе и почве золашляковых частиц. Поэтому газификация угля на основе металлургических методов наряду с более высокой энергоэффективностью улучшает также экологические условия по сравнению с его сжиганием в твёрдом состоянии.

Технология ORIEN, базирующаяся на угле, позволяет исключить зависимость процесса получения железа, кондиционных шлаков и энергетического газа, от других видов газообразного и жидкого топлива. Доступность и распространённость исходного сырья - рудных материалов и угля, отсутствие необходимости окусковывания руды и получения кокса, относительно низкие цены на исходные материалы, простота их транспортировки, существенно снижают риски, вызываемые экономическими и политическими событиями.

ORIEN является легко масштабируемой технологией, что позволяет реализовывать её поэтапно, и размещать производства относительно небольшой мощности непосредственно в местах добычи руд и/или угля, а также потребителей железа прямого восстановления и потребителей электрической и тепловой энергии.

Одним из следствий появления технологии ORIEN является возможность отказа от создания агрегатов огромной единичной мощности, в том числе доменных печей, и устранения явления гигантизма, составляющего неотъемлемую черту или особенность классической металлургии и энергетики. Данный процесс создает необходимые и достаточные условия для перехода к более гибким производственным системам, свободным от недостатков традиционной металлургии и энергетики.

Технология ORIEN позволяет перерабатывать железорудные материалы с различным содержанием железа и полиметаллические руды с оксидами легирующих элементов, в том числе руды местных месторождений. В качестве угля могут использоваться энергетические угли различных марок – газовые, длиннопламенные, суббитуминозные, бурые, сохраняя возможность работы на углях более высокого качества, в том числе антраците.

### 3. Перспективы применения процесса ORIEN и вопросы обеспеченности углем и железорудным сырьём

В настоящее время наблюдается тенденция возврата к эпохе угля, опирающаяся на новые технологии с более высокими технико-экономическими показателями. Рост издержек на добычу нефти и газа и перспективы исчерпания ресурсов этих энергоносителей, а также непрерывный и значительный рост стоимости энергии, получаемых из них, неизбежно подталкивают развитие металлургии и энергетики, базирующихся на твердом топливе - угле.

Обеспечение перехода функционирования индустрии, особенно черной металлургии – главного потребителя энергоресурсов, на энергетику, основу которой будет уголь и электричество, является одной из наиболее актуальных задач современности, возможно даже главной проблемой. Запасы угля на порядок с лишним превышают запасы углеводородов. Это обеспечивает потребности мира в уг-

ле на многие тысячелетия вперёд. Россия, располагая колоссальными угольными ресурсами, в отношении доли угля в топливно-энергетическом балансе отстаёт от США, Китая, Германии и других стран. Этот показатель для России не превышает 20 %, что даже ниже среднемирового значения данного показателя, равного 30 %. Поэтому для России задача перехода к угольной эпохе представляет особую актуальность и имеет стратегическое значение.

Наличие огромных запасов угля в мире и России позволяет обеспечить беспрепятственно широкое развитие энергометаллургических процессов типа ORIEN, базирующихся на использовании угля в качестве восстановителя и топлива.

Железорудное сырьё, используемое в процессе ORIEN, относится в отличие от угля к менее дефицитным материалам. Поэтому обеспечение потребностей процесса в оксидном сырье вызывает меньше проблем. Вместе с тем нельзя не считаться с фактом существенного истощения запасов богатых железных руд и тенденций к использованию более бедного сырья. В процессе ORIEN могут использоваться не нашедшие до сих пор широкого применения природнолегированные руды и концентраты, что позволяет расширить сортамент применяемых рудных материалов. В первую очередь это относится к южноуральским титаномагнетитам и байкальским сидеритам, переработка которых в доменных печах либо экономически нецелесообразно или просто невозможна. Для процесса ORIEN их использование не представляет трудностей. Тем самым открываются возможности применения многомиллиардных запасов железных руд, не нашедших использования в существующих восстановительных печах, что наряду с возможностью применения бедных руд расширяет рудную базу нового процесса.

Дополнительным резервом рудного сырья является местонахождение местных руд с относительно небольшими запасами и пониженным содержанием железа. Возможность создания процессов ORIEN с относительно небольшой единичной мощностью позволяет использовать местные руды, расширяя тем самым географию распространения данного процесса на территории РФ и других стран. Одновременно это исключает привязку производства к огромным месторождениям сырья и концентрацию производственных мощностей на локальных территориях, сопровождающихся неблагоприятными техногенными последствиями.

Изложенное выше свидетельствует, что новый процесс существенно ослабляет требования к качеству рудного сырья как по содержанию железа, так и оксидов легирующих элементов. В сочетании с возможностью создания эффективных агрегатов небольшой единичной мощности это позволяет обеспечить в полной мере новый процесс железорудными материалами.

Возможность гибкой диверсификации источников получения исходного рудного сырья и угля составляет одно из преимуществ технологии ORIEN. Оно позволяет снизить зависимость от поставок сырья и угля, колебаний цен и конъюнктуры рынков угля и рудных материалов, открывая тем самым перспективы для развития черной металлургии в развивающихся странах, не имеющих до сих пор собственного производства стали и проката.

## Список литературы

1. Юсфин Ю. С. Металлургия железа / Ю. С. Юсфин, Н. Ф. Пашков. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 464 с.
2. Черноусов П. И. Металлургия железа в истории цивилизации / П. И. Черноусов, В. М. Мапельман, О. В. Голубев. – М.: МИСиС, 2005. – 423 с.
3. Ерофеев В. А., Дорофеев Г. А., Протопопов А. А., Захаров С. К., Маленко П. И., Протопопов Е. А., Арсеньева А. А. Разработка математической модели физико-химических процессов в электродуговой сталеплавильной печи энергометаллургического комплекса непрерывного действия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 9. С. 215-226.
4. Мадоян А. А., Мадоян А. А., Андриюшин А. В. О целесообразности использования инновационных энергометаллургических комплексов на твердом топливе // Экология промышленного производства. 2008. № 2. С. 48-51.
5. Косырев К. Л., Фоменко А. П., Паршин В. М., Жихарев П. Ю. Энергометаллургический комплекс – ключ к решению проблемы переработки техногенных отходов // Черная металлургия. 2012. № 1354. С. 73-80.
6. Николаев А. В. Структурные изменения топливно-энергетического комплекса и их влияние на производство стали // Сталь. 2008. № 10. С. 116-122.
7. Николаев А. В. Реалии и перспективы энергетического базиса металлургии стали // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2008. № 1. С. 40-49.
8. Рябов А. В. Современные способы выплавки стали в дуговых печах / А. В. Рябов, И. В. Чуманов, М. В. Шишимиров. – М.: Теплотехник, 2007. – 192 с.
9. Modelling, Optimization and Control of an Electric Arc Furnace / Richard MacRosty. - Hamilton: McMaster University, 2005. – 160 p.
10. Буданов И. А. Черная металлургия в экономике России. - МАКС Пресс, 2002. - 427 с.
11. Новиков Н. И. Мировые тенденции развития чёрной металлургии и их влияние на металлургию России // Вестник Челябинского государственного университета. Экономика. – Вып. 35. – № 36 (251). – 2011. – С. 100-105.
12. Уменьшение выбросов CO<sub>2</sub> в черной металлургии // Новости черной металлургии за рубежом. – Вып. 1. – 2011. – С. 94-100.
13. Sustainable material management for R&D in steel industry/ Adachi Y. // Ferrum. 2009. 14. № 8. С. 509–512.
14. Mitigating CO<sub>2</sub> Emissions in the Steel Industry: A Regional Approach to a Global Need / Riley M. F., Rosen L., Drnevich R. // Iron and Steel Technology. 2010. № 2. С. 63–72.

Рассмотрено на заседании кафедры СЛиТКМ  
протокол №8 от 22 мая 2013 г.

Зав. кафедрой  А. А. Протопопов