

Абраменков Ю.Я. – канд. техн. наук, проф., НМетАУ

Стригунов Н.А. – аспирант, НМетАУ

СРАВНЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ ЖИДКОФАЗНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

В статье приведен обзор основных современных способов бескоксовой металлургии (Corex, HIs melt и т.п.) и краткое описание механизма жидкофазного восстановления. Рассмотрены схемы основных современных способов бескоксовой металлургии и их технологические (теплотехнические) особенности. Приведены основные статьи текущих затрат на осуществление процессов в энергетическом (тепловом) эквиваленте. Сделано сравнение рассмотренных способов по их энергетической эффективности.

Введение

Многолетняя практика производства железа и его сплавов из руд показала, что, алогичный на первый взгляд, двухстадийный способ его производства (а) чугуна; б) стали и сплавы) был и остается наиболее целесообразным как с технической, так и с экономической точек зрения. Единственным восстановителем железа из руд, используемым в промышленных масштабах, был и остается углерод в форме различных углей и производимых из него искусственных топлив. Нет оснований думать, что такое положение в производстве железа изменится в ближайшее столетие. Однако вид агрегатов для этого производства, по видимому, претерпит очень существенные изменения, особенно в производстве чугуна, в связи как с исчерпанием запасов коксующихся углей во всем мире, так и с существенным исчерпанием запасов богатых железных руд и накоплением железосодержащих отходов производством черной металлургии. Проблема кокса в черной металлургии встала давно, и несмотря на то, что она не была такой острой как сейчас, все же побудила разработку бескокс-овых технологий производства железа на основе использования природного газа и вторичных источников энергии (электроэнергия, кислород), которые казались неисчерпаемыми. В настоящее время совершенно очевидно, что единственным экономически широко доступным источником энергии для черной металлургии останутся некоксующиеся угли, а сырь-

ем – бедные железные руды (в том числе из отвалов) и отскладированные в прошлом различного рода шламы. Для работы на таких топливе и сырье ни доменная печь, ни современные машины для подготовки сырья не годятся. Особенно это утверждение касается доменных печей. Альтернативой доменному производству являются и в прошлом и в настоящее время агрегаты и процессы бескоксовой металлургии. Хотя количество предложенных процессов бескоксовой металлургии перевалило за сотню, в промышленности применялись менее десятка, а для массового производства металла не использовался ни один.

Среди процессов, получивших признание, т.е. использовавшихся в промышленности, можно условно выделить две группы. Одна группа – это процессы, промышленное применение которых сворачивается, не имеющие перспектив распространения в обозримом будущем. Другая группа – это процессы, промышленное применение которых возрастает, и которые, после некоторого усовершенствования, могут получить широкое распространение.

По мнению авторов, к первой группе относятся процессы, основанные на использовании дорогих энергоносителей (дорогих для производства сталей рядовых марок). К дорогим энергоносителям относятся кокс, природный газ, электроэнергия и технически чистый кислород. Кокс (коксующиеся угли) дорог из-за своей малой распространенности (дефицитности). Природный газ – в силу рыночных условий. Электроэнергия – вторичный энергоноситель, т.е. для ее производства используется другой энергоноситель в большом количестве. Кислород, в свою очередь, получают с применением электроэнергии. Ко второй группе относятся процессы, основанные на использовании дешевых энергоносителей, – некоксуемого угля и дутья (предпочтительно горячего) с небольшой добавкой кислорода. Все процессы твердофазного восстановления, безусловно, относятся к первой группе, поскольку расплавление металлизированного полупродукта предполагает использование дорогих энергоносителей. Представленная работа посвящена сравнительной характеристике процессов жидкофазного восстановления железа, как наиболее перспективных, в связи с тем, что они в состоянии работать на любых углях и сырье.

1. Перечень рассматриваемых процессов

1.1. Процесс Corex разработан фирмой Voest-Alpine Industrienanlagenbau в 1979 г. Первая промышленная установка производительностью 300 тыс. т чугуна в год пущена в ЮАР в 1988 г. В настоящее время (май 2008 г.) в мире работает одна установка С-1000, шесть установок С-2000 и одна установка С-3000. Еще одна установка С-3000 находится в процессе строительства. Номинальная производительность установки С-1000 составляет 40 – 50 т/час, С-2000 – 80 –

125 т/час и С-3000 – 145 – 180 т/час. Существует также близкородственный процесс Finex, разработанный той же фирмой. Установка F-1.5M работает в Южной Корее. Данные разработчиков об удельных расходах сырья и энергоносителей взяты из [3]. Данные по расходу огнеупоров не найдены.

1.2. Процесс Dored разработан фирмой «Стора Коппаберг Бергслаг А.Б.». Испытан на полупромышленной установке в 1963 г. Пуск первой промышленной установки планировался в 1965 г. Дальнейшие сведения отсутствуют. Исходные данные взяты из [7].

1.3. Процесс Romelt разработан в МИСиС (СССР, Россия). Испытан на полупромышленной установке (на Новолипецком металлургическом комбинате) к 1992 г. В 2005 г. начато строительство первой промышленной установки в Бирме. Данных о завершении строительства, пуске и показателях работы нет. Исходные данные взяты из [6].

1.4. Процесс HSmelt разработан корпорацией HSmelt. Первоначально разрабатывался только корпорацией Rio Tinto, которой принадлежит 60 % акций корпорации HSmelt. Процесс испытывался на полупромышленной установке на металлургическом заводе в Западной Квинане (Австралия) с 1995 по 1999 г. Там же, в 2006 году пущена первая промышленная установка проектной производительностью 800 тыс. т чугуна в год. Сообщений о выходе на проектные показатели нет. Исходные данные взяты из [9].

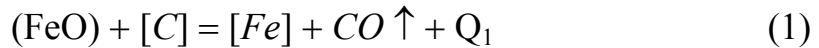
1.5. Процесс AusIron разработан компанией Ausmelt Ltd. Процесс испытывался на полупромышленной установке в Австралии с 1996 по 2001 г. Данных о строительстве промышленной установки нет. Исходные данные взяты из [8].

1.6. Процесс Technored разработан компанией Technored Ltd. Процесс испытывался на полупромышленной установке в Sao Paulo, Бразилия. Там же начато строительство первой промышленной установки производительностью 200 тыс. т. чугуна в год. Найденных данных для сравнения недостаточно.

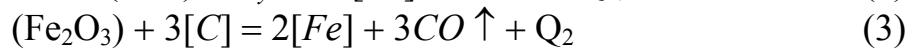
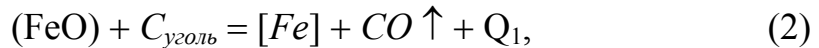
1.7. Процессы CCF и DIOS были испытаны на полупромышленных установках. В настоящее время работы по ним не ведутся. По процессу CCF (печь циклон-конвертер) были найдены материалы только на голландском языке. Трудности перевода не позволяют привести здесь какие-либо данные по этому процессу. Имеющиеся данные по процессу DIOS позволяют отнести его к явно бесперспективным.

2. Общие сведения о механизме жидкофазного восстановления

Жидкофазное восстановление железа из его оксидов происходит при контакте жидкого (отсюда название) железистого шлака с углеродом угля либо углеродом чугуна по следующим реакциям:



или



или



где $Q_1 = 266700$ кДж/кмоль FeO или $4762,5$ кДж/кг Fe;

$Q_2 = 822745,5$ кДж/кмоль Fe₂O₃ или 7346 кДж/кг Fe.

Доля жидкофазного восстановления железа газами (CO и H₂), как правило, невелика.

Как видно по величинам тепловых эффектов реакций (1) – (4), жидкофазное восстановление требует подвода большого количества теплоты. Как правило, жидкофазное восстановление железа осуществляется при температуре от 1350 °C до 1650 °C.

Учитывая значительное потребление теплоты при восстановлении оксидов железа по реакциям (1) – (4), а также то обстоятельство, что указанные реакции идут между жидкой и твердой фазами, в ПЖВ должны быть обеспечены большие поверхность контакта реагентов и тепловоспринимающая поверхность процесса для обеспечения высокой интенсивности работы агрегата.

В процессе жидкофазного восстановления время контакта углерода-восстановителя с жидкой ванной весьма мало и поэтому вследствие быстротечности процесса восстановление кремния, марганца и других характерных примесных элементов доменного чугуна практически не происходит, поэтому состав чугуна процесса жидкофазного восстановления существенно отличается от состава доменного чугуна. Вследствие этого и удельные затраты теплоты на производство чугуна ПЖВ должны быть заметно ниже таковых в доменной печи.

Абсолютным минимумом удельного расхода теплоты на производство, как известно, является тепловой дефицит процесса – ΔI . Ранее нами был определен тепловой дефицит ПЖВ для наиболее вероятных шихт [10]. Его величина колеблется в пределах $\sim 8,6 - 14$ ГДж/т чугуна, что соответствует удельному расходу условного топлива – b в пределах $295 - 480$ кг у.т./т чугуна. Если учесть, что потери теплоты (ПТ) собственно печью (агрегатом) ПЖВ составляют $5 - 15$ % от теплового дефицита, то минимальный удельный расход теплоты и условного топлива (при коэффициенте использования топлива (КИТ) $\eta = 100$ %) будет изменяться в пределах:

- при 5 % тепловых потерь $9 - 14,7$ ГДж/т, $b = 310 - 505$ кг у.т./т;
- при 15 % тепловых потерь $9,9 - 16$ ГДж/т, $b = 339 - 552$ кг у.т./т.

Если же взять КИТ на уровне его значения для доменной печи $\eta = 67\%$, то указанные величины составят:

- при 5 % тепловых потерь 13,5 – 22 ГДж/т, $b = 463 - 754$ кг у.т./т;
- при 15 % тепловых потерь 14,8 – 23,9 ГДж/т, $b = 506 - 824$ кг у.т./т.

При достижении указанных последними показателей тепловой работы, комплексы ПЖВ успешно заменят существующие доменные печи.

В литературе о ПЖВ встречаются значения удельных расходов условного топлива ниже 500 кг/т чугуна. Эти сведения являются, скорее всего, недостоверными.

3. Краткое описание процессов жидкофазного восстановления

3.1. Процесс Корекс

Схема технологического процесса приведена на рис. 1. Основные

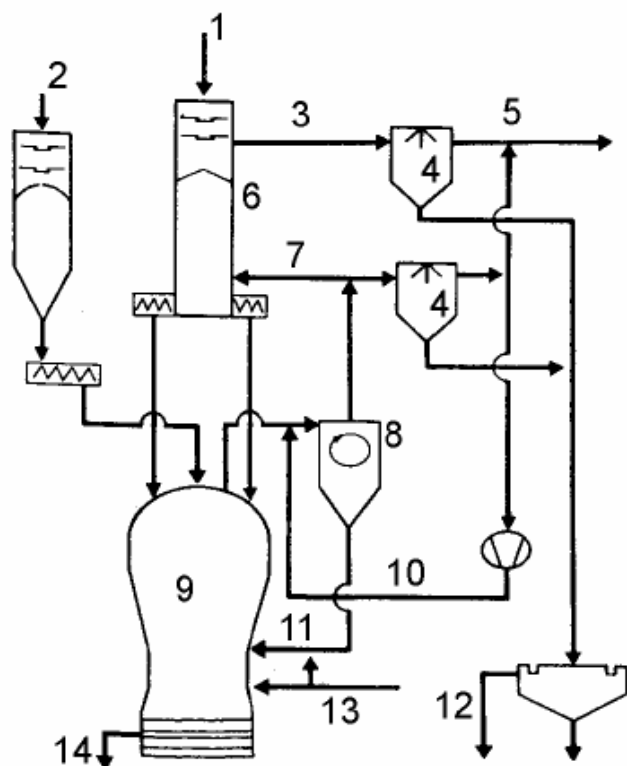


Рис. 1. Схема процесса Корекс:

- 1 – кусковая руда, окатыши, агломерат, добавки; 2 – уголь; 3 – колошниковый газ; 4 – скруббер; 5 – газ для использования на стороне; 6 – восстановительная шахта; 7 – восстановительный газ; 8 – циклон горячего газа; 9 – плавильно-газификационная камера; 10 – охлаждающий газ; 11 – пыль; 12 – пруд-отстойник; 13 – кислород; 14 – жидкий чугун и шлак

элементы установки Корекс: высокотемпературная плавильно-газификационная камера (плавильная печь); загрузочная камера для угля; восстановительная печь; скрубберы для очистки газа; циклонная батарея для горячего газа; сгуститель шлама после скрубберов.

Принцип работы следующий. В восстановительную печь загружают окискованное железосодержащее сырье ($Fe_{общ} = 62 - 63\%$), которое проходит навстречу горячему ($t = 800 - 850\text{ }^{\circ}\text{C}$) восстановительному газу и восстанавливается до губчатого железа. Степень металлизации – 95 – 96 %. Далее губчатое железо шнековым транспортёром подаётся в верхнюю часть плавильной печи. В плавильной печи происходит окончательное

восстановление железа, его науглероживание, расплавление и нагрев расплава до температуры выпуска (1500 – 1550 °С). Выпуски чугуна и шлака проводятся периодически через специальные лётки в нижней части плавильной печи.

Восстановительный газ образуется в плавильной печи, где газифицируется уголь, загружаемый сверху из загрузочной камеры посредством шнека. Температура газа составляет 1000 – 1300 °С (в зависимости от качества угля и его влажности), давление – до 5 бар. Выходящий из плавильной печи газ (1800 – 2000 м³/т угля) подстуживается до 800 – 900 °С и поступает в два параллельных циклона грубой очистки горячего газа. Уловленная пыль подаётся обратно в печь. Специальная кислородная горелка дожигает углерод пыли до СО, а также расплавляет золу и другие элементы пыли. Газы, выходящие из циклона, частично (~ 500 м³/т чугуна) идут на очистку в скруббер, где охлаждаются до 20 °С, а основной объём подаётся в восстановительную печь. Газ, выходящий из восстановительной печи, очищается и охлаждается в скруббере. Затем этот газ смешивается с газом, не прошедшим через восстановительную печь, и направляется внешним потребителям. Низшая теплота сгорания Корекс-газа около 7100 МДж/м³.

Центральной частью технологии Корекс является плавильная печь. Она предназначена для плавления предварительно восстановленного губчатого железа и для газификации угля в псевдоожиженном слое. Высота плавильной печи 25 – 30 метров. Рабочее пространство печи разделено на 3 зоны:

1) зона камеры успокоения (купол, головка). Предназначена для осаждения мелких частиц железа и угля, вылетающих из нижних зон и вносимых углём;

2) зона псевдоожиженного слоя. Предназначена для газификации угля;

3) зона плоскости кислородных фурм. Зона предназначена для расплавления губчатого железа. Температура в зоне около 2500 °С.

В верхней части головки имеются отверстия для подачи кусков угля размером от 0 до 30 мм посредством шнеков. Уголь высыпается в печь под действием силы тяжести. В головке печи уголь контактирует с газом (1000 – 1300 °С), в результате чего происходит его быстрое коксование; уголь подсушивается и измельчается. В псевдоожиженном слое кокс подвергается газификации кислородом, подаваемым через 12 радиальных фурм. Средняя температура в слое около 1600 °С. Также в верхней части головки расположены 6 отверстий для подачи кусков губчатого железа размером от 0 до 30 мм из восстановительной печи и 2 отверстия для выхода газа. Эти отверстия охлаждаются восстановительным газом, прошедшим очистку через скруб-

бер. Чуть выше псевдоожиженного слоя в печи имеется отверстие для возврата пыли, задержанной циклоном. Пыль транспортируется тем же охлажденным газом.

3.2. Процесс Dored

Схема процесса приведена на рис. 2. Основные элементы установки Dored: вращающийся конвертер 4, трубчатая печь 3, подвижная горловина 5, конвейер для подачи руды 1, конвейер для подачи коксика и извести 2, циклон для грубой очистки отходящих газов (не показан), электрофильтр либо скруббер, дымосос и дымовая труба (не показаны).

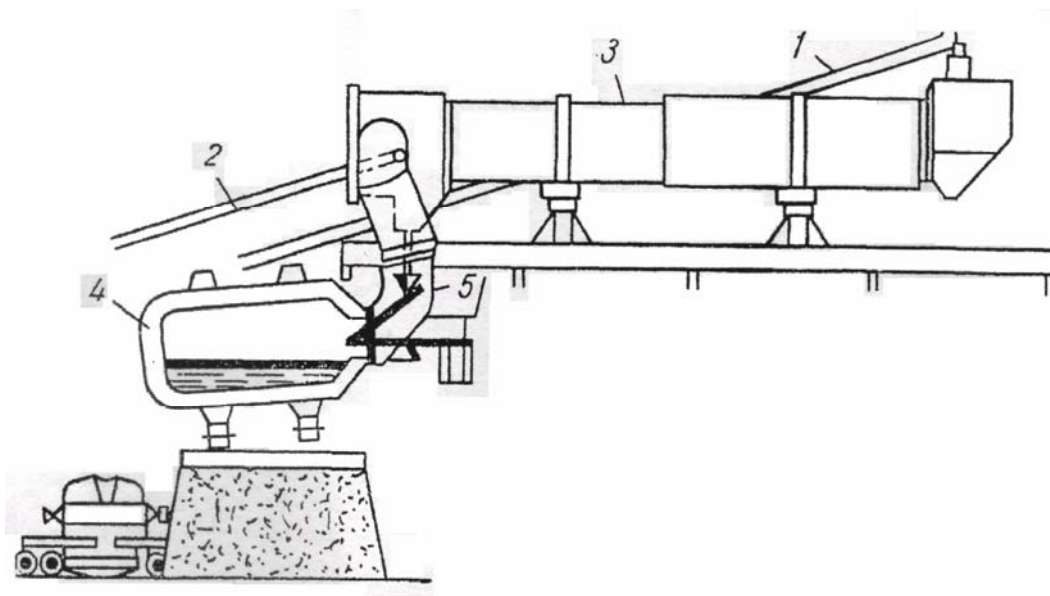


Рис. 2. Схема процесса Dored

Принцип работы следующий. Измельченное железосодержащее сырье (рудная мелочь, концентрат, шламы, пиритные огарки и т.п.) конвейером 1 подается в трубчатую печь 3. В трубчатой печи 3 железосодержащее сырье сушится и подогревается до 700 °С отходящими из конвертера 4 газами. Затем железосодержащее сырье через подвижную горловину 5 подается во вращающийся конвертер 4. Также в конвертер 4 через подвижную горловину 5 конвейером 2 подаются коксик и известь. Из подвижной горловины 5 шихта попадает на поверхность слоя шлака 6. За счет перемешивания шлака, вызванного вращением конвертера и кипением ванны, шихтовые материалы замешиваются в слой шлака 6. Железосодержащее сырье в слое шлака плавится и переходит в шлак, известь также растворяется в шлаке. Углерод коксика газифицируется либо непосредственно кислородом оксидов железа по реакциям (2) и (4) либо растворяется в железе и затем газифицируется по реакциям (1)

и (3), также углерод газифицируется кислородом дутья. Капли восстановленного железа опускаются через слой шлака 6, науглероживаются и образуют слой чугуна 8. Получившийся в результате газификации оксид углерода (II) дожигается в полости конвертера кислородом, поступающим через фурму 7. Степень дожигания ($\text{CO}_2 / (\text{CO}_2 + \text{CO})$) составляет 0,8 – 0,92. На входе в трубчатую печь 3 дымовые газы дожигаются подсосываемым через щели между горловиной и конвертером и горловиной и трубчатой печью воздухом. Для промышленного агрегата характерна работа с меньшей (~ 0,8) степенью дожигания.

Основным недостатком процесса Dored является высокий расход огнеупоров, но современные технологии торкретирования вновь позволяют рассматривать вопрос перспективности этого процесса.

3.3. Процесс Romelt.

Основные элементы установки Romelt: печь Romelt (схема печи приведена на рис. 3); котел-утилизатор – охладитель печных газов (КУ-ОПГ); установка высокотемпературного обогрева ковшей (УВТОК); установка грануляции шлака (УГШ); система химически очищенной воды; система испарительного охлаждения печи; расходные бункеры шихтовых материалов с конвейерами загрузки печи; система газоочистки (батареяный циклон и электрофильтр); дымосос с дымовой трубой; паровая турбина с генератором.

Принцип работы следующий. Из шихтовых бункеров железосодержащее сырье, уголь и известь конвейером подаются в загрузочное отверстие печи (схема печи Romelt приведена на рис. 3) и попадают на поверхность шлаковой ванны. Затем они должны, по мнению авторов процесса, замешиваться в ванну. В шлаковой ванне железосодержащее сырье плавится и переходит в шлак, известь также растворяется и переходит в шлак, уголь коксуется и газифицируется (за счет кислорода дутья и оксидов железа, продуктом газификации является монооксид углерода CO). Железо восстанавливается при контакте железосодержащего шлака с углеродом угля (по реакции (1) или (3)). Образующиеся капли железа науглероживаются, укрупняются и через слой спокойного шлака (12) опускаются на подину печи, при этом происходит восстановление железа из шлака углеродом чугуна (по реакции (2) или (4)).

Шлаковая ванна через 26 боковых фурм нижнего ряда (9) барботируется холодным кислородсодержащим ($\kappa_{\text{O}_2} = 0,6$) дутьем. Температура шлаковой ванны составляет 1500 – 1550 °С, металлической – 1450 – 1500 °С.

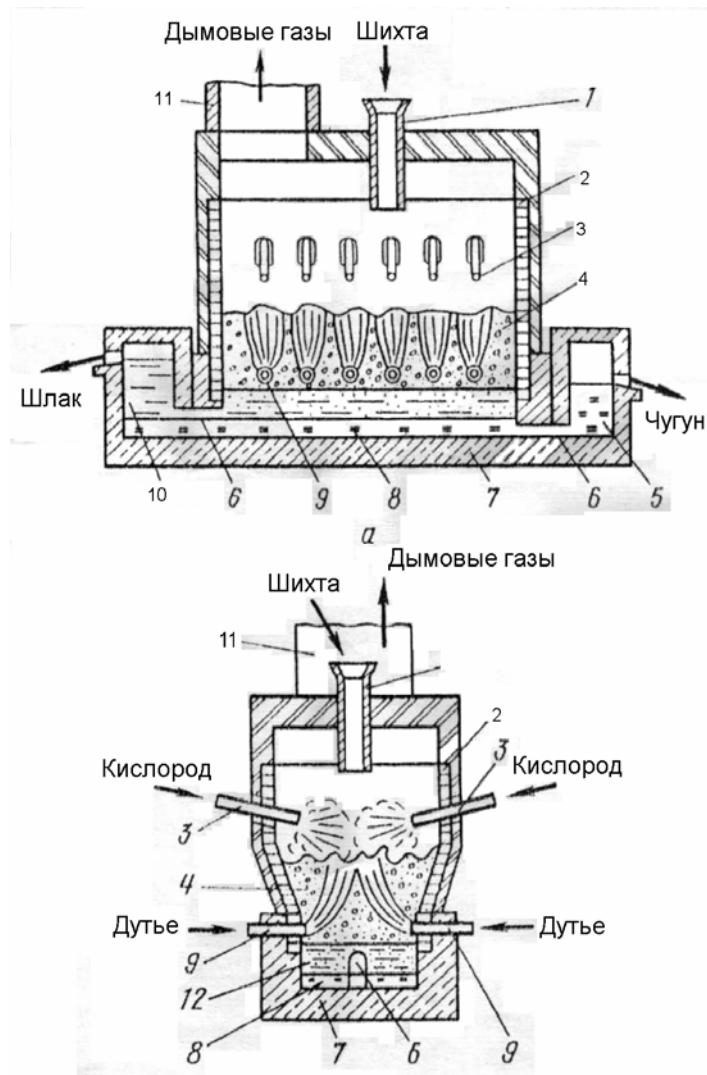


Рис. 3. Схема печи Romelt:

- 1 – загрузочная воронка; 2 – слой гарнисажа;*
- 3 – фурмы верхнего ряда; 4 – слой барботируемого*
- шлака; 5 – сифон для выпуска металла; 6 – перетоки;*
- 7 – подина; 8 – металлическая ванна; 9 – фурмы*
- нижнего ряда; 10 – сифон для выпуска шлака;*
- 11 – патрубок для отвода дыма;*
- 12 – слой спокойного шлака*

Рабочее пространство печи работает под незначительным разрежением. Выходящие из ванны газы частично дожигаются (степень дожигания 0,7) кислородом. Кислород для дожигания подается через 22 боковые фурмы верхнего ряда (3).

Температура уходящих из печи дымовых газов составляет 1750 – 1850 °С. Уходящие из печи дымовые газы полностью дожигаются в камине котла-утилизатора (КУ-ОПГ) атмосферным воздухом. Атмосферный воздух для дожигания подсасывается через зазор между кот-

лом-утилизатором и печью. Затем дым поступает на газоочистку. Газоочистка состоит из батарейного циклона (грубая очистка) и электрофилтра (тонкая очистка). Очищенный дым удаляется дымососом через дымовую трубу в атмосферу.

Чугун и шлак выпускаются из печи через чугунный (5) и шлаковый (10) сифоны соответственно. Чугун периодически выпускается в ковш. Шлак непрерывно выпускается и гранулируется непосредственно возле печи.

3.4. Процесс AusIron

Схема технологического процесса AusIron отличается от схемы технологического процесса Romelt незначительно. Отличие заключается в том, что в процессе AusIron в печь подается уголь двух различных марок двумя потоками. Антрацит (с низким содержанием летучих и низкой зольностью) подается в потоке вместе с железосодержащим сырьем и известью на поверхность ванны.

Антрацит в процессе используется, главным образом, в качестве восстановителя. Уголь энергетических марок (с высоким содержанием летучих и золы) подается через погружные фурмы и используется в качестве топлива.

Принцип работы следующий. Из шихтовых бункеров железосодержащее сырье, уголь и известь конвейером подаются в загрузочные отверстия печи (схема печи AusIron приведена на рис. 4) и попадают на поверхность шлаковой ванны. Затем они замешиваются в ванну, где железосодержащее сырье плавится и переходит в шлак, известь также растворяется и переходит в шлак, уголь коксуется и газифицируется. Железо восстанавливается при контакте железосодержащего шлака с углеродом угля (по реакции (1) или (3)). Образующиеся капли железа науглероживаются, укрупняются и опускаются на подину печи, при этом происходит восстановление железа из шлака углеродом чугуна (по реакции (2) или (4)).

В шлаковую ванну через нижний ряд сопел погружных фурм подается холодное кислородсодержащее ($k_{O_2} = 0,6$) дутье и газовый уголь. При этом подаваемый через фурмы уголь сгорает полностью (до CO_2 и H_2O , по сведениям разработчиков) в шлаковой ванне. В зависимости от требуемой производительности на печи устанавливаются две либо три погружные фурмы.

Через верхний ряд сопел погружных фурм подается холодное кислородсодержащее дутье ($k_{O_2} = 0,4$) для дожигания монооксида углерода, образовавшегося при восстановлении железа. Степень дожигания составляет 95 – 100 %.

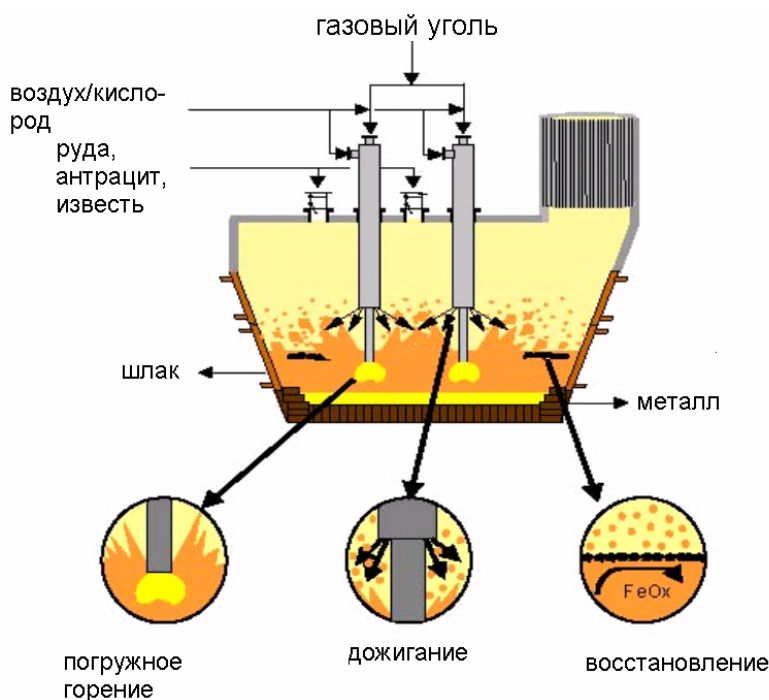
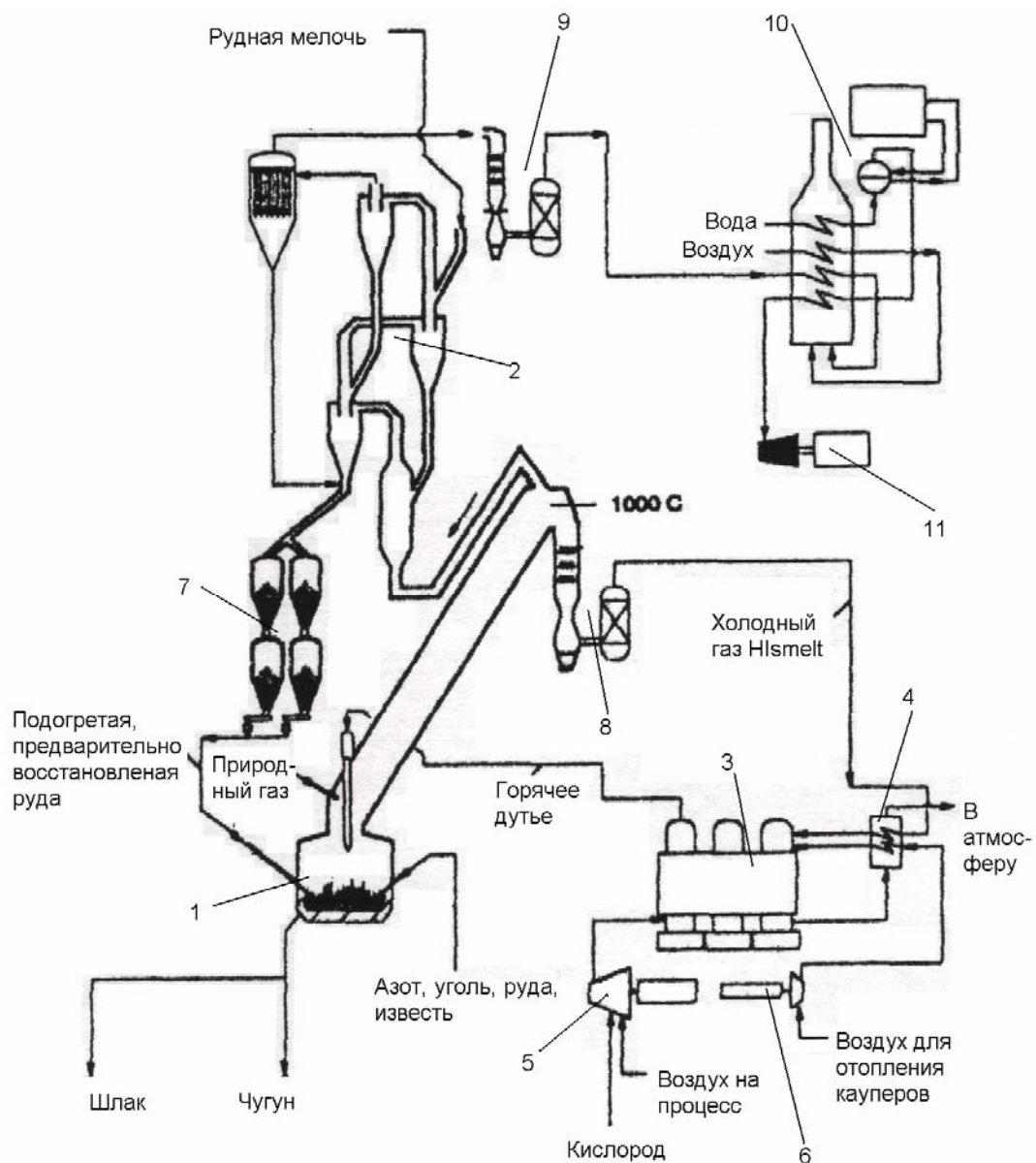


Рис. 4. Схема печи AusIron

3.5. Процесс HIs melt

Схема технологического процесса HIs melt приведена на рис. 5. Принцип работы следующий. Рудная мелочь из шихтовых бункеров загружается в установку предварительного подогрева и восстановления 2. Подогретая до 700 °С и частично восстановленная руда вместе с известью, углем и азотом подается в инжекционную систему 7. Затем взвешенная в потоке азота шихта вдувается в печь HIs melt 1 через инжекционные фурмы. Также в печь HIs melt подается подогретое до 1200 °С дутье, содержащее 30 % об. кислорода. Процесс ведется под давлением $\approx 2,5$ атмосферы. Дутье подогревается в кауперах 3. Компоненты дутья (кислород и воздух) подаются в кауперы посредством турбовоздуходувки 5. Воздух для отопления кауперов подается турбовоздуходувкой 6 и подогревается в рекуператоре 4. Там же подогревается и идущий на отопление кауперов газ HIs melt. Непрерывно выпускаемый из печи чугун разливается в чушки. Периодически выпускаемый шлак гранулируется возле печи.

Отходящие из печи газы с температурой 1550 – 1650 °С поступают в котел-утилизатор. На входе в котел-утилизатор в отходящие газы добавляется природный газ. В котле-утилизаторе происходит конверсия природного газа содержащимися в отходящих газах диоксидом углерода и водяным паром. Полученный таким образом газ HIs melt с температурой ≈ 1000 °С разделяется на две, примерно равные части. Одна часть подается на мокрую газоочистку 8 и, затем, – на отопление кауперов 3.



*Рис. 5. Схема промышленной установки HIsmelt:
 1 – печь HIsmelt; 2 – установка для предварительного подогрева и восстановления рудной мелочи; 3 – кауперы; 4 – рекуператор для подогрева воздуха и газа, идущих на отопление кауперов; 5 – турбовоздуходувка для дутья процесса; 6 – турбовоздуходувка для воздуха, идущего на отопление кауперов; 7 – установка для инъекции шихты процесса; 8 – мокрая газоочистка для газа HIsmelt, идущего на отопление кауперов; 9 – мокрая газоочистка для отработанного газа HIsmelt; 10 – котел; 11 – паровая турбина с генератором*

Воздух и газ HIsmelt, используемые для отопления кауперов, подгреваются в рекуператорах 4 отходящим из кауперов дымом. Про-

шедший через рекуператоры 4 дым через дымовую трубу выбрасывается в атмосферу.

Другая часть используется в системе предварительного нагрева и восстановления руды 2. Отработанный газ HSmelt поступает на мокрую очистку 9, а затем сжигается в котле 10.

4. Общие и отличительные черты процессов

Наиболее сильно отличается от остальных рассмотренных процесс Согех. Отличие состоит в том, что большая часть железа восстанавливается газом в твердой фазе. Поэтому его нельзя отнести целиком к жидкофазным. Другое отличие состоит в том, что для плавления шихты и восстановления железа в плавильно-газификационной печи используется только теплота неполного горения углерода. В других процессах имеется стремление к возможно более полному сжиганию газифицированного топлива в рабочем пространстве печи с целью обеспечения теплотой технологического процесса при минимальных удельных расходах топлива и кислорода. Также процесс Согех отличается тем, что в нем используется окомкованное высококачественное железорудное сырье, тогда как в других рассматриваемых процессах могут использоваться дисперсные материалы. Т.е., при работе на шламах и другом подобном сырье процесс не имеет будущего. Помимо прочего, процесс Согех отличается большей величиной удельных капитальных затрат.

Оставшиеся четыре нерассмотренных процесса имеют значительно большее сходство между собой. Наиболее отличается от остальных трех процесс Dored. Отличия заключаются в том, что: а) перемешивание ванны осуществляется механически, тогда как в процессах Romelt, HSmelt и AusIron оно осуществляется пневматически; б) передача теплоты из зоны дожигания в ванну осуществляется при периодическом контакте футеровки то с факелом, то со шлаком в ванне, тогда как в других процессах теплота из зоны дожигания передается в ванну стекающей по водоохлаждаемым стенкам шлаковой пленкой. В связи с этим, для процесса Dored характерны меньшие удельные потери тепла рабочего пространства и, следовательно, меньший удельный расход топлива, а также намного больший расход огнеупоров.

Три оставшихся процесса имеют еще большее сходство. Наиболее сильно отличается процесс HSmelt. Имеются следующие отличия: а) процесс ведется под давлением, (два оставшихся процесса – под разрежением) что позволяет утилизировать часть теплоты отходящих из печи-конвертера HSmelt газов в самом процессе для подогрева дутья и железосодержащих материалов (в процессах Romelt и AusIron

используются холодные дутье и железосодержащие материалы; б) ванна барботируется азотом, со струей которого и подаются все шихтовые материалы, тогда как в процессах Romelt и AusIron для барботажа используется обогащенное кислородом дутье, а шихтовые материалы подаются (в процессах Dored и Romelt – все, в процессе AusIron – большая часть) на поверхность ванны; в) по данным разработчиков, преобладает восстановление по реакциям (1) и (3) (углеродом чугуна), тогда как в процессах Dored, Romelt и AusIron преобладает восстановление по реакциям (2) и (4) (углеродом угля). Благодаря этому для процесса Hsmelt характерны меньшие, чем в процессах Romelt и AusIron, удельные расходы топлива и кислорода и большие удельные капитальные затраты.

Отличие между процессами Romelt и AusIron заключается в организации сжигания топлива. Так, в процессе Romelt происходит газификация замешанного в шлаковую ванну угля дутьем барботажных фурм, а в процессе AusIron в шлаковой ванне идет полное сжигание топлива (газового угля), подаваемого вместе с дутьем.

Таким образом, в процессе Romelt необходимо над ванной дожечь водород летучих угля и монооксид углерода, полученный при газификации угля кислородом дутья и кислородом оксидов железа, а также угольную пыль, выносимую из ванны. В процессе AusIron – только монооксид углерода, образующийся при восстановлении железа и смешанный с продуктами полного горения угля в ванне. В процессе Dored – только монооксид углерода, образующийся при восстановлении железа. В процессе Hsmelt же необходимо дожигать монооксид углерода, образующийся при восстановлении железа и смешанный с азотом, несущим угольную пыль.

Из опыта работы мартеновских печей известно, что над ванной невозможно полностью дожечь выделяющиеся газы. Степень дожигания (определяемую как $(CO + H_2) / ((CO + H_2 + CO_2 + H_2O))$) зависит, главным образом, от количества и теплоты сгорания (калорийности) выделяющихся газов. Несколько меньше степень дожигания зависит от количества и расположения фурм подачи дутья для дожигания и содержания кислорода в подаваемом на них дутье.

Сравнительные показатели работы процессов бескоксового получения чугуна, в расчете на 1 т чугуна

№	Вид процесса		Corex	Dored	Romelt	Hlsmelt	AusIron
	Показатели процесса						
1	Расход угля	кг	995-1050	470-490	1345-1375	620	700-850
		ГДж	31,8-33,6	13,54-14,12	31-31,68	18,02	20,5-24,9
2	Расход кислорода	м ³	530-550	420	895-910	140-150	460-507
		ГДж	10,86-12,9	9,25	18,6-20,2	2,9-3,1	9,43-10,39
3	Расход сжатога воздуха	м ³	0	0	300-315	1090-1825	472-520
		ГДж	0	0	0,054-0,056	0,584-0,977	0,084-0,93
4	Расход природного газа	м ³	0	0	0	50,8	0
		ГДж	0	0	0	2,2	0
6	Расход электроэнергии	кВт·ч	68,89	17,78	0	0	0
		ГДж	0,62	~0,16	0	0	0
7	Расход огнеупоров	кг	2	10	2-3	2	2-3
		ГДж	5,86	29,3	5,86-8,79	5,86	5,86-8,79
8	Расход извести	кг	445	120-135	170-175	185-190	185-190
		ГДж	0,091	0,547-0,615	0,775-0,798	0,843-0,846	0,843-0,846
9	Расход железорудного сырья	кг	1450-1500	1710-1730	1580-1585	1620-1625	1620-1625
		ГДж	8,7-9	7,77-7,9	7,22-7,24	7,4-7,42	7,4-7,42
10	Суммарный расход тепла на процесс	ГДж	57,936-60,446	60,567-61,345	63,509-68,764	37,807-38,423	44,117-52,439
11	Суммарный расход условного топлива на процесс	кг	1977,3-2063	2067-2093,7	2167,5-2346,9	1290,3-1311,4	1505,7-1789,7
12	Выработка электроэнергии	кВт·ч	0	0	1100-1200	305	180-260
		ГДж	0	0	9,98-10,8	2,745	1,62-2,34
13	Выработка искусственного топлива	ГДж	12,983	0	0	0	0

Наименьшее количество теплоты (физической и химической) выносится отходящими из ванны газами в процессе Dored. Затем, в порядке возрастания количества выносимой из ванны теплоты, следуют процессы AusIron, Hsmelt и Romelt. В том же порядке расположены достижимые в этих процессах степени дожигания и, соответственно, КИТы плавильных печей этих процессов. В процессе Hsmelt теплота отходящих газов используется для подогрева дутья и железосодержащего сырья, поэтому совокупный КИТ процесса повышается. Газ процесса Corex используется как самостоятельное топливо.

5. Выводы

Из рассмотренной таблицы сравнительных показателей следует, что к настоящему времени суммарный расход условного топлива у всех видов агрегатов ПЖВ не ниже, чем в аглококсодоменном производстве (полная энергоемкость доменного чугуна, рассчитанная аналогично полной энергоемкости ПЖВ, составляет 30 – 35 ГДж/т). Это, по-видимому, связано с недостаточной проработанностью ПЖВ вообще, и всех агрегатов, в частности.

Наиболее низкий суммарный удельный расход условного топлива показывает процесс Hsmelt. Это объясняется тем, что схема процесса Hsmelt наилучшим образом проработана в теплотехническом отношении по сравнению с другими процессами. Этот эффект получен благодаря хорошему использованию собственных вторичных энерго-ресурсов процесса для подогрева дутья в доменных воздухонагревателях и предварительного нагрева и восстановления шихты. Затем, по эффективности, следует процесс AusIron, в котором, согласно литературным данным, обеспечивается высокий коэффициент использования тепла топлива основного агрегата (благодаря почти полному сжиганию топлива и обогащению дутья кислородом). Как и следовало ожидать, наибольший расход условного топлива имеется в процессе Romelt, поскольку теплотехническое его обеспечение находится на весьма низком уровне. За ним следует процесс Dored, имеющий те же технологические достоинства, что и процессы Romelt и AusIron. Несмотря на эффективную организацию тепломассообменных процессов в ванне и высокий коэффициент использования тепла топлива, очень высокий удельный расход огнеупоров понижает, в целом, его эффективность. Стоящий особняком процесс Corex, несмотря на достаточно высокий уровень организации процесса имеет высокий удельный расход условного топлива, что связано с использованием высококачественной шихты и дорогих энергоносителей.

Хотя по суммарным экономическим показателям надежные данные в литературе отсутствуют, можно отметить, что и в этом отноше-

нии процесс Hismelt в настоящее время является наилучшим. На втором месте по суммарным экономическим показателям находятся процессы AusIron и Corex (с учетом производства на сторону искусственного топлива).

Список литературы

1. Развитие бескоксовой металлургии / Тулин Н.А., Кудрявцев В.С., Пчелкин С.А. и др. / Под ред. Тулина Н.А., Майера К. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.

2. Свинолобов Н.П., Бровкин В.Л. Печи черной металлургии: Учебное пособие для ВУЗов. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 154 с.

3. Бем К., Эберле А., Айхбергер Э. и др. // Результаты двухлетней эксплуатации установки COREX в Южной Корее. – Черные металлы. – 1998. – Ноябрь-декабрь. – С. 20 – 26.

4. Роменец В.А. Процесс жидкофазного восстановления железа: разработка и реализация// Сталь. – 1990. – № 8. – С. 20 – 27.

5. Ничипоренко А.И., Баласанов А.В., Усачев А.Б. Статистические характеристики жидкофазного восстановления железа // Известия ВУЗов, Черная металлургия. – 1990. – № 9. – С. 104 – 105.

6. Соловьев А.Н., Левин М.Я., Валавин В.С., Вандарьев С.В., Чайкин Б.С. Инженерные аспекты установок РОМЕЛТ // Сталь. – 2001. – № 2. – С. 60 – 64.

7. Кожевников И.Ю. Бескоксовая металлургия железа. – М.: Металлургия, 1970. – 328 с.

8. Sherrington D., McClelland R. and Campbell G. The Ausiron® Direct Smelting Technology // AISE 2002 Pittsburgh, Pennsylvania, USA, September 2002.

9. Bates P., Muir A. Hismelt – low cost iron making // International conf. «Commercializing new hot metal processes beyond the blast furnace», 2000, Atlanta, Georgia, USA. June 5-7. – P. 1 – 12.

10. Абраменков Ю.Я., Стригунов Н.А. К вопросу о тепловом дефиците процесса жидкофазного восстановления «Ромелт» // Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць НМетАУ. У двох книгах. – Книга друга. – Дніпропетровськ: Пороги, 2005. – 460 с.

Рукопись поступила 10.06.2008 г.