



*Analysis of existing methods of ferric oxide restoration is given.*

*А. Н. КРУТИЛИН, М. Н. КУХАРЧУК, О. А. СЫЧЕВА, Г. В. СТАСЕВИЧ, БНТУ*

УДК 669.181

## К ВОПРОСУ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКАЛИНЫ

Современный научно-технический прогресс неразрывно связан с комплексным использованием вторичного сырья. На машиностроительных и металлургических предприятиях Беларуси образуется большое количество железосодержащих отходов в виде окалины, содержащей дорогостоящие легирующие элементы, такие, как Mo, V, Co, W, Cr, Ni и т. д.

Учитывая постоянный рост цен на железорудное сырье, наиболее перспективным вариантом переработки окалины является использование ее в качестве шихтовых материалов при выплавке чугуна и стали. Использование окалины в качестве относительно дешевого сырья для металлургического производства значительно снижает затраты на шихтовые материалы.

В связи с отсутствием в Беларуси технологии и оборудования для восстановления и переработки отходов в виде окалины практически не используются и при складировании оказывают вредное воздействие на окружающую среду. Рациональное использование материальных и топливно-энергетических ресурсов, ужесточение природоохранного законодательства способствуют поиску наиболее экономичных способов переработки окалины. Очевидно, что в наших условиях экономически нецелесообразно централизованно перерабатывать окалину. Наиболее предпочтительным вариантом является восстановление и повторное использование окалины непосредственно на предприятиях где она образуется, причем очень важно разделение окалины легированных и углеродистых сталей.

Создание эффективных технологических процессов и небольших по габаритам высокопроизводительных установок для переработки окалины является важнейшей народнохозяйственной задачей.

С точки зрения механизма восстановления железа все существующие процессы можно разделить на три группы.

1. Процессы восстановления твердой металло-содержащей шихты с использованием твердых (кокс, сажа) или газообразных смесей (метана, водорода или других углеводородов), а также продуктов их частичного сжигания (CO) и расщепления аммиака. При использовании твердого углерода прямой контакт между твердым восстановителем и металло-содержащей шихтой ограничен. Процессы науглероживания, образования карбида  $Fe_3C$  и другие для процесса восстановления не существенны. Восстановление  $Fe_3O_4$  с помощью CO при температуре ниже  $650\text{ }^\circ\text{C}$  не представляет интереса, в этом случае практически не происходят сколько-нибудь значительные превращения.

2. Жидкофазное восстановление происходит в шлаковом расплаве оксидов. Коэффициенты диффузии между двумя взаимодействующими фазами примерно на пять порядков выше, чем при восстановлении твердым углеродом.

3. Комбинированные процессы.

Понимание механизма восстановления позволяет грамотно подойти к вопросу рационального технологического и конструктивного решения для реализации процесса восстановления.

В мировой практике известны различные способы бескоксового восстановления железосодержащих отходов и руды, минуя наиболее распространенный способ переработки их в доменной печи. Развитие бескоксовых процессов обусловлено в первую очередь экономическими соображениями, возможностью удешевления используемой для получения металла энергии, а также стремлением к получению альтернативного металлорудного железосодержащего материала.

В работе [1] приведена классификация наиболее известных технологических процессов восстановления железа с помощью кокса, угля и природного газа. Представленные технологические про-

цессы ориентированы на переработку больших объемов железосодержащего сырья.

При производстве металлизированного сырья основной статьей издержек являются затраты на восстановитель. Наиболее перспективно использование в качестве восстановителя природного газа. Однако использование дорогостоящего природного газа существенно снижает экономическую эффективность процесса, а использование энергетического угля ухудшает качество продукта, получаемого в виде губки или порошка для последующей переплавки в дуговых печах. Между тем, желание вернуть в производство образующуюся на предприятиях Беларуси окалину, в том числе содержащую большое количество легирующих элементов, может принести гораздо больший экономический эффект.

Среди процессов, доведенных до промышленного применения, можно выделить Midrex, HYL-III, Corex, Circofer.

Представляет интерес процесс HIL-III, в котором первоначально для восстановления использовали природный газ, а позднее и другие виды топлива – уголь, нефтяной кокс, древесный уголь. Предварительная газификация топлива позволяет использовать синтезированный газ, обогащенный водородом и содержащий монооксид углерода.

Восстановление железной руды происходит в реакторе, который представляет собой шахтную печь. Реактор выполнен в виде сосуда высокого давления, изготовленного из толстолистовой углеродистой стали, внутри он футерован изоляционным бетоном и огнеупорным кирпичом. Восстановительный газ поступает в реактор через распределительный канал и выходит из него в верхней части печи по каналу с огнеупорной футеровкой, находящемуся в стороне от входа твердых частиц. Газ из газонагревателя равномерно распределяется по каналу и при температуре 930 °С поступает в реактор противотоком к движению железной руды, восстанавливает железо из оксидов, при этом часть водорода и оксида углерода окисляются до водяного пара и углекислого газа. При таком движении восстановительный потенциал газа используется максимально. Разработанный процесс позволяет получать конечный продукт со степенью металлизации 95% и выше.

В последние годы в твердофазных процессах с шахтными печами начали использовать новые технологические решения. Процесс восстановления интенсифицируют путем вдувания кислорода в восстановительный газ, идущий на металлизацию, что позволяет увеличить температуру восстановительного газа. Качество восстановительного

газа с кислородом ниже, однако более высокая температура усиливает кинетику процессов восстановления и увеличивает производительность печи металлизации. Нанесение защитных покрытий на окисленные окатыши с целью избежания их слипания позволяет повышать температуру восстановления при металлизации. Для улучшения газодинамики в шахтных печах повышают давление.

Конечный продукт в виде губчатого железа или брикетов, полученных путем деформирования в горячем состоянии, может использоваться при выплавке стали.

Представляет интерес система HYTEMP iron – пневматической транспортировки горячего губчатого железа, которое при температуре ~700 °С перемещается в изолированные бункера с инертным газом. Такая технология позволяет не только увеличить производительность установки на 20%, но и экономить порядка 25% электроэнергии.

Среди процессов жидкофазного восстановления наиболее готовыми для промышленного освоения являются процессы ROMELT, Ausiron, Hismelt, Dios. Различие этих процессов состоит в конструктивных особенностях используемых агрегатов, связанных со способами подачи углерода в жидкую ванну, интенсивностью и способами перемешивания ванны, составом исходных материалов.

Процесс ROMELT [2] является одностадийным и осуществляется следующим образом. В шлаковый расплав непрерывно подают шихту, включающую железосодержащий материал, твердое углеродистое топливо и флюс. Формирование шлакового расплава происходит в результате плавления и растворения железосодержащего сырья, золы угля и флюса при интенсивном перемешивании ванны газами. Железосодержащий материал плавится, содержащиеся в нем оксиды металлов переходят в шлак, железо восстанавливается углеродом топлива с образованием расплава, который собирается на поде печи. С помощью кислородсодержащего дутья расплав барботируют, кислород окисляет часть топлива с выделением тепла. Барботаж обеспечивает необходимое замешивание подаваемого сверху угля в шлаковую ванну и быстрое растворение оксидного сырья. Уголь не только выполняет роль восстановителя монооксида железа, но и обеспечивает генерацию тепла в самой шлаковой ванне за счет частичного его окисления до СО кислородом дутья. Над уровнем барботируемого расплава подают кислородсодержащее дутье для дожигания выделяющихся из ванны газов, выделяющееся тепло служит основным источником энергии для процесса. При увеличении степени дожигания снижается расход топлива и увеличивается произ-

водительность процесса. Кислородсодержащее дутье представляет собой смесь кислорода и сжатого воздуха, содержание кислорода в дутье можно регулировать. Предварительный подогрев дутья позволяет снизить расход кислорода. Образующийся шлак и металл отдельно с помощью сифонных устройств, без напора непрерывно или периодически выпускают из печи. Шлак, содержащий 1,5–2,55% железа, по составу близок к доменному шлаку. Однако по сравнению с доменным процессом он может изменяться в более широком интервале основностей шлака. Металл содержит около 4,5% углерода, ввиду низкого содержания Si и Mn (до 0,15%) может быть использован в качестве жидкого полупродукта для производства стали в кислородных конверторах, дуговых электропечах, установках внепечного рафинирования и других агрегатах.

Высокотемпературные технологические газы являются полезным продуктом плавки, их тепло можно использовать в котле-утилизаторе для производства пара. Газы имеют низкое содержание вредных примесей и после несложной очистки сбрасываются в атмосферу. Выносимая из печи пыль улавливается системой газоочистки и возвращается в печь. Это делает процесс практически безотходным.

Основные технико-экономические преимущества процесса.

1. Восстановление железа происходит из расплава, что открывает возможность переработки его без окускования и классификации по размерам. Это позволяет перерабатывать железорудную мелочь, железорудную пыль, шламы и другие низкосортные виды сырья, в том числе руды с относительно низким содержанием железа (в пределах 45–55%), что обеспечивает существенную экономию капитальных и эксплуатационных затрат. Замена кокса углем исключает капитальные затраты и текущие издержки на его производство. При этом отсутствует необходимость предварительной подготовки железосодержащей шихты.

2. Установка является энерготехнологическим агрегатом, в котором вся энергия расходуемого угля используется полезно для восстановления железа и производства энергии в виде пара или электроэнергии. Эта энергия полностью покрывает внутренние потребности, связанные с производством кислорода.

3. В конструкции установки используется стандартное оборудование, широко применяемое в практике металлургического производства (ленточные конвейеры, котел-утилизатор, горизонтальные фурмы, газоочистка, дымосос и др.). В реакционной

зоне взамен огнеупорной футеровки применяются медные водоохлаждаемые кессоны. К принципиальным моментам можно также отнести использование отдельных сифонных выпусков металла и шлака через отстойники, что существенно снижает трудоемкость обслуживания агрегата.

Процесс можно использовать для переработки железосодержащих отходов, в том числе сталеплавильных шлаков с высоким содержанием примесей цветных металлов, в частности цинка и свинца. Это практически решает проблему качества стали из-за накопления нежелательных примесей, а также создает возможность улавливания соединения цветных металлов для последующего извлечения из них первичных металлов.

Производительность процесса 300–400 тыс. т в год. Агрегат жидкофазного восстановления более компактен, чем агрегат твердофазного восстановления. Основными направлениями развития в жидкофазных процессах являются повышение степени использования тепла и скорости восстановления оксидов. К недостаткам данного процесса следует отнести пониженный по сравнению с доменным процессом тепловой КПД и низкую скорость восстановления. Кроме того, создание и монтаж новых установок жидкофазного восстановления требуют значительных первоначальных инвестиций.

Среди технологий, сочетающих твердо- и жидкофазное восстановление, необходимо выделить двухстадийный процесс Cogex, разработанный в конце 70-х годов в Германии.

Процесс восстановления происходит в две стадии в разных агрегатах, представляющих по существу шахту и горн доменной печи. В шахтную печь, подобную печи процесса Midrex, загружают подготовленное железорудное сырье в виде окисленных окатышей с возможным добавлением кусковой, богатой железом руды. Твердофазное восстановление оксидов железа проводят на 90% восстановительным газом из реактора, в котором происходит газификация энергетического угля с помощью кислорода. В последнем агрегате происходит плавление губчатого железа, получаемого на первой стадии в шахтной печи, и восстановление монооксида железа с получением жидкого чугуна, подобного по химическому составу доменному чугуну.

Производительность установок достигает 700 тыс. т в год. Технологические особенности процесса обуславливают потребность в использовании довольно сложных вспомогательных агрегатов и механизмов, поэтому конструктивные размеры установки превышают размеры доменной печи аналогичной мощности. Из-за наличия первой ста-

дии восстановления этот процесс имеет более высокий расход топлива, чем доменный процесс. Однако отсутствие коксохимического блока позволяет в целом сократить материальные издержки.

В промышленном масштабе используется процесс FIOR, в котором восстановление железорудной мелочи размером менее 13 мм осуществляется в четырех реакторах кипящего слоя. Восстановительный газ содержит около 90%  $H_2$ , восстановление проводят при температурах 700–800 °С. Metallized продукт подвергают горячему брикетированию на валковом прессе. Восстановление в кипящем слое позволяет получать metallized брикеты из мелочи железных руд без ее предварительного окомкования.

Преимуществами комбинированных процессов являются более рациональное использование тепла отходящего газа и более высокая степень использования восстановителя.

Возможности твердофазного углетермического восстановления далеко не исчерпаны и применительно к восстановлению окалины данный процесс наиболее предпочтителен. В качестве восстановителя можно использовать синтезированный газ, полученный путем газификации из древесного угля. Восстановление окалины можно ускорить за счет активации диффузионных процессов. Этот процесс более гибок с точки зрения переработки сравнительно небольших объемов окалины применительно к конкретным условиям производства.

### Литература

1. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Плющевский И. Н., Корнеев С. В. Перспективы производства и использования metallized сырья для получения высококачественных марок стали. Сообщение 1. Анализ современных схем получения metallized сырья // *Литье и металлургия*. 2009. № 1. С. 134–138.
2. Романец В. А. Процесс Ромелт – производство металла внедоменным и бескоксным способом в черной металлургии // *Фундаментальные проблемы Российской металлургии на пороге XXI в.* 1998. Т. 1. С. 308–305.