



The article is devoted to research of process of the iron-containing waste recycling in rotary tilting furnaces, in particular, to the phenomenon of formation of ball iron at transition from hard-phase to liquid-phase stage of iron restoration from scale.

С. Л. РОВИН, РУП «Технолит», Л. Е. РОВИН, Т. М. ЗАЯЦ, ГГТУ им. П. О. Сухого,
Н. Г. КИСЛИЦЫНА, ОАО «БМЗ»

УДК 621.74

КРИЧНАЯ СТАДИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ В РОТАЦИОННЫХ ПЕЧАХ

Рециклинг железосодержащих окисленных металлоотходов в ротационных наклоняющихся печах (РНП) представляет собой новый процесс, осуществляемый последовательно по схемам твердо- и жидкофазного восстановления в одном агрегате, работающем в методическом режиме.

В настоящее время для прямого внедоменного получения железа (ПВЖ) используется либо твердофазный процесс получения губчатого железа (металлизированных окатышей или брикетов), либо жидкофазный с получением жидкого чугуна. Дальнейшая обработка (переплав) полученных материалов ведется в традиционных печах, в основном дуговых.

Твердофазное восстановление (ТФВ) осуществляется при температурах 900–1100 °С и требует достаточно длительного времени – до 30–60 ч. Привлекательность процесса объясняется сравнительно низкими удельными затратами энергии (~2,6–3,5 МВт/т). Различными способами по схеме ТФВ производится сейчас около 10% восстановленного железа.

Жидкофазное восстановление – процесс, отличающийся высокими скоростями и соответственно производительностью. Однако значительно более высокие расходы энергии (топлива и/или электроэнергии, кислорода, восстановителей) ограничивают использование установок ЖФВ на уровне экспериментальных или полупромышленных.

По промежуточной схеме восстановления оксидов с получением кричного железа работает ограниченное количество установок на бедных рудах. Причем производительность этих установок ниже, а энергозатраты еще выше: 33 000–42 000 МДж/т, не считая твердых восстановителей (около 1 т на 1 т железа), кислорода и флюсов (5–6%). Для производства гранул кричного железа

используют барабанные печи длиной 60–110 м и диаметром 3,6–4,6 м [1, 2].

Кричное восстановление предварительно подготовленной гранулированной руды ведут при температурах 1200–1330 °С. Длительность процесса – 6–8 ч, из них – 5–6 ч непосредственно крицеобразование. Степень извлечения железа 80–90%, при максимальном 92–95%.

Интерес металлургов к кричной стадии восстановления сохраняется. Это объясняется рядом причин. Низкотемпературное восстановление оксидов железа при $t \leq 900$ °С не обеспечивает полного извлечения Fe, особенно при высоком содержании вюститита (FeO). После достижения 50–60%-ной металлизации процесс восстановления замедляется пропорционально степени металлизации.

Для ускорения процесса необходимо повысить температуру:

$$W = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

где E – энергия активации реакции (FeO + CO); k_0 – константа скорости химической реакции; R – газовая постоянная; T – температура процесса.

В современных установках ТФВ температуру поддерживают на уровне 1100 °С. Ограничение вызвано тем, что далее процесс переходит в стадию кричного восстановления с образованием расплава шлаков и спеканием гранул восстанавливаемого материала.

Таким образом, ускорение процесса за счет повышения температуры приводит к спеканию шихты и естественно к замедлению тепломассообменных процессов.

Как результат этого противоречия – параллельное развитие двух отдельных направлений в технике внедоменной металлургии железа – ТФВ

и ЖФВ. В последнем оксиды восстанавливаются в расплаве шлака при температурах 1500–1750 °С, что резко сокращает продолжительность процесса, но увеличивает энергозатраты.

Одно из важнейших преимуществ РНП по сравнению с применяемыми сегодня установками ПВЖ заключается в технологической мобильности, что позволяет осуществить процесс восстановления в наиболее энергетически выгодном режиме: вначале при $t = 900\text{--}1000^\circ\text{C}$, а после достижения уровня металлизации 60–70% без перегрузки и охлаждения металла перевести печь в режим ЖФВ. Таким образом, весь процесс восстановления провести в наиболее выгодном термодинамическом режиме.

Перевод печи из низкотемпературного в высокотемпературный режим невозможно осуществить, минуя стадию кричного железа. Первые попытки осуществления процесса рециклинга окалины во время экспериментальных плавки на РНП в условиях ОАО «БМЗ» привели к образованию конгломератов (глыб) размером 200–300 мм (рисунок).

Конгломераты представляют собой плотное пористое образование из восстановленного железа, шлаковых включений, оксидов железа, твердого угля или кокса флюсов. Степень металлизации по сечению этих конгломератов колеблется от 10 до 85%. Состав металла, входящего в конгломерат, следующий: $\text{Fe}_{\text{мет}} - 91,2\%$, $\text{C} - 0,07$, $\text{Mn} - 0,06$, $\text{Si} - 0,06\%$. Их образование практически останавливает процесс плавки, так как они имеют низкую теплопроводность и прогрев до температуры плавления замедляется по сравнению с частицами окалины или металлизированными гранулами в десятки раз. Кроме того, нарушаются режимы движения газов и условия конвективного теплообмена, снижается тепловая к. п. д. печи, что заметно по температуре отходящих газов.

Процесс восстановления внутри спеченных конгломератов также затруднен из-за шлаковых

прослоек. Расчеты диффузии углерода, кислорода или ионов железа показывают, что в данных условиях глубина проникновения в расплав или твердый материал не превышает нескольких нанометров.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для проведения непрерывного процесса рециклинга, включающего ТФВ и ЖФВ, необходимо исключить или максимально сократить развитие кричного процесса и его негативное воздействие на плавку.

Исследования показали, что образование и рост кричных конгломератов зависят от состава шихты и температуры. Кроме того, после образования гранул размером 15–20 мм процесс роста становится самоускоряющимся: скорость увеличения размера возрастает пропорционально самому размеру. Предотвращать крицеобразование, таким образом, целесообразно в начальный период.

Спекание начинает развиваться с температур $\sim 800^\circ\text{C}$, но до уровня 1100–1200 °С идет с низкой скоростью, что возможно объясняется малыми размерами «чешуек» (пластинок) окалины и их слабым взаимодействием друг с другом.

При дальнейшем росте температур в печи возникают условия для спекания (сваривания) частиц. Агрегатирование частиц термодинамически целесообразно, так как снижается суммарная поверхностная энергия, что способствует переносу вещества в зону контакта.

Невосстановленные частицы вюстита могут взаимодействовать при температурах 1300–1350°С с оксидами Ca, Mg и Mn, образуя твердые растворы, что способствует размягчению и подплавлению с образованием вязких тестообразных шлаковых пленок, препятствующих диффузному переносу. Образование шлаковых эвтектик, например 23,3% CaO, 14,7% Al_2O_3 и 62,2% SO_2 , способствует росту гранул и снижает степень извлечения железа.



Конгломераты в РНП

Для замедления процесса крицеобразования в ходе экспериментальных плавки было использовано увеличение расхода восстановителя. Непосредственно после стадии ТФВ перед увеличением температуры в печь загружали углеродсодержащий материал в количестве, вдвое превышающем стехиометрическое. Кроме того, дополнительно вводили флюсы.

Наиболее активно снижает слипаемость (спекаемость) гранул CaCO_3 , в меньшей степени – CaO и MgCO_3 . Это влияние не зависит от концентрации SiO_2 . В опытных плавках основность шлака колебалась в широких пределах: от 0,55 до 2,5, что не отражалось на образовании кричных конгломератов.

Решающую роль в процессе крицеобразования играет темп нагрева. При увеличении скорости повышения температуры в рабочем пространстве РНП до 2,5–3,5 К/с в интервале 1100–1800 °С гранулы размером более 15–20 мм (перед расплавлением) не были обнаружены ни в одной из проб.

При проведении натуральных экспериментов время перехода от ТФВ к ЖФВ было сокраще-

но до 5–6 мин. После того, как степень металлизации оксидного материала достигала 65–75%, в РНП загружали флюсы (до 7–8%), алюминиевый скрап (~1–2%), восстановитель (уголь, кокс, графит или лигнин). Газовая горелка переводилась в режим с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 0,7–0,8$ и максимальным расходом топлива, в печь подавался кислород с расходом 60 м³/т, в газах соотношение $\text{CO}/\text{CO}_2 = 1,8–2,3$. Скорость вращения печи снижалась до 1–2 об/мин.

Образование жидкого шлака начиналось через 2–3 мин после перехода на данный режим, а интенсивное вспенивание шлака, что свидетельствует о начале периода ЖФВ, отмечалось уже через 5–6 мин.

Возможность осуществления в РНП быстрого перехода от твердо- к жидкофазному восстановлению обеспечивает высокую производительность и значительное сокращение удельных энергозатрат при получении железа из оксидных металлоотходов.

Литература

1. Кожевников И. Ю. Бескоксовая металлургия железа. М.: Металлургия, 1970.
2. Юсфин Ю. С., Пашков Н. Ф. Металлургия железа. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007.