



The suppositions of the special furnaces creation are stated and the main variants of the iron-containing wastes processing technologies are offered.

Л. Е. РОВИН, ГГТУ им. П. О. СУХОГО, С. Л. РОВИН, УП «Технолитм»

УДК 621.745

РЕЦИКЛИНГ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

Все возрастающее накопление железосодержащих отходов, удорожание энергоресурсов и шихтовых, особенно доменных, материалов, ужесточение природоохранных нормативов приводят к необходимости поиска экономичных адаптированных к условиям Республики Беларусь способов и оборудования для переработки и возврата в производство (рециклинга) металлоотходов. К их числу относятся стружка, окалина, мелкий низкосортный скрап, шламы, проволока и т.п.

По ориентировочным оценкам вновь образующиеся металлоотходы составляют 250–300 тыс. т в год. Только на БМЗ собирается более 40 тыс. т окалина и 17 тыс. т аспирационной электропечной пыли, около 40 тыс. т низкосортного скрапа. Несмотря на то что значительная часть отходов отправляется на переработку, в основном на металлургические предприятия за пределы страны, в отвалах республики накоплено не менее 8–10 млн. т.

Для сравнения общее производство чугуна и стали в Беларуси составляет около 2 млн. т, из них на долю БМЗ приходится свыше 1,5 млн. т, остальное выплавляют литейные цеха. При этом закупки доменного чугуна составляют более 400 тыс. т в год. За счет рециклинга железосодержащих отходов значительную часть (до 50%) этого дорогостоящего импортируемого сырья можно было бы заменить отечественным более дешевым металлом.

Проблема утилизации железосодержащих отходов является актуальной во всем мире. Например, в России накоплено ~450–550 млн. т, ежегодно образуется ~3,5 млн. т, а перерабатывается только 5% от этого количества.

В литературе предлагается ряд способов рециклинга, в основном в металлургии, однако все они, за исключением традиционного доменного переплава, а также использования в качестве добавок при производстве металлизированных окатышей, находятся в лучшем случае на стадии опытно-промышленных установок.

Специфика решения этой проблемы в Беларуси обусловлена наличием большого количества небольших по объему источников подобных отходов. Отсюда трудности со сбором, транспортировкой, унификацией по видам и составам и соответственно с их переработкой.

Железосодержащие отходы можно разделить на две категории. Первая – стружка (чугунная и стальная), скрап, проволока и другие металлоотходы. Вторая – оксидные материалы, к которым относятся окалина, пыль систем аспирации, шламы и другие отходы, в которых железо присутствует в виде FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 .

Первая представляет собой наиболее ценное и привлекательное с точки зрения металлургии сырье, так как имеет тот же состав, что и годная продукция, т.е. марочные чугуны и стали. При сборе и смешивании подобных отходов с разных предприятий ценность этого вида сырья снижается из-за неопределенности химического состава. Поэтому для условий Беларуси предпочтительным решением явился бы рециклинг металлоотходов на тех же предприятиях, где они образуются, что предполагает создание эффективных и небольших по производительности установок для их переплавки.

Практика показала, что использовать традиционные плавильные печи, обслуживающие литейные цеха, для переплавки стружки нерационально.

Так, начиная с 60-х годов прошлого столетия велись постоянные поиски способов переплавки чугунной стружки в открытых вагранках холодного дутья. Стружка вводилась с дутьем через фурмы, шнеком непосредственно в плавильную зону и в виде брикетов – с шихтой через завалочное окно. В кислородной зоне холостой колоши (~350 мм от оси фурм) при холодном дутье температура достигает 1750–1850 °С. При конвективном и лучистом теплообмене с суммарным коэффициентом α_z более 500 Вт/(м²·К)

стружка, представляющая собой пластину толщиной не более 2–3 мм, успевает прогреться в потоке газов до температуры плавления за ~1 с. Однако за это время в шахте вагранки частица пройдет расстояние более 10 м, т.е. будет вынесена потоком далеко за пределы зоны плавления, если не будет уловлена падающими каплями жидкого металла или осаждена на поверхности кокса. На таком расстоянии от оси фурм температура уже не более 1300–1350 °С, что снижает значение α_x и температурный напор. Следовательно, если стружка не успела расплавиться за время <0,1–0,2 с, она будет просто вынесена отходящими газами. Скорость витания чешуек чугуна <10 м/с. Точный расчет этих процессов затруднен, но практика показала, что усваивается в таких условиях не более 15% стружки. Остальное распределяется между шлаком в виде оксида FeO и отходящими газами, где увеличивается доля оксидов Fe₂O₃ и Fe₃O₄ в ваграночных аэрозолях. При вводе стружки в кислородную зону чугуна пластинка (стружка) интенсивно окисляется. Соответственно увеличиваются расход флюсов, количество шлака и расход топлива (кокса). К сожалению, отрицательные результаты получены при любых способах ввода стружки в традиционные вагранки, в том числе и в виде брикетов, которые в процессе плавки (в верхней части холостой колоши) разрушаются.

Удачным вариантом является использование для переплавки стружки вагранок горячего дутья. Подогрев дутья до температуры 500–700 °С существенно улучшает параметры плавки и условия для переплавки стружки: более высокая температура (до 2200–2300 °С) и концентрация CO (до 18–20%) в холостой колоше, меньший удельный расход воздуха, следовательно, меньшие скорости потока газов.

В вагранках горячего дутья чугуна стружка и даже аспирационная пыль, инжектируемая непосредственно в редуцированную зону холостой колоши, эффективно утилизируется, не увеличивая угар металла. Это обстоятельство служит дополнительным аргументом в пользу ускоренного оснащения вагранок рекуператорами: они не только позволяют сократить расход кокса, но и утилизировать значительную часть металлоотходов.

Тем не менее, даже новые возможности, которые создает традиционная вагранка горячего дутья, не гарантируют, с нашей точки зрения, условия для утилизации окисленных отходов, например, окалина или аспирационной пыли. Расчеты кинетических характеристик процесса восстановления оксидов показывают, что для его осуществления требуется увеличение времени пребывания в восстановительной зоне до ~10 с. Еще больше, до десятков минут, необходимо

увеличить время пребывания при восстановлении кускового (брикетированного) окисленного материала. Кроме того, брикеты должны быть специально подготовлены для ваграночной плавки: иметь определенные размеры, плотность, содержать активный восстановитель и флюс и сохранять плотность вплоть до полного расплавления.

Более перспективным является создание специализированных вагранок для переплавки брикетов из металлоотходов. Такие вагранки могут работать на смешанном коксо-газовом топливе, что дает дополнительное сокращение расхода кокса до 30%. Вагранки для переплава должны иметь увеличенную (до 8–10 диаметров) полезную высоту и расширенную зону подогрева, что позволило бы увеличить время пребывания брикетов при температуре 900–1300 °С до 20–25 мин, что достаточно для восстановления оксидов в твердом виде. Полученный в таких вагранках чугун можно использовать как полупродукт для использования в шихте печей литейных цехов, как заменитель чушкового чугуна. Аналогичным образом можно этот металл использовать на БМЗ вместо чушкового чугуна или непосредственно в жидком виде, что дает экономию электроэнергии при плавке в дуговых печах до 100 кВт·ч/т. К настоящему времени в мире работает свыше 20 электродуговых печей, использующих в шихте жидкий, в том числе ваграночный чугун.

Привлекательность вагранок для рециклинга дополняется и тем, что стружку и другие металлоотходы, загружаемые в вагранку, не нужно предварительно очищать или подогреть. Все органические загрязнители полностью сгорают в шахте вагранки, а неорганические – ошлаковываются.

С развитием индукционной плавки начались попытки использования стружки в шихте тигельных печей промышленной, а затем и средней частоты. В печах первого типа переплавка стружки требует преодоления ряда технологических трудностей. Из-за того, что стружка плохо разогревается при низкой частоте снижаются к.п.д. печей и производительность. Насыпная масса стружки около 1–2 т/м³, поэтому она всплывает и удерживается в холодном шлаке. Оксиды, вносимые стружкой, приводят к обезуглероживанию сплава, накоплению неметаллических включений, газонасыщенности и т.п.

Значительно эффективней используется стружка в среднечастотных или высокочастотных печах. Проникновение вторичных токов в металл здесь составляет от долей до миллиметра. Это позволяет разогреть стружку и переводить ее в расплав.

Имеются данные о том, что чугуна стружка как брикетированная, так и россыпью успешно может переплавляться в дуговых печах постоянного тока (ДППТ).

Еще более рациональным является использование установок электрошлакового переплава (ЭШП). Использование полых электродов с засыпкой из стружки, прессованных и предварительно спеченных электродов позволяет эффективно переплавлять стружку без окисления, как это имеет место в других плавильных агрегатах, рафинировать сплав, пропуская его по каплям через слой активного высокотемпературного шлака, управлять химическим составом и т.п. Преимуществом установок ЭШП является универсальность (можно плавить чугун и любые марки стали), сравнительная дешевизна оборудования, компактность, простота управления и высокие экологические характеристики.

Естественно, как и в случае использования других электропечей, экологические параметры плавки зависят от качества шихты. При использовании загрязненной песком и цеховым мусором, замасленной, с остатками СОЖ стружки образование и выбросы продуктов деструкции органических соединений, сажи, пыли неизбежны. Загрязнения могут составлять до 10% от массы стружки, соответственно велики и объемы выбросов. Поэтому загрязненная стружка должна предварительно подвергаться сушке при температуре не менее 250–300 °С. Требования к качеству (чистоте) стружки актуальны для печей любого типа.

Брикетирование стружки облегчает процесс ее переплавки. Имеется положительный опыт брикетирования стальной легированной стружки при высоком удельном давлении, обеспечивающем плотность брикетов около $6 \cdot 10^3$ кг/м³. Такие брикеты в качестве добавок могут успешно использоваться в шихте как индукционных, так и дуговых печей любого типа.

Однако и в этом случае введение брикетов в шихту более 15–20% по массе завалки приводит к снижению характеристик плавки и жидкого металла, что служит дополнительным аргументом в пользу переплавки металлоотходов в специальных агрегатах в полупродукт — шихтовой материал для печей, выплавляющих марочные сплавы.

Загрязненную стружку перед брикетированием также необходимо очищать. От жидких загрязнителей (влага, масла, СОЖ) стружку при небольших объемах производства можно очищать в высокоскоростных центрифугах. Наиболее широко применяются для этой цели сушила с температурой до 350 °С. Как правило, они выполняются в виде барабанных вращающихся печей непрерывного действия длиной 3,5–4,5 м на газовом топливе.

Для небольших объемов материала (0,5–3,0 м³) целесообразно использо-

вать ротационные сушила (пат. РБ № 1424), которые могут работать как непрерывно, так и периодически.

В таких печах при вращательных скоростях потока газов до 10–15 м/с процессы идут более быстро, чем в барабанных. Объемный коэффициент теплообмена α_v достигает 300–350 кВт/(м³·К) против $\alpha_v \approx 300$ Вт/(м³·К) для слоевого нагрева. Один из вариантов такой печи показан на рис. 1. После сушки стружка подвергается брикетированию с помощью прессования. Перед загрузкой в электрические печи (ДСП или ИЧТ, ИСТ) целесообразно брикеты подогреть до 500–700 °С и загружать под слой плотной шихты.

Более сложной задачей является переработка окисленных и загрязненных металлоотходов.

Развитие одностадийных способов получения стали из руды, минуя доменный передел, явилось базой для создания аналогичных процессов для переработки железосодержащих отходов, учитывая, что окалина содержит около 75 % железа, а стружка, даже окисленная, еще более. В настоящее время отработаны четыре основных способа переработки рудного сырья, которые пригодны и для рециклинга отходов: получение неметаллизированных окатышей или агломерата, производство губчатого железа в твердом виде (металлизированных окатышей), кричного железа в пластичном состоянии, жидкого чугуна или полупродукта.

Несмотря на существенное различие названных технологий и оборудования, расход тепловой энергии на процессы восстановления, плавления и науглероживания окисленного железа составляет около 6 МДж/кг (1,7 кВт·ч/кг), включая затраты на реакцию $Fe_2O_3 + 3C \rightarrow 2Fe + 3CO$ и развитие температуры в рабочей зоне до 1500–1700 °С. С учетом термического к.п.д. печей общий расход твердого топлива (угля) составляет до 2–3 т/т железа. Для сравнения в доменных печах



Рис. 1. Ротационная установка для сушки разнодисперсных металлоотходов в литейном цехе ООО «Эрни», г. Волковыск

расходуется 450–500 кг кокса на 1 т чугуна (термический к.п.д. ~40%). В пользу альтернативных способов получения железа может служить тот факт, что при этом используются более дешевые и недефицитные энергоносители, в том числе местные, а также природный газ.

При переработке окисленной и ржавой стружки, окалины, аспирационной пыли и т.п. применяются два подхода: брикетирование и переплав диспергированного материала.

В течение ряда лет основное внимание при рециклинге уделялось разработке технологии получения и состава брикетов и их переплаву в традиционных электропечах и вагранках. Однако основные физико-химические и теплофизические явления, определяющие тепло- и массоперенос в таком сложном объекте каким является многокомпонентный брикет в процессах нагрева и восстановления, до сих пор практически не исследованы.

Механический перенос закономерностей доменной плавки на процессы переплавки брикетов не вполне правомерен, так как условия в рабочем пространстве домы и, например, ДСП сильно отличаются, как и характеристики брикета и агломерата.

В общем случае процесс переплавки брикета состоит из ряда последовательных стадий: нагрев (теплопроводность и конвекция), диффузия окислителя (O_2), химические реакции $C+2O \rightarrow CO_2$ и $CO_2+C \rightarrow 2CO$, диффузия и редиффузия газов CO и CO_2 , реакции взаимодействия оксидов железа с CO и твердым C , образование легкоплавких эвтектик в системах SiO_2-FeO ($t_{пл}=1177-1230$ °C), $CaO-Al_2O_3$ (1397 °C), SiO_2-MnO (1285 °C) и др., диссоциация (для Fe_3O_4 $p_{дисс}=0,21$ ат. при $t=1383$ °C), взаимодействие оксидов железа с компонентами сплавов и др.

Каждый из процессов характеризуется своими кинематическими характеристиками, что сильно изменяет динамику процесса в целом. Так, скорость восстановления частично металлизированных и обожженных окатышей в 2,5 раза выше, чем агломерата в начале процесса (<900 °C) и в 4 раза – в конце (при повышении температуры до 1200 °C). Для всех восстанавливаемых материалов скорость продвижения фронта металлизации (ω) сильно снижается по ходу процесса из-за «внут-

реннего сопротивления»: $l\omega = K_v \tau$ и $\frac{d\omega}{d\tau} = K_v (1 - \omega)$.

Если в начале процесса в атмосфере CO при степени металлизации $\varphi=0$ для окатышей >20 мм $\omega=2,6-3,3$ мм/мин, то при $\varphi=50\%$ $\omega=0,8-1,2$ мм/мин. Для агломерата при тех же условиях соответственно 1,3 и 0,3 мм/мин. Скорее всего те же показатели для брикетов будут не лучше, чем для окатышей.

Реакции $C+CO_2 \rightarrow CO$ и $FeO+CO \rightarrow Fe+CO_2$ при температурах >1000 °C находятся в диффузи-

онной области. При этом определяющей является не скорость внешнего потока газов (увеличение скорости газов свыше 0,75 м/с не влияет на скорость восстановления), а скорость внутривещной диффузии, следовательно, плотность брикета.

Аналогичным образом протекают и процессы теплопереноса. Расчет по уравнению Фурье без учета конвективного переноса недостаточно точен. Коэффициент теплопроводности зависит не только от температуры, но и от изменений самого материала (оксиды – металлы) и его агрегатного состояния. Приведенный объемный коэффициент теплообмена изменяется от 2,5 до 300 кВт/(м³·К).

Для расчета времени прогрева брикета в первом приближении можно воспользоваться эмпирической зависимостью

$$\tau = \left(\alpha \left(1 - \frac{W_1}{W_2} \right) \right)^{-1} \ln \left(1 - \frac{t_1}{t_2} \right) c_1 \rho_1 (1 - \varepsilon),$$

где α – приведенный коэффициент теплообмена, кВт/(м³·К); W – теплоемкость потоков теплоносителя и материала, Вт/К; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; индексы 1 и 2 относятся соответственно к материалу и теплоносителю.

Конечно, имеют значения и механические (термомеханические) характеристики брикета, определяющие его способность сохранять свою структуру, не разрушаясь, до завершения стадии восстановления и расплавления. При изготовлении брикетов именно последним вопросам уделялось основное внимание, что привело к производству массивных и громоздких брикетов. Использование их в шихте требует при самых благоприятных условиях на восстановление более 1 ч. Сократить это время можно, уменьшив габариты брикета до размеров агломерата (~20 мм) или путем изготовления перфорированных брикетов.

Составы брикетов в настоящее время достаточно хорошо отработаны и в основном соответствуют условиям плавки в печах различного типа.

В то же время рециклинг дисперсных металлоходов без предварительного брикетирования или окускования представляется нам более простым технологически и не требующим значительных капиталовложений. Работы в этом направлении привели к созданию систем Redsmelt, Hismelt, российской Ромелт и некоторых аналогичных. Системы предусматривают получение жидкого металла (чугуна или полупродукта). Из них лишь Ромелт основан на непосредственной переплавке дисперсных материалов. Прочие фактически на предварительных стадиях процесса осуществляют окомковывание, обжиг и частичное восстановление сырья.

Переплав дисперсных оксидных материалов вместе с науглероживателями имеет определенные преимущества, прежде всего высокие скорости нагрева и восстановления.

Однако обработка материала в слое затрудняет их использование: высокая плотность слоя, спекание частиц вблизи температуры плавления, необходимость использования высокотемпературных теплоносителей и, как следствие, низкий термический к.п.д. (высокая температура отходящих газов).

Альтернативный и, по-видимому, наиболее эффективный способ переработки сильноокисленных металлоотходов дает применение ротационных печей (пат. РБ № 2428 и 2770). Этот тип плавильных агрегатов позволяет перерабатывать любое сырье благодаря тому, что нагрев и массообмен осуществляются в динамическом слое, подобно вращающимся барабанным печам. В отличие от последних поток газов находится в печи вдвое дольше, а при подаче закрученного потока взаимодействие его с материалом может быть интенсифицировано в несколько раз при увеличении скорости вращения до 10–15 м/с против 0,5–1,5 м/с (поступательная скорость газового потока) в барабанных печах. Благодаря возможности качания в такие печи легко загрузить шихту и слить жидкий расплав, причем емкость подобных печей лимитируется только технологическими потребностями. Ротационные печи позволяют вести методический режим обработки как по температуре, так и по составу атмосферы печи, т.е. в начальный момент можно осуществить процесс восстановления при температурах 900–1100 °С и содержании СО ≈ 25–35%, затем поднять температуру до 1750–1850 °С за счет использования обогащенного дутья и получить расплав. Шлак в таких печах перегрет и имеет высокую активность. Печи позволяют в случае необходимости произвести доводку сплава и его рафинирование перед разливкой. Ротационные печи могут работать на жидком и газообразном топливе, а в качестве восстановителей использовать любые углеродсодержащие материалы, в том числе, отходы (например, отсев кокса). Для таких печей чем выше дисперсность окисленных металлоотходов и восстановителя, тем выше интенсивность и эффективность процесса восстановления. Достоинством этих печей являются относительно низкие капитальные затраты и возможность их изготовления на белорусских предприятиях (рис. 2).

Накопление железосодержащих отходов, удорожание шихтовых материалов и энергоресурсов, ужесточение природоохранных требований приводят к необходимости поиска экономичных адаптированных к условиям нашей республики способов и оборудования рециклинга отходов.

Существующие методы не обеспечивают комплексное решение проблемы, так как сосредоточены в основном на стадии переработки железосодержащих дисперсных материалов в кусковые: брикеты, агломераты, окатыши и т.п., а последующее их использование в традиционных электрических и топливных плавильных печах оказывается неэффективным, особенно в случае получения марочных чугунов и сталей.

Практика показала, что замена, даже частичная, качественных сортовых материалов низкосортными (окисленными, загрязненными, с нестабильным химическим составом) приводит к снижению всех показателей плавки, включая энергозатраты и качество жидкого металла.

Необходим новый подход в решении проблемы: разработка специальных печей и установок с целью получения жидкого или твердого полупродукта, который может заменить (по крайней мере частично) дорогостоящие импортируемые шихтовые материалы, включая доменные чугуны и стальной лом.

Таким образом, из сказанного выше можно сделать следующие выводы.

1. Чугунная стружка определенного химического состава, чистая и неокисленная без предварительной подготовки успешно может переплавляться в индукционных средне- и высокочастотных тигельных печах, установках ЭШП, дуговых печах постоянного тока, ротационных печах, а также в вагранках с горячим дутьем. Брикетирование такой стружки улучшает ее технологические свойства как шихтового материала. Плавка в ротационных печах более экономична. Целесообразно организовывать переплавку стружки на тех же предприятиях, где она образуется.

2. Стальная стружка, также чистая и неокисленная, должна дробиться, брикетироваться (па-



Рис. 2. Сборка 5-тонной ротационной печи для восстановления свинца из окисно-сульфатного шлака

кетироваться) и может переплавляться в индукционных высокочастотных печах, дуговых любого типа, установках ЭШП, ротационных печах.

3. Загрязненная СОЖ, маслами, песком и др., частично окисленная стружка должна осушаться в сушила барабанного или предпочтительнее ротационного типа, после чего утилизироваться по изложенной выше схеме.

4. При использовании электропечей целесообразно стружку предварительно подогреть в газовых установках до температуры 500–600 °С, что существенно (до 120–160 кВт·ч на 1 т) сократит расход электроэнергии и соответственно себестоимость металла, учитывая сегодняшнее соотношение стоимости энергоносителей по тепловому эквиваленту: газ/электроэнергия относится как 1/10.

5. Окисленная стружка, окалина, низкосортный скрап, шлам и другие металлоотходы, имею-

щие высокое процентное содержание оксидов, могут успешно переплавляться в ротационных печах, работающих на газовом или жидком топливе. В шихту при этом вводится восстановитель.

Альтернативой может служить плавка в специализированных вагранках с горячим дутьем и расширенной восстановительной зоной. Отходы должны быть предварительно брикетированы, причем брикеты должны изготавливаться таким образом, чтобы оксиды успевали восстановиться за 20–25 мин пребывания в восстановительной зоне вагранок.

В обоих случаях оптимальным решением является получение полупродукта, который затем в виде чушек или жидкого металла вводится в шихту основного плавильного агрегата, обслуживающего литейный цех. Аналогичное решение может эффективно использоваться и на РУП «БМЗ».