

ПРИМЕНЕНИЕ РОТАЦИОННЫХ НАКЛОНЯЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПРЯМОГО ПОЛУЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИЗ ОКАЛИНЫ И ШЛАМОВ

С.Л. РОВИН, д-р техн. наук

Белорусский национальный технический университет

Л.Е. РОВИН, канд. техн. наук

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого

В статье представлены основы нового малотоннажного технологического процесса прямого получения железа (железоуглеродистых сплавов) из дисперсных железосодержащих отходов, который в отличие от традиционных методов не требует предварительной подготовки и окомковывания сырья. Весь двухстадийный процесс твердо-жидкофазного восстановления осуществляется в одном агрегате – ротационных наклоняющихся печах (РНП) нового поколения, без остановок и перегрузок. Рециклинг в РНП может осуществляться децентрализованно и рентабельно даже при небольших объемах образования и накопления металлоотходов, причем непосредственно на предприятиях-источниках этих отходов, что позволяет исключить затраты на их сбор, транспортировку, гомогенизацию и подготовку к переработке.

Ключевые слова: рециклинг, металлоотходы, дисперсность, восстановление, плавка, ротационные печи, экология.

APPLICATION OF ROTARY TILTING OVENS FOR DIRECT PRODUCTION OF IRON FROM SCALE AND SLUDGE

S.L. ROVIN, Dr. of Engineering Sciences

Belarusian National Technical University

L.E. ROVIN, Ph. D in Technical Sciences

Gomel State Technical University named after Sukhoi

The article presents the basics of a new small-tonnage process for the direct production of iron (iron-carbon alloys) from dispersed iron-containing wastes, which, unlike traditional methods, does not require preliminary preparation and pelletizing of raw materials. The entire two-stage process of solid-liquid phase recovery is carried out in one unit – a new generation of rotary tilting furnaces

(RTF), without stops and replacement. Recycling in RTF can be carried out in a decentralized and cost-effective manner even with small volume of generation and accumulation of metal wastes, and directly at the enterprises-sources of these wastes, which eliminates the costs of their collection, transportation, homogenization and preparation for processing.

Keywords: *recycling, metal wastes, dispersion, recovery, melting, rotary furnaces, ecology.*

Введение. Ресурсосбережение – проблема, актуальность которой в современном мире трудно переоценить. Остаются нерешенными задачи по сокращению удельного потребления металлов и переработке образующихся и накопленных в отвалах отходов. Затраты можно значительно сократить путем восстановления и возвращения содержащихся в отходах металлов в промышленный оборот, т.е. создания системы рециклинга. Одна тонна переработанных металлоотходов позволяет экономить более 1,5 т железной руды и 600 кг кокса [1]. Стоимость окалины сегодня примерно в десять раз меньше стоимости агломерата – исходного сырья для доменных печей, полученного из руды и присадок, а металлургической пыли и шламов – в десять раз дешевле окалины.

Еще большее значение имеет экологический аспект проблемы рециклинга металлоотходов, в первую очередь, отходов производства и обработки черных металлов, если учесть, что сегодня перерабатывается не более 20 % оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов, а все остальное захоранивается на промышленных полигонах и в отвалах предприятий, создавая серьезную угрозу техногенной экологической катастрофы [2].

Основная часть. Несмотря на высокий технический и экономический уровень современной черной металлургии, базирующейся на доменном процессе и двухстадийной схеме производства стали, продолжают интенсивные поиски новых и совершенствование разработанных методов прямого внедоменного безкоксового получения черных сплавов из железорудного сырья. Все разработанные и предлагаемые сегодня методы прямого получения железа условно могут быть разделены на две группы: методы твердофазного восстановления (ТФВ) оксидов железа с получением металлизирован-

ных окатышей или губчатого железа (ГЖ) в твердом виде и жидкофазное восстановление (ЖФВ) с получением чугуна или железоуглеродистого полупродукта в жидком виде [3]. Подобие характеристик дисперсных металлоотходов рудному сырью заставляет изучить опыт, накопленный в бездоменной металлургии железа. Однако анализ известных технологий показывает, что все они ориентированы на непрерывное крупномасштабное производство, предполагающее наличие постоянного источника стабильного по характеристикам сырья, годовые объемы которого должны исчисляться миллионами тонн. Ни один из созданных в последнее время способов не является технически и экономически способным решить проблему рециклинга малотоннажных разносортных дисперсных металлоотходов, образующихся на сотнях и тысячах машиностроительных, металлообрабатывающих и электрометаллургических предприятий.

Если плотный кусковой металлолом уже давно превратился в ценный шихтовой материал, даже предмет экспорта, то переработка дисперсных отходов (стружки, окалины, ржавчины, шламов, аспирационной и абразивной пыли и т.п.) представляет серьезные трудности для традиционных плавильных агрегатов. Сегодня перерабатывается с различной эффективностью лишь около 50–60 % стружки и мелкого скрапа – наиболее ценной части дисперсных металлоотходов [4].

Стружка и мелкий скрап чаще всего готовятся к плавке путем холодного или горячего брикетирования. Однако холодные брикеты дают весьма незначительные плюсы: они имеют низкую прочность и плотность ($< 5000 \text{ кг/м}^3$), высокое содержание масел и влаги ($> 3 \%$), нестабильный химсостав и т.д. Горячее прессование позволяет повысить прочность и плотность (до 6500 кг/м^3) брикета, однако качество его не достигает качества плотного кускового лома, себестоимость же практически равна стоимости первичных шихтовых материалов (передельного и литейного чугуна). Применение брикетов в металлургии и литейном производстве имеет ряд ограничений, их доля при плавке, как правило, ограничивается 5–15 % от массы металлозавалки.

Переработка оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов (окалины, шламов, пыли) в настоящее время осу-

ществляется только на комбинатах полного металлургического цикла и предполагает централизованный (в рамках страны или региона) сбор, транспортировку к местам переработки, хранение, сортировку, усреднение, дробление, удаление влаги и масел, перемешивание с восстановителем и связующим, смешивание с рудным концентратом, окатывание или агломерирование и только затем восстановительную плавку с получением чугуновой или стальной чушки – шихты для литейного и металлургического производства. Подобная система является достаточно сложной, а продукция – зачастую дороже первичных шихтовых материалов, полученных из рудного сырья.

Единственной альтернативой, способной кардинально изменить ситуацию и действительно обеспечить рентабельный рециклинг дисперсных металлоотходов, является создание принципиально новой гибкой универсальной технологии и соответствующего оборудования (плавильных печей), способных эффективно перерабатывать (восстанавливать и переплавлять) относительно небольшое количество неподготовленных, разнородных отходов с получением чугуновых или стальных шихтовых слитков, являющихся равноценной заменой дорогостоящих первичных шихтовых материалов и качественного кускового лома.

Решение поставленной задачи потребовало нового взгляда на дисперсные металлоотходы. Наряду с традиционным анализом химического и фазового состава, истинной и насыпной плотности отходов были проведены исследования гранулометрии, формы, структуры, пористости и микропористости частиц, их удельной поверхности, адгезионных и аутогезионных свойств, скорости витания, которые при традиционных методах переработки практически не попадали в сферу интересов производителей.

При переносе обработки на уровень отдельно взятой частицы многие свойства металлоотходов, традиционно считавшиеся негативными: высокое содержание масел, неоднородность структуры, низкая прочность и измельчение в процессе механического воздействия, пористость – приобретают положительное значение.

При высокой дисперсности и пористости частиц значительно увеличивается их поверхностная активность. В результате скорость теплообмена и гетерогенных восстановительных процессов

увеличивается на два-три порядка. В соответствии с новой концепцией процесс восстановления дисперсных пористых частиц развивается не по классической схеме восстановления тела с непрореагировавшим ядром, предполагающей постоянное уменьшение реакционной поверхности по мере увеличения толщины (глубины) восстановленного слоя и соответствующее замедление процесса, а по квазигомогенной схеме, согласно которой восстановительные процессы развиваются одновременно во всем объеме дисперсной оксидной частицы за счет развитой реакционной поверхности и пористости, включая микропористость до диаметров пор, соизмеримых с длиной свободного пробега молекул, обеспечивающих ускорение переноса газообразных восстановителей CO и H₂ (вплоть до кнудсеновского режима) и твердого дисперсного углерода с развитием прямого восстановления и транспортных химических реакций с участием H₂.

В целом процесс восстановления может быть разделен на следующие стадии: макрперенос тепла и восстановителя к поверхности оксидных частиц; диффузия восстановителя через поры и поверхностную пленку к реакционной поверхности; адсорбция восстановителя на реакционной поверхности; химическая реакция восстановления; диффузия ионов Fe⁺⁺ и редиффузия ионов O²⁻ в твердом теле; десорбция продуктов реакции с реакционной поверхности; редиффузия продуктов реакции через поверхностную пленку; отвод продуктов реакции от поверхности восстанавливаемых частиц. За исключением первого и последнего процессов все остальные совершаются на микроуровне [5].

Структурная неоднородность, характерная для большинства оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов (и окалины, и шламов, и пылей), наличие многочисленных поверхностных и внутренних дефектов, несплошностей, макро- и микропористости, которая, как правило, является открытой и сквозной, обеспечивает высокие значения удельной реакционной поверхности и скорости процесса восстановления. Так, в частицах прокатной окалины и шламов БМЗ толщиной 1–2 мм были выявлены несплошности и поры с размерами от 10–20 нм до 0,1–0,2 мм, при этом их удельная поверхность достигает 1,5–2,5 м²/г (рисунок 1, а). Еще более развитую поверхность имеют аспирационные пыли плавильных

печей – до 300–500 м²/г, в то время как у окатышей диаметром 10–15 мм она не превышает 0,1–0,3 м²/г. Нагрев в динамическом слое (при постоянном перемешивании) приводит к дополнительно-му измельчению металлоотходов и твердого восстановителя. В процессе восстановления оксидов железа пористость и удельная поверхность частиц увеличивается еще в 2–3 раза, благодаря уменьшению мольных объемов при переходе от высших оксидов к железу с 21,8 см³/моль у Fe₂O₃ до 7,2 см³/моль у Fe, что облегчает перенос восстановителя вглубь восстанавливаемой частицы и способствует развитию процесса в противовес тормозящему влиянию образующегося восстановленного слоя (рисунк 1, б).

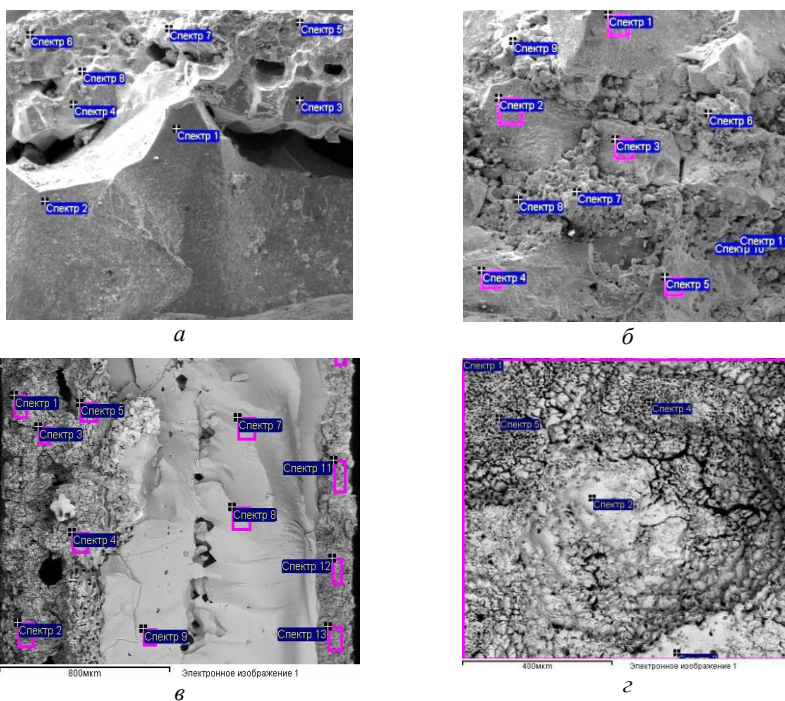


Рисунок 1 – Структура частицы окалины:
а, б – излом и поверхность окалины до восстановления; *в, г* – излом и поверхность частично восстановленной окалины (степень восстановления 85 %)

Немаловажное значение имели исследования процесса восстановления оксидов в динамическом продуваемом слое, которые показали, что скорость восстановления и степень металлизации в таких условиях увеличиваются примерно в 1,5 раза по сравнению с восстановлением в неподвижном слое предварительно перемешанных материалов, и в 3–4 раза относительно восстановления при сплошном расположении оксидов и восстановителя. В лабораторных условиях в динамическом слое степень металлизации окалина при температурах 1050–1150 °С уже через 15–20 мин составляла 30 %, а через 40–45 мин достигала 90–95 %, что в 5–8 раз превышает скорость восстановления тех же материалов в окомкованном виде [5].

Исследования выявили также ускоряющее влияние водорода на процесс твердофазного восстановления, который при температурах более 850–900 °С не только сам является более эффективным восстановителем, чем СО, но увеличивает долю и усиливает влияние прямого восстановления оксидов твердым углеродом, играя роль транспорта восстановителя в химических реакциях, обеспечивая в процессе конверсии водяных паров твердым углеродом образование H_2 и СО. В присутствии водорода скорость и степень металлизации при аналогичных режимах, увеличивалась на 10–20 %. Кроме того, водород создает условия для связывания и удаления серы.

Была установлена экспоненциальная зависимость между степенью восстановления оксидов железа и температурой, а также продолжительностью процесса, для диапазона температур от 800 до 1300 °С. Установленный характер зависимости оказался справедливым для всех видов исследованных железосодержащих отходов (окалина, шлама, аспирационной пыли) и твердых восстановителей (графита, кокса, антрацита, угля, лигнина) [5]:

$$\eta = 1 - \exp(-\alpha T_{\text{пр}}^{\beta}),$$

где η – степень восстановления, т.е. отношение массы восстановленного железа ($\text{Fe}_{\text{мет}}$) к общему содержанию железа в материале ($\text{Fe}_{\text{общ}}$); $T_{\text{пр}}$ – приведенная температура в объеме восстанавливаемого материала; α и β – эмпирические коэффициенты, отражающие влияние дисперсности и пористости восстанавливаемого материала,

реакционной способности восстановителя и состава газов в зоне восстановления – рабочем пространстве печи.

Факторами, оказывающими наиболее заметное влияние на скорость процесса, являются дисперсность и удельная реакционная поверхность оксидов, а также дисперсность и реакционная способность восстановителя.

Реализовать перечисленные преимущества дисперсных материалов и выявленные закономерности их нагрева и восстановления в традиционных шахтных или отражательных топливных, и тем более электрических, печах не представляется возможным. Сравнительный анализ показал, что наиболее перспективными агрегатами для обработки полидисперсных, разнородных по плотности и составу металлоотходов и восстановителей являются ротационные наклоняющиеся печи – РНП (рисунок 2). Однако этот сравнительно новый тип печей, появившийся в 90-х годах прошлого века, до недавнего времени использовался лишь для плавки цветных сплавов. Процессы теплообмена, происходящие в этих печах, были мало исследованы, отсутствовали научно-обоснованные методы расчета, представления о движении газов-теплоносителей и материалов в объеме печи носили поверхностный характер.

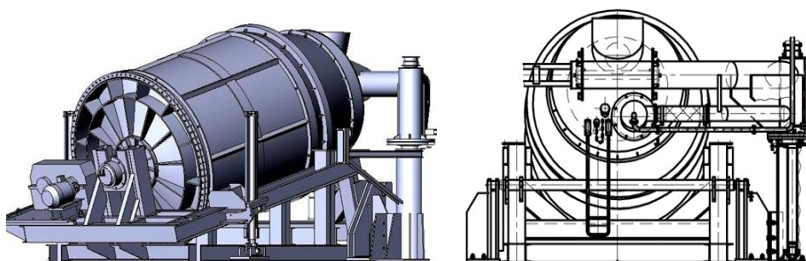
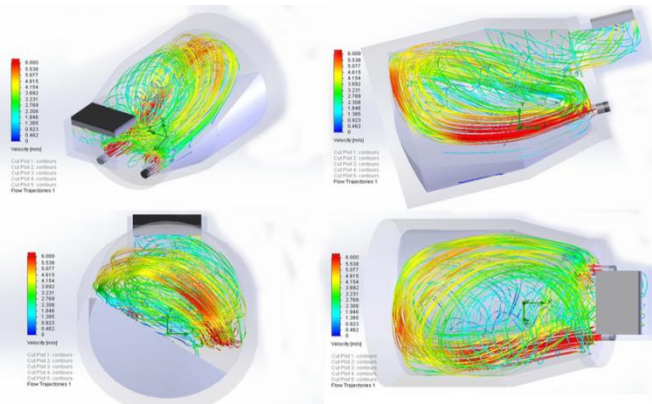


Рисунок 2 – Ротационная наклоняющаяся печь (РНП)
для плавки дисперсных металлоотходов

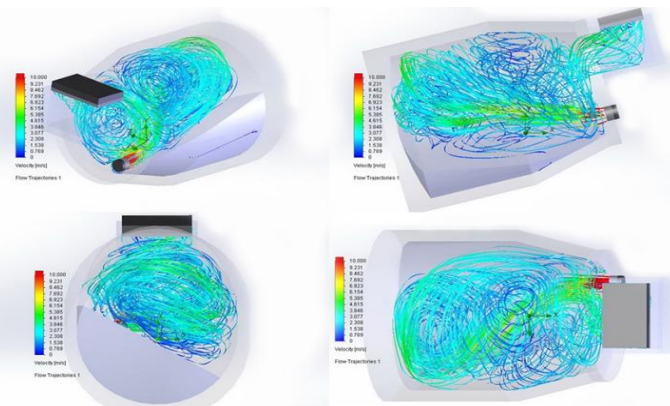
При разработке нового процесса рециклинга были выполнены комплексные исследования особенностей РНП, включая натурные испытания, имитационное и компьютерное моделирование, что позволило выявить закономерности в работе этих печей, определить

факторы, оказывающие наиболее значимое влияние на их эффективность, и оптимизировать их конструкции.

Исследования с помощью ППП ANSYS CFX и Solid Works Flow Simulation позволили получить представление о траектории движения газов, распределении скоростей и температур неизотермического газового потока в печи с учетом ее вращения, геометрии рабочего пространства, расположения слоя и характеристик дисперсных материалов (рисунок 3).



a



б

a – при установке двух горелок; *б* – при установке горелки справа

Рисунок 3 – Траектории движения газов в РНП

В ходе моделирования было выявлено, что важную роль для организации движения газов и, соответственно, интенсификации теплообменных процессов играет расположение (поворот) газовой горелки по отношению к стенкам печи и слою шихты при вращении. Полученные представления о циркуляционном петлеобразном движении газов, зависящем от конструктивных параметров, режимных факторов и положения горелки, характеризуют РНП как агрегат с управляемым вектором потока теплоносителя. Газовый поток в рабочем пространстве РНП вращается как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях, причем при определенных режимах может происходить смена направления и интенсивности его вращения. Скорости взаимодействия потока газов с материалом при циркуляционном движении в 5–8 раз превышают поступательную (осевую) скорость потока, достигая 25–30 м/с, что соответственно интенсифицирует теплообмен между газовым потоком и поверхностью материала. С другой стороны, высокие скорости вращения газового потока в РНП создают циклонный эффект, благодаря которому более чем в 2 раза снижается вынос из печи высокодисперсных материалов [6].

С целью исследования особенностей движения дисперсных материалов в условиях РНП была разработана методика имитационного моделирования. Прозрачная модель выполнялась на основе принципов гидродинамического подобия ($Re_{\text{мод}} \approx Re_{\text{РНП}}$). В отличие от печей с горизонтальной осью вращения перемещение материала в РНП происходит не только в плоскости перпендикулярной оси вращения, но и в продольном направлении – материал совершает винтовое возвратно-поступательное движение (рисунок 4). Скорости циркуляции (вращения) слоя в ротационных печах в 3 и более раз превышают скорость вращения корпуса печи (пропорционально отношению диаметра корпуса печи к приведенному диаметру слоя) и изменяются как в пределах одного сечения, так и по мере продвижения от горловины печи к днищу.

В результате активного перемешивания материала в РНП выравнивание температуры по всему объему требует не более 5–10 оборотов печи. По данным, полученным при эксплуатации РНП на Го-

мельском литейном заводе «Центролит», объемный коэффициент теплопередачи (α_v) при нагреве чугунной стружки составил около 2500–3000 Вт/(м³·К), в то время как для неподвижного слоя стружки он не превышает 3–5 Вт/(м³·К). Две тонны стружки нагревались в РНП до температуры 750–850 °С за 10–15 мин. КПД печи при нагреве дисперсных материалов достигает 49–51 %, что существенно выше показателей камерных и даже короткобаранных печей с прямоточным движением газов [7].

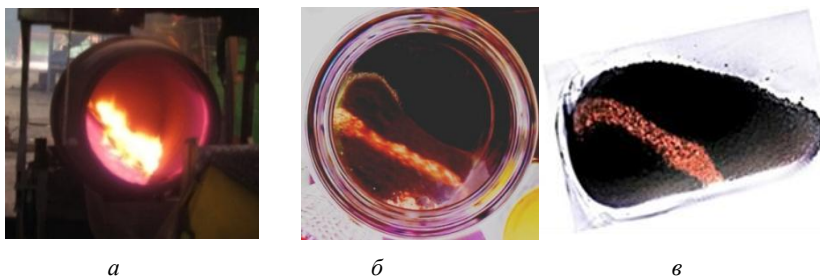


Рисунок 4 – Положение дисперсного материала во вращающихся печах:
а – стружка при нагреве в РНП; б, в – имитационная модель, соответственно, фронтальный вид и вид сбоку

Для определения количественных характеристик движения дисперсных материалов в РНП, что необходимо для получения реальных параметров теплообмена и оптимизации конструкции печей, было проведено компьютерное моделирование с использованием ППП CD-Adapco Star CCM+ и метода DEM (конечных элементов). Расчет выполнялся на основе мгновенного баланса сил тяжести, инерции, упругих сил взаимодействия с другими частицами и сил внешнего трения [8]. Частицы при этом рассматривались как твердые упругие тела, размер которых задавался по данным натуральных экспериментов с учетом масштабного фактора. Рассматривалось поступательное и вращательное движение частиц. В расчете учитывались также силы аутогезии и адгезии. В качестве исходных данных использовались результаты имитационного моделирования и натуральных экспериментов на РНП-0,5.

В результате впервые были получены не только принципиальные представления о характере движения слоя дисперсных материалов в

ротационных печах с наклонной осью вращения и структуре слоев по всей длине печи, но и количественные характеристики траекторий и скоростей движения отдельных частиц (рисунок 5), а также процесса перемешивания (конвекции) материала в слое, и их взаимосвязи с параметрами работы и конструкции печи. Было выявлено, что скорости движения частиц в ядре и на периферии слоя могут отличаться в десятки и даже сотни раз, однако четкой границы между зонами не существует. Установлено, что значительное повышение скорости и эффективности нагрева материалов в ротационных печах обусловлено не только повышением эффективности теплоотдачи от газов-теплоносителей слою материалов, но прежде всего эффективностью проникновения тепла внутрь слоя материала, т.е. интенсивностью перемешивания материала (рисунок 6).

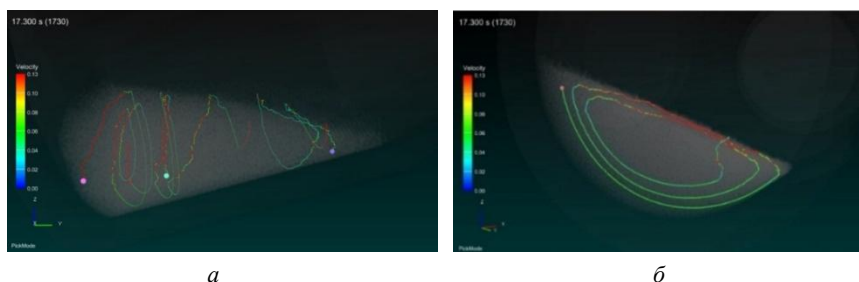


Рисунок 5 – Траектории движения частиц дисперсного материала в РНП:
а – вид сбоку, вдоль оси вращения печи (выборка по 3 частицам);
б – вид со стороны дна печи

Анализ процесса движения материала и перемешивания слоя в РНП позволяет не только получить качественную и количественную оценку переноса тепла за счет конвекции – смешивания более горячих внешних слоев, получающих тепло от газового потока с менее прогретыми внутренними слоями материалов, но и, например, оценить время, необходимое для введения флюсов и восстановителей, и определить равномерность их распределения в объеме.

Комплексные исследования позволили получить новые данные о скоростях и траектории движения газов и материалов в РНП, новые представления о структуре и конфигурации слоя, а также процессах

смешивания дисперсных материалов. Кроме того, были установлены оптимальные геометрические параметры рабочего пространства печей, требования к мощности, месту расположения и углу поворота горелки, размерам выходного патрубка.

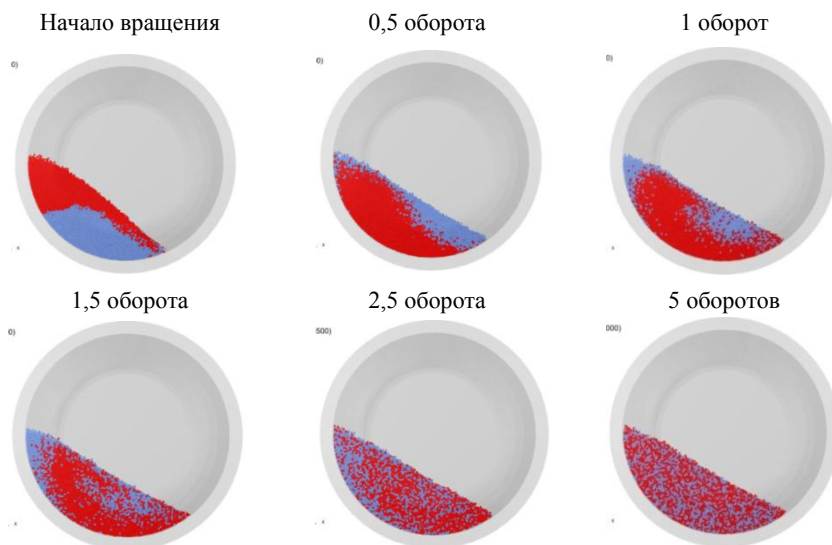


Рисунок 6 – Интенсивность перемешивания материала в РНП (сечение у дна печи)

Благодаря высокой технологической мобильности РНП является агрегатом, который позволяет осуществить процесс восстановления в наиболее энергетически выгодном режиме. Оработка технологических режимов восстановления железосодержащих отходов проводилась в условиях максимально близких к реальным производственным, для чего была разработана и изготовлена опытно-промышленная ротационная наклоняющаяся печь РНП-0,5, позволившая в производственных условиях отработать режимы восстановления оксидов железа и сложных соединений, образующихся в шламах и пыли.

Рециклинг, осуществляемый в РНП, представляет собой последовательное сочетание твердо- и жидкофазного восстановления в

одном агрегате без остановок и перегрузок в отличие от большинства агрегатов прямого восстановления, применяемых в металлургии, за исключением энергозатратных установок жидкофазного восстановления (таких как «POMELT», «AUSMELT» или «HISMELT»). Выявленные закономерности и особенности твердофазного восстановления дисперсных железосодержащих отходов в динамическом слое и уникальные возможности, которые демонстрируют ротационные наклоняющиеся печи при термической обработке полидисперсных материалов, позволили реализовать высокоскоростной непрерывный двухстадийный (ТФВ + ЖФВ) процесс рециклинга.

В качестве исходных материалов в процессе рециклинга оксидных и многокомпонентных отходов в РНП, помимо собственно железосодержащего сырья, используются твердый восстановитель и флюсы, возможно также применение ингибиторов окислительных реакций, например, алюминия, который, активно окисляясь, не только забирает кислород у оксидов железа, но и значительно повышает температуру в зоне реакции, что увеличивает скорость восстановления железа и других компонентов. В качестве восстановителя могут использоваться коксик, отходы графита, отсеv угля и антрацита, лигнин, торф и т.д. Предварительная подготовка сырья не требуется. Более того при использовании замасленной стружки или окалины сокращаются удельные затраты топлива пропорционально содержанию масла.

Длительность процесса твердофазного восстановления в РНП составляет около 2–2,5 ч. Условия в печи в этот период соответствуют режиму получения губчатого железа. Исследования показали, что переход из диапазона 800–900 °С, характерного для большинства известных процессов ТФВ, в зону 1100–1200 °С увеличивает скорость восстановления дисперсных материалов более чем в 2 раза, что говорит о неэффективности длительной выдержки материала при температурах начала металлизации (800–900 °С). В отличие от трубчатых печей, установок шахтного типа и агрегатов кипящего слоя РНП обеспечивают возможность проведения твердофазного восстановления при температурах выше 1100 °С. Скорость процесса твердофазного восстановления в смеси дисперсных материалов значительно (в 3–5 раз) выше, чем в известных агрегатах получения

губчатого или кричного железа из окускованного сырья. Переход к динамическому, постоянно перемешиваемому слою дисперсных материалов, позволяет увеличить скорости восстановления еще в 1,3–1,5 раза. Наилучшими восстанавливающими способностями в диапазоне температур 1000–1300 °С обладает графит, затем по убывающей: кокс, антрацит, лигнин.

При восстановлении в стационарном слое повышение температур до 1100 °С и более вызывает опасность спекания материала (образования крицы), после чего процесс восстановления практически останавливается. В ротационных наклоняющихся печах процесс твердофазного восстановления сопровождается интенсивным перемешиванием слоя, а переход в жидкую фазу осуществляется при высокой скорости нагрева (до 2–3 К/с), что препятствует развитию спекания и переходу в кричную стадию.

Завершающей стадией процесса рециклинга является расплавление и жидкофазное довосстановление, а также, если требуется, рафинирование и доводка расплава до заданного состава. Переход к жидкой фазе осуществляется, когда степень металлизации оксидов достигает 75–85 %. Производится догрузка в РНП оставшейся (расчетной) части восстановителя и флюсов, увеличение расхода природного газа до максимума при соотношении «газ/воздух» 1/7–1/6 и обогащении дутья кислородом (до количества, требуемого для полного сжигания топлива, примерно 6–7 % от стехиометрического количества воздуха). Температура в печи при этом за 5–10 мин повышается от ~1200 до 1700–1800 °С. Материал расплавляется, образуется вспененный шлак и в течение 30–45 мин проводится процесс жидкофазного восстановления.

Полученные в РНП массовые скорости восстановления FeO составляют около 0,2–0,3 кг/с, что соответствует известным экспериментальным данным для капли чугуна в шлаке и примерно в 4 раза ниже скоростей, полученных для электрокапиллярного движения. В сравнении с восстановлением продувкой СО или графитовым тиглем скорость восстановления в РНП оказалась выше соответственно в 6 и ~10 раз.

Место и отличия разработанного двухстадийного твердо-жидкофазного способа рециклинга дисперсных металлоотходов в РНП от известных технологий прямого восстановления оксидных материа-

лов можно представить с помощью диаграммы Fe-C, приведенной на рисунке 7, выделив условно зоны, в которых реализуются эти процессы с учетом их температурных и концентрационных режимов. Области реализации процессов восстановления в РНП выделены жирной заливкой: область ТФВ – РНП I, далее «кричный переход» и область ЖФВ – РНП II, наконец, при получении низкоуглеродистого полупродукта (без науглероживания на стадии ЖФВ) или стали – область, выделенная пунктиром, РНП III. Конкретный выбор зоны (РНП II) или (РНП III) зависит от того, какой продукт (сталь или чугун) хочет получить в результате рециклинга производитель.

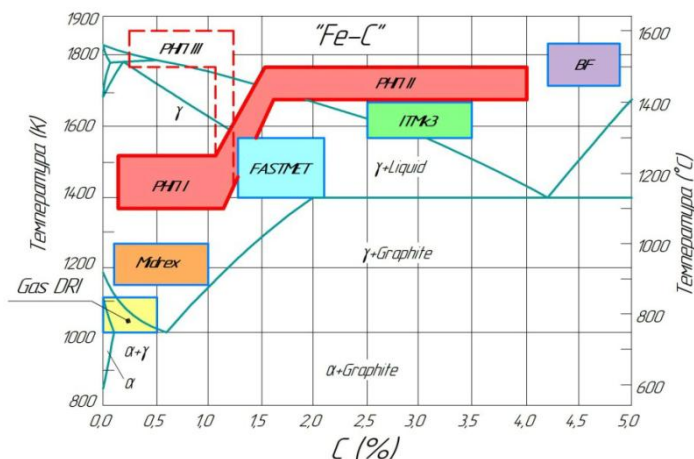


Рисунок 7 – Технологический интервал получения железоуглеродистых сплавов в РНП

Усредненные по данным контрольных плавки значения удельного расхода материалов и энергоносителей на восстановительную плавку прокатной окалины в РНП представлены в таблице 1. Температура расплава на выпуске из печи составляла 1450–1550 °С, в зависимости от получаемого сплава. Температура газов на выходе из дымоотводящего патрубка – 700–1600 °С (изменяется по ходу плавки). Рафинирование во время экспериментальных плавки не

проводилось. Выход жидкого металла из окалины при соблюдении оптимальных параметров процесса достигал 90–91 % от железа общего ($Fe_{\text{общ.}}$) в исходном сырье.

Таблица 1 – Удельные затраты материалов и энергоносителей на получение 1 т металла из окалины

Материалы	Удельный расход
1. Сырье – окалина, кг	1550–1700
2. Восстановитель – коксик, электродный бой, отсев угля и т.п., кг	600–700
3. Флюсы и присадки – известняк, доломит, плавиковый шпат, стекольный бой и т.п., кг	100–150
4. Топливо – природный газ, м ³	200–220
5. Кислород, м ³	35–45
6. Электроэнергия, кВт·ч	15

Без проведения науглероживания расплава содержание углерода в полученном из окалины сплаве колебалось в пределах 0,2–1,0 % (при этом в некоторых плавках был получен металл с содержанием С менее 0,1 %). При науглероживании жидкого расплава содержание С может быть доведено до 3,0–3,8 %. Среднее содержание остальных элементов составляло, масс. %: Si – 0,1–0,5; Mn – 0,02–0,2; S – 0,04–0,07; P – 0,01–0,02; Cu – 0,1–0,3; Cr – 0,01–0,02; Ni – 0,1–0,2. Остаточное содержание оксидов железа не превышало 1–2 %. Низкое содержание серы, несмотря на использование в качестве восстановителя коксика, объясняется условиями, которые поддерживаются в РНП на стадии жидкофазного восстановления – высоко активный вспененный шлак при основности, близкой к двум, и кислородное дутье, а также низким содержанием серы в исходном сырье. Благодаря этому сера, содержащаяся в топливе, частично удаляется с отходящими газами, частично (~ 30 %) переходит в шлак.

Общий расход твердого восстановителя в процессе восстановительной плавки в РНП распределяется на собственно восстановление – 50–60 %, горение и газификацию – до 30–40 %, пылеунос –

2–4 % (по практическим данным), остальное – выгружается вместе с шлаком [5].

Аналогично описанному выше технологическому процессу рециклинга окалины, в ротационных наклоняющихся печах может быть реализована переработка и других оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов: проржавленной стружки (доменного присада), шлама, сырья, полученного при дроблении и магнитной сепарации металлургического шлака и др.

Процесс рециклинга дисперсных металлических отходов (стружки, мелкого скрапа, обрезков в проволоки, отходов производства дробы, металлической пыли и т.п.), которые содержат относительно небольшое количество оксидов железа и других неметаллических примесей (не более 5–10 %), осуществляется минуя стадию твердофазного восстановления и включает в себя: безокислительный нагрев металлоотходов в присутствии твердого восстановителя (коквик, отсеv угля, антрацита и т.п., до 5–6 % от металлозавалки) до температуры 1150–1200 °С, расплавление шихты путем быстрого повышения температуры за счет обогащения дутья кислородом (до 27–28 %), выдержка расплава до прекращения кипа и слив расплава и шлака. Весь процесс плавки дисперсных металлических отходов занимает в РНП не более 40–45 мин, при этом угар металла не превышает 1,5–2,5 %. При необходимости в РНП может быть проведено науглероживание и рафинирование расплава.

Заключение. Разработанный процесс твердо-жидкофазного рециклинга позволил впервые в мировой практике реализовать рентабельный малотоннажный рециклинг дисперсных оксидных железосодержащих отходов в одном агрегате – РНП, без перегрузок и остановок процесса, без предварительной подготовки и окускования исходного сырья, с использованием в качестве восстановителя отходов твердых углеродсодержащих материалов, с получением железоулеродистых сплавов с выходом металла (чугуна или стали) до 90 % от теоретически возможного [9].

Процесс позволяет вести порционную переработку материалов, что дает возможность осуществлять децентрализованный, в том числе малотоннажный, рециклинг металлоотходов непосредственно на предприятиях, где эти отходы образуются. Наибольшие преимущества разработанные технологии обеспечивают при переработке

дисперсных материалов с размером частиц от 0,05–0,1 до 20–30 мм и содержанием извлекаемого металла не менее 40–45 %.

Внедрение разработанных технологий и получение высококачественных шихтовых материалов или непосредственно литейных сплавов из металлоотходов позволит решить важные экономические и экологические народнохозяйственные задачи: создать новую сырьевую базу для отечественного литейного производства, сократить импорт первичных шихтовых материалов и металлов, организовать безотходный оборот металлов в промышленности, ликвидировать накопленные металлоотходы. В масштабах Беларуси переработка только вновь образующихся железосодержащих отходов позволит ежегодно возвращать в производство до 150–180 тыс. т чугуна и стали. Рентабельность производственных участков по переработке собственных дисперсных металлоотходов, организованных на машиностроительных и металлообрабатывающих предприятиях, составит не менее 40–50 %, а возврат инвестиций – не более 1–2 лет. Производственная мощность таких участков может составлять от 0,5–1 тыс. т до 50–100 тыс. т ежегодно перерабатываемых отходов. Освоение результатов работы позволит получить реальный экономический, экологический и социальный эффект.

Список литературы

- 1. Сырье** для черной металлургии: Справочное издание: в 2-х т. Т.1. Сырьевая база и производство окускованного сырья (сырье, технологии, оборудование) / М.Г. Ладыгичев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2001. – 896 с.
- 2. Юсфин, Ю.С.** Промышленность и окружающая среда / Ю.С. Юсфин, Л.И. Леонтьев, П.И. Черноусов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 469 с.
- 3. Курунов, И.Ф.** Состояние и перспективы бездоменной металлургии железа / И.Ф. Курунов, Н.А. Савчук. – М.: Черметинформация, 2002. – 198 с.
- 4. Дьяконов, О.М.** Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов / О.М. Дьяконов – Минск: Технология, 2012.–262 с.

5. **Ровин, С.Л.** Рециклинг металлоотходов в ротационных печах / С.Л. Ровин. – Минск: БНТУ, 2015. – 382 с.

6. **Ровин, С.Л.** Движение газов в ротационных наклоняющихся печах / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, В.А. Жаранов // Литье и металлургия. – 2016. – № 3. – С.11–19.

7. **Ровин, С.Л.** Движение дисперсных материалов во вращающихся смесителях / С.Л. Ровин, Л.Е. Ровин, В.А. Жаранов // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2018. – № 3. – С. 32–40.

8. **Coupled CFD-DEM modeling: formulation, implementation and application to multiphase flows** / H.R. Norouzi [et al.]. – Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2016. – 416 p.

9. **Способ** малотоннажного рециклинга дисперсных железосодержащих металлоотходов без их предварительной подготовки путем твердо-жидкофазного восстановления в ротационной наклоняющейся печи с получением чугуна или стали: Евразийский патент № 0335560 / С.Л. Ровин, А.С. Калиниченко, Л.Е. Ровин; заявитель БНТУ, заявка № 201700350 от 23.06.2017; патент выдан 31.10.2019 // опубликован в Бюллетене ЕПВ «Изобретения (Евразийские заявки и патенты)» № 10/2019.

References

1. **Syr'e dlya chernoj metallurgii: Spravochnoe izdanie: v 2-h t. T.I. Syr'evaya baza i proizvodstvo okuskovannogo syr'ya (syr'e, tekhnologii, oborudovanie)** [Raw materials for ferrous metallurgy: Reference edition: in 2 volumes. Vol. 1. Raw materials base and production of aggregated raw materials (raw materials, technologies, equipment)] / M.G. Ladygichev [et al.]. – Moscow: Mechanical engineering Publ., 2001. – 896 p.

2. **Yusfin, Yu.S. Promyshlennost' i okruzhayushchaya sreda** [Industry and environment] / Yu.S. Yusfin, L.I. Leont'ev, P.I. Chernousov. – Moscow: ИКС «Академкнига», Publ., 2002. – 469 p.

3. **Kurunov, I.F. Sostoyanie i perspektivy bezdomennoj metallurgii zheleza** [State and Prospects of Blast-Free Iron Metallurgy] / I.F. Kurunov, N.A. Savchuk. – Moscow: СHermetinformaciya Publ., 2002. – 198 p.

4. **D'yakonov, O.M.** *Kompleksnaya pererabotka struzhki i metallosoderzhashchih shlamov* [Integrated processing of shavings and metal-containing sludge] / O.M. D'yakonov. – Minsk: Tekhnologiya Publ., 2012. – 262 p.

5. **Rovin, S.L.** *Recikling metalloothodov v rotacionnyh pechah* [Recycling of metal waste in rotary kilns] / S.L. Rovin. – Minsk: BNTU Publ., 2015. – 382 p.

6. **Rovin, S.L.** *Dvizhenie gazov v rotacionnyh naklonyayushchihsya pechah* [Gas movement in rotary tilt ovens] / *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy.* – 2016. – No. 3. – P. 11–19.

7. **Rovin, S.L.** *Dvizhenie dispersnyh materialov vo vrashchayushchihsya smesitelyah* [Movement of dispersed materials in rotating mixers] / S.L. Rovin, L.E. Rovin, V.A. ZHaranov // *Vestnik GGTU im. P.O. Suhogo = Bulletin of Gomel State Technical University named after P.O.Sychoy.* – 2018. – No. 3. – P. 32–40.

8. **Coupled CFD-DEM modeling: formulation, implementation and application to multiphase flows** / H.R. Norouzi [et al.]. – Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2016. – 416 p.

9. **Rovin S.L., Kalinichenko A.S., Rovin L.E.** *Sposob malotonnazhnogo reciklinga dispersnyh zhelezosoderzhashchih metalloothodov bez ih predvaritel'noj podgotovki putem tverdo-zhidkofaznogo voss-tanovleniya v rotacionnoj naklonyayushchejsya pechi s polucheniem chuguna ili stali* [A method of low-tonnage recycling of dispersed iron-containing metal waste without their preliminary preparation by means of solid-liquid reduction in a rotary tilting furnace to obtain cast iron or steel]. Evrazijskij patent No. 10/2019.

Поступила 24.07.2020.

Received 24.07.2020