



The advantages of rotary furnaces, developed by specialists of GGTU named after P. O. Suhoj and UP «Tehnolit» for carrying out of ferric oxide recycling with regard to conditions of the Republic of Belarus, are described.

С. Л. РОВИН, УП «ТЕХНОЛИТ», Л. Е. РОВИН, Т. М. ЗАЯЦ, ГГТУ им. П. О. Сухого

УДК 621.74

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА В РОТАЦИОННЫХ ПЕЧАХ

Среди металлоотходов значительную часть составляют оксидные материалы: окалина, ржавчина, абразивная и аспирационная пыль плавильных печей, шламы, окисленная стружка и т. п.

Рециклинг таких материалов – это, прежде всего, процессы восстановления, которые в действующих печах литейных цехов практически осуществить нельзя без больших потерь в технико-экономических показателях плавки: затрат дополнительного топлива, энергии, восстановителей, снижении производительности печей и качества металла. Поэтому до настоящего времени такого рода материалы использовались лишь в шихте доменных и обжиговых печей, причем предварительно они подвергались агломерации или брикетированию.

Во всех странах, имеющих развитое машиностроение и металлургию, ежегодно образуется большое количество оксидных металлоотходов, что создает экономические и экологические проблемы. Сотни тысяч тонн таких материалов накоплены и в Беларуси, где нет собственного полнопрофильного металлургического производства, имеющего агрегаты для восстановления оксидов и получения первичных сплавов.

Выполненные в последние годы специалистами ГГТУ им. П. О. Сухого и УП «Технолит» (Технопарк БНТУ) работы в области ротационных наклоняющихся печей (РНП), исследования теплофизических процессов, особенностей механики дисперсных материалов и газов, изучение производственных характеристик при переплавке различных сплавов позволили получить представление о широких технологических возможностях РНП при работе с дисперсными материалами.

Было сделано предположение о перспективности их использования для осуществления рециклинга оксидов железа применительно к условиям РБ, где образование металлоотходов рассредото-

чено среди десятков предприятий, объемы отходов сравнительно небольшие (по меркам металлургии), состав и структура отходов на каждом предприятии различны. Поэтому малотоннажный и соответственно малозатратный рециклинг, в результате которого десятки тысяч тонн металлоотходов превращаются в чугун или сталь, является для республики наиболее перспективным.

С целью экспериментальных исследований технологии рециклинга была разработана экспериментальная печь РНП-05 (емкостью 0,5 т), предназначенная для проведения восстановительных плавов оксидов, которая была изготовлена и смонтирована на РУП «БМЗ». При проведении исследований использовали железосодержащие отходы, образующиеся на предприятии: окалина, шламы, металлургическая пыль и т. п. (на БМЗ ежегодно образуется более 70 тыс. т такого рода отходов).

Печь состоит из футерованного корпуса, имеющего форму цилиндра, соединенного с усеченным конусом, который установлен на качающейся платформе, а также поворотной крышки, где установлены блочная газовая горелка, патрубок для отвода печных газов, устройство для ввода кислорода и приборы контроля. Печь имеет привод подъема (наклона) корпуса, привод поворота крышки и привод вращения, снабженный инвертером, который позволяет вращать корпус печи в прямом и обратном направлении со скоростями от 0 до 10 об/мин.

Согласно поставленной задаче, разрабатываемая технология должна была обеспечить восстановление оксидов железа в одном агрегате – РНП с получением жидкого металла (чугуна или стали), причем предусматривать использование шихтовых материалов, включая топливо, восстановители и флюсы без всякой предварительной подготовки.

Предпосылкой к постановке такой задачи явился накопленный в мире опыт по тепловой обработке, в том числе восстановлению рудных материалов во вращающихся печах различного типа. В таких печах восстановление оксидов осуществляется только до стадии губчатого железа – металлизированных окатышей. Последние затем переплавляются в электрических печах. Шихта перед загрузкой в восстановительные агрегаты подвергается специальной подготовке: сушке, окатыванию, смешиванию с восстановителем, флюсующими добавками и т. п. Наряду с вращающимися барабанными печами предпринимаются попытки использования также шахтных, кольцевых печей, реторт, конвертеров и т. п.

Опыт свидетельствует о том, что вращающиеся печи наилучшим образом адаптированы к переработке полидисперсного материала. При вращении корпуса печи материал под действием сил адгезии и когезии занимает сегмент под углом от 25 до 45° (рис. 1). Затем часть частиц слоя, увлекаемая подложкой (поверхностью цилиндра), достигает точки отрыва (угол 90–100° к вертикали) и под действием силы тяжести скатывается по поверхности слоя. Скорость и объем материала, совершающего петлеобразное движение в слое, определяются соотношением сил адгезии, когезии, тяжести и сопротивления трению частиц в слое, а также скоростью вращения корпуса. Управляя скоростью вращения, можно изменять интенсивность перемешивания и, тем самым, интенсивность тепло- и массообмена, которая приближается к величине, характерной для печей с псевдоожиженным слоем. В этих условиях коэффициент теплоотдачи (α_v) достигает значений $\alpha_v = 3000$ кДж/(м³·К), что на два порядка выше, чем для нагрева неподвижного слоя. Кроме того, в динамическом слое

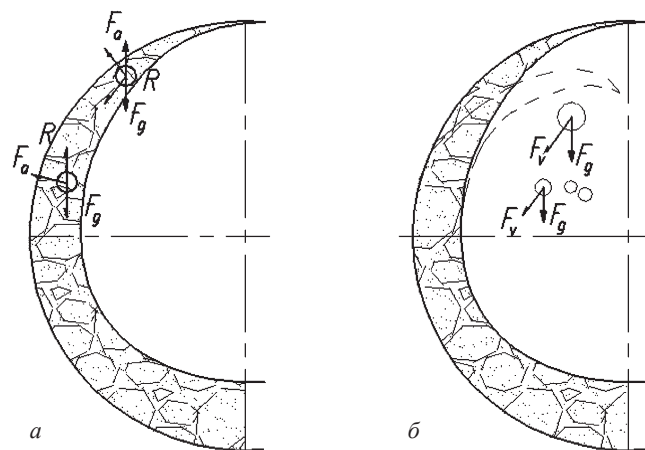


Рис. 1. Схема движения материалов во вращающейся печи: F_a , F_g – силы адгезии и гравитации; R – реакция слоя; F_v – сила аэродинамического давления; a – момент захвата материала; b – момент отрыва частиц

частицы прогреваются равномерно по всему сечению. В неподвижном слое того же материала кажущийся коэффициент теплопроводности $\lambda_{сл} \approx 0,1-0,3$ Вт/(м·К).

Тепло во вращающихся печах, в том числе РНП, передается шихтовому материалу несколькими способами: излучением от факела и стенок печи, теплопроводностью от стенок печи при соприкосновении со слоем, конвекцией от факела. Движущийся (пересыпающийся) поверхностный слой материала продувается на глубину до 50 мм (по практическим данным), тепло в нем интенсивно передается взвешенным частицам, подобно тому, как проходит аналогичный процесс в псевдоожиженном слое.

Теплообмен излучением от стен можно рассчитать, приняв температуру футеровки постоянной (по зонам), что не противоречит реальным условиям из-за постоянного обновления поверхности при вращении печи. Тогда количество тепла, переданного от стен слою материала, будет равно:

$$Q = k \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] F_n \tau,$$

где k – коэффициент, учитывающий высокую запыленность газового потока в печи; ε – степень черноты футеровки; c_0 – приведенный коэффициент излучения абсолютно черного тела; T_c , T_m – температура футеровки и нагреваемого материала; F_n – площадь излучающей поверхности с учетом углового коэффициента; τ – время нагрева материала (по практическим данным оно составляло не более 15 мин, т. е. 10–12% от времени плавки).

В начальный период плавки нагрев загруженного материала может быть рассчитан как сумма процессов по дифференциальному уравнению Фурье с граничными условиями III и IV рода при передаче тепла излучением и конвекцией от факела. В первом приближении теплопроводность динамического слоя материала может быть задана по экспериментальным данным ($\alpha_{сл} \approx 2500$ Вт/(м³·К)). После достижения заданной температуры (900–1100 °С) устанавливается стационарный режим теплообмена, когда количество тепла, передаваемого шихте, расходуется только на осуществление процесса восстановления (продолжительность этого периода 1,5–2,0 ч). При этом количество тепла, отдаваемого футеровкой, составляет не более 10% от конвективного теплообмена.

В РНП тепловой к. п. д. по балансовым уровням выше, чем у обычных вращающихся печей с идентичными параметрами. Поэтому исследование режимов в РНП представляет значительный интерес.

В РНП газы совершают петлеобразное движение и поэтому можно условно выделить в печи три взаимосвязанные зоны по режимам теплообмена: нижняя – от устья горелки до торца печи, торцовая и верхняя – от торца до отводящего патрубка. Движения газов в нижней и верхней частях происходят навстречу друг другу. В первом приближении можно принять, что пространство печи разделено горизонтальной плоскостью на две примерно равные части.

В нижней зоне – максимальные температуры, скорости газов и концентрации CO_2 и H_2O , в верхней – температура ниже (остаточная температура), соответственно ниже рабочие скорости при равном расходе, а в газах содержатся максимальные количества CO и H_2 . Уменьшение в этом потоке содержания трехатомных газов и температуры снижает количество излучаемого тепла.

В зависимости от соотношения температур потока газов и футеровки в верхней части печи теплообмен может изменить направление. Охлаждающее действие потока в верхней зоне наблюдается в завершающей стадии процесса восстановительной плавки при выдержке, когда футеровка при кислородном дутье разогревается до температур $1700\text{--}1800^\circ\text{C}$, а поток после отключения подачи кислорода имеет температуру 1500°C .

При расчете передачи тепла излучением толщина излучающего высокотемпературного слоя должна приниматься не более половины диаметра корпуса печи, а длина – меньше длины печи на толщину газового торцового вертикального потока. Существенно меняются и поля скоростей движения, причем не только из-за петлеобразного неизотермического характера течения, но и из-за сложного пространственного перераспределения потоков. В нижней части – раскрывающийся поток до границ рабочего пространства и (условно) до соприкосновения с верхним обратным течением. В торце – течение по переменной площади сечения (по касательной к поверхности полусферы) и, наконец, в верхней части – сужающийся поток движется, охлаждаясь или нагреваясь, к выходному патрубку. На границе, разделяющей потоки, осуществляется конвективный перенос тепла.

Описание конвективного теплообмена в верхней части печи между газом и твердой поверхностью футеровки достаточно традиционно и расчет в критериальном виде не представляет трудностей при задании (или замерах) исходных параметров: начальных температур потока и футеровки, скоростей движения и конфигурации потоков.

Передача тепла конвекцией нагреваемому материалу – наиболее значимый процесс при нагреве

динамического слоя дисперсного материала требует дополнительных исследований, так же как и массообмен, определяющий процессы восстановления оксидных материалов.

Проточность мелкозернистых материалов с размером частиц $d = 0,3 - 5,0$ мм (где d – приведенный диаметр) соответствует критерию проточности K_n в пределах $10^5\text{--}10^7$ и соответственно коэффициенту объемной концентрации $\beta = \frac{V_r}{V_m} \approx 0,35 - 0,65$, а массовый $\mu = \frac{M_m}{M_r} \approx 500 - 1500$.

Эти параметры относятся к подвижному верхнему слою материала толщиной ~ 50 мм. В общем случае интенсивность межфазного переноса для продуваемого слоя связана с размером частиц соотношением $\alpha_c = \alpha (1 + 0,2\text{Bi})^{-1}$, где α – внешний коэффициент теплообмена; $\text{Bi} = \frac{\alpha_c d}{\lambda}$ – критерий Био; λ – коэффициент теплопроводности материала.

При уменьшении скорости потока газов, омывающего частицы в слое, и размеров частиц турбулентность потока уменьшается ($\text{Re} \rightarrow 0$), а так как критерий Нуссельта $\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda} = f(\text{Re})$, то соответ-

ственно снижается и интенсивность нагрева (α). Здесь λ – теплопроводность газов. При этом однако сохраняется высокая степень неоднородности потока, поэтому даже в глубине динамического слоя $\text{Nu} \gg \text{Nu} = f(\text{Re}_0)$. Соответственно сохраняется и концентрационный напор на реакционной поверхности частиц.

Нагрев верхнего динамического слоя материала в ротационной печи может быть определен по модифицированному уравнению нестационарной теплопроводности, где вместо коэффициента теплопроводности слоя $\lambda_{\text{сл}}$ используется бином (αd) , рассчитанный для усредненных значений процесса передачи тепла отдельной частицы продуваемого слоя (для одномерной схемы):

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{(\alpha d)}{c\rho} \frac{d^2t}{dx^2},$$

где x – высота (толщина) слоя.

Параболический закон ($n \approx 2,5$) распределения температур в слое сохраняется, так как плотность динамических сил увеличивается с глубиной и соответственно уменьшается интенсивность потока газов.

Для верхней части слоя $\alpha_v \approx 10^3$ кВт/($\text{м}^3 \cdot \text{К}$), для нижней неподвижной части $\alpha_v \approx 0,3$ кВт/($\text{м}^3 \cdot \text{К}$) при тех же диаметрах $d \leq 5$ мм.

Необходимо отметить, что максимальная интенсивность для нагрева дисперсного материала достигается во взвешенном состоянии, для тех же условий время нагрева частицы, например чешуйки окалины или песчинки, составит ~0,004–0,1 с, но на практике такой режим может быть использован только для монодисперсного материала.

Во вращающихся печах, где используется механическое перемешивание материала, тепло и массообмен зависит от соотношения толщины внешней динамической и неподвижной внутренней части слоя, границей между которыми является скорость фильтрации газа V_{ϕ} . Толщину динамического слоя можно определить по сопротивлению, которое не может быть больше скоростного потока газов в печи. Скорость газов в РНП обычно

$$V_{\Gamma} \leq 13-15 \text{ м/с. Отсюда } \Delta p_c \leq \frac{1369^2 \rho_2}{273-t}.$$

Очевидно, что диспергирование в этих условиях может осуществляться только под действием механических сил (обрушение слоя).

Эмпирические уравнения, определяющие степень интенсификации теплообмена при движении материала, полученные для соотношений характерного размера слоя (D) и частиц (d) более 40 крат и порозности не менее $\varepsilon \geq 0,4$:

$$Nu_n = \frac{\alpha_n d}{\lambda} = 6,9 Re^{0,47},$$

$$\alpha = \alpha_n \left(1 + 4 \left(\frac{V_M}{V_{\phi}} \right)^{0,36} \right),$$

где величины с индексом «н» относятся к неподвижному слою; V_{ϕ}/V_M – скорости фильтрации и движения материала.

Способствует увеличению интенсивности конвективного теплообмена и то, что в РНП можно использовать более высокие скорости движения газов по сравнению с проходными барабанными печами: V_{Γ} в экспериментальных плавках повышали до 10 м/с в нижней зоне печи, что недопустимо в проходных печах из-за пылеуноса. Петлеобразное движение газов в РНП приводит к осаждению частиц в торцевой зоне у днища печи и в циркуляционной зоне перед крышкой, где за счет подсосывающего действия факела частицы увлекаются в поток нижней части печи. Соответственно с увеличением V_{Γ} увеличивается и скорость фильтрации V_{ϕ} .

В лабораторных условиях были промоделированы режимы теплообмена в слое зернистого материала при различных динамических условиях (рис. 2, 3).

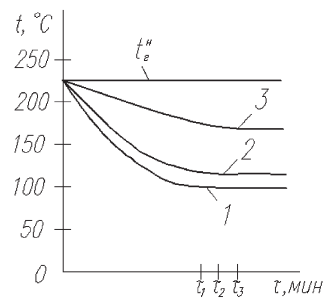


Рис. 2. Изменение температуры газов в процессе тепловой обработки: 1 – ротационный режим; 2 – вращение корпуса; 3 – неподвижный слой

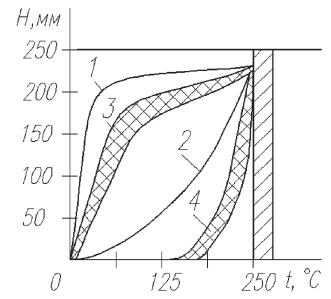


Рис. 3. Температура в слое материала при различных способах нагрева: 1 – неподвижный слой; 2 – вращение корпуса; 3 – вращение потока, корпус неподвижен; 4 – ротационный режим ($\tau = 5$ мин)

На рис. 2 показаны изменения температуры газов (t_{Γ}^H) за счет теплоотдачи при нагреве материала, на рис. 3 – данные по изменению температуры по сечению нагреваемого слоя. Исследования режимов движения газов в печи позволяют сделать вывод о необходимости корректировки коэффициента в эмпирических уравнениях для расчета α_k : $Nu = AR e^{\eta}$.

Течение газов в ротационных печах отличается большей сложностью и несимметричностью, сочетанием прямых и обратных токов, наличием циркуляционных зон, изменением параметров по всем трем координатам. Некоторое представление о характере течения дают (рис. 4) картины течения в формате 3Д, полученные в результате моделирования с помощью ППП CosmosFlowWorks.

Массообмен в слое на микроуровне осуществляется за счет конвекции и те закономерности, которые отмечены при тепловой обработке, характерны и для переноса реагентов в слое. Это прежде всего газы-восстановители CO и H_2 и продукты сжигания природного газа CO_2 и H_2O .

На микроуровне, начиная с приграничного слоя, существенную роль играет молекулярная диффузия, зависящая от градиента концентраций (аналог теплового уравнению Фурье).

Нижние пределы концентрационных параметров определяются физико-химическими процессами взаимодействия на поверхности оксидов и твердого углерода с компонентами газовой смеси, а также отводом (диффузией) реагентов внутрь восстанавливаемой частицы.

Химические реакции взаимодействия оксидов железа с газами-восстановителями достаточно хорошо известны. В РНП, отапливаемых природным газом, состав продуктов горения при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,0-1,1$ включает CO_2 и H_2O (16–18%), остальное N_2 (9–10%) и доли

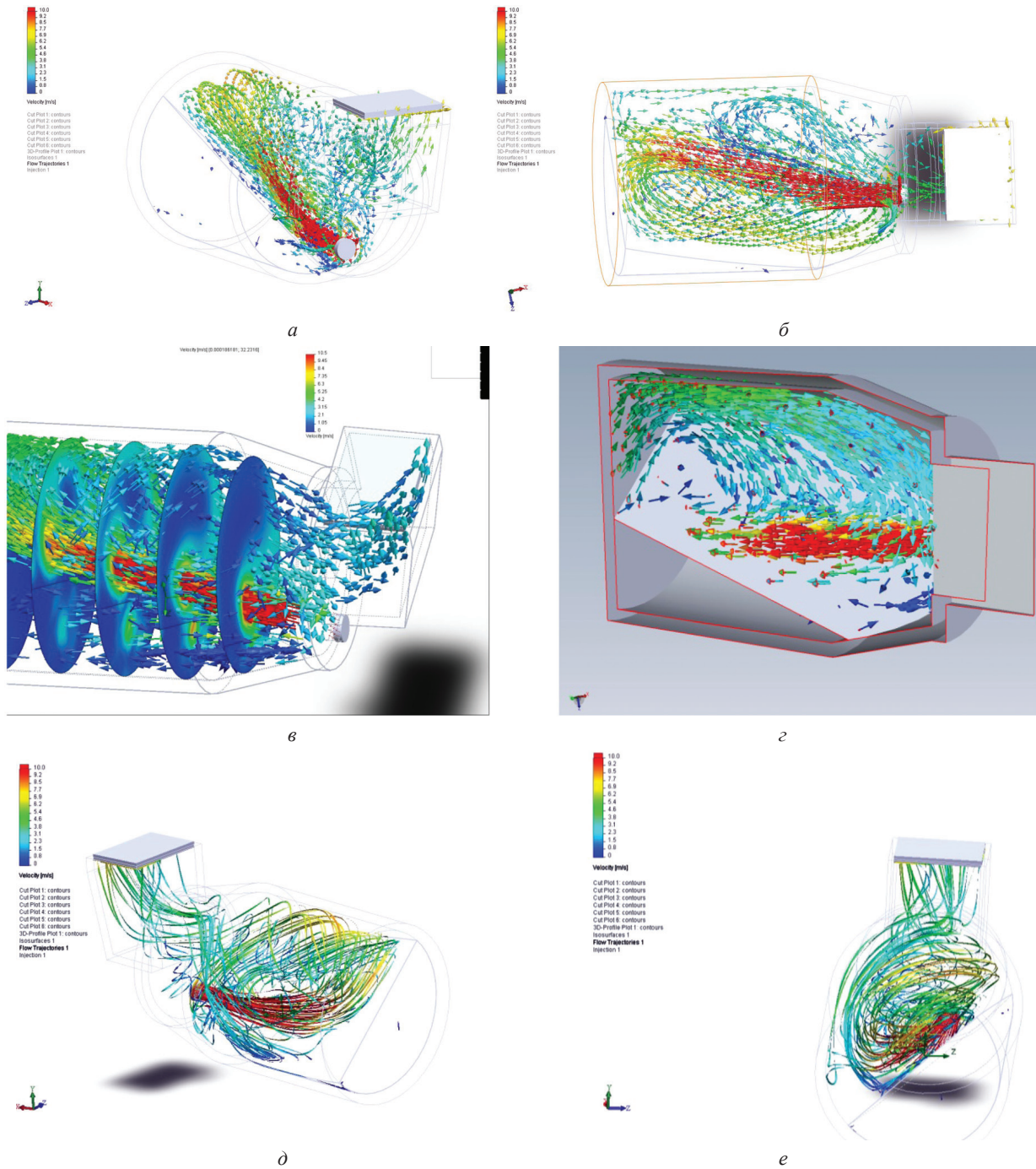


Рис. 4. Движение газов в печи РНП-05 (компьютерное моделирование): *а* – начальный период – полная загрузка печи; *б* – то же (вид сверху); *в* – процесс твердофазного восстановления $t = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Изменение скоростного режима; *г* – то же, вертикальное осевое сечение потока; *д* – линии тока при непрерывной фиксации в течение одного периода (траектория элементов потока); *е* – то же, вид с торца печи

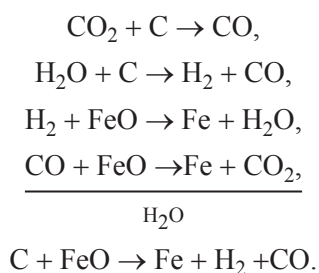
процента CH_4 , H_2 , CO , O_2 . При их уменьшении соответственно растут отношения CO/CO_2 и $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$. Увеличивается остаточное содержание CH_4 до 1,0–1,5%, исчезает свободный O_2 . В пределе при проведении экспериментальных плавок α снижалось до 0,6–0,7, а соотношение CO/CO_2 возрастало с 0,1–0,2 до 2,5 крат.

Однако только за счет изменения α создать устойчивый восстановительный потенциал атмосферы в печи практически невозможно. Поэтому при

проведении восстановительных плавок в РНП-05, как и во всех известных установках прямого получения железа, использовались твердые углеродсодержащие материалы.

В экспериментах был опробован ряд восстановителей, представляющих отходы различных видов производства: графит, коксик, уголь, в том числе антрацит, лигнин (отходы гидролизного производства – наиболее дешевый материал).

В присутствии твердого углерода реальный гетерогенный процесс проходит через следующие стадии:



Одновременное присутствие в газах CO и H₂O приводит также к развитию реакции образования H₂ + CO₂, направление которой зависит от концентрации H₂, т. е. преимущественно в пограничном слое.

Определяющей стадией является газификация углерода, а процесс восстановления практически будет зависеть от содержания в шихте твердого углерода, его дисперсности, распределения среди оксидов (эффективности перемешивания), реакционной способности и температуры.

Реакция газ – твердое тело проходит на поверхности материала, увеличение дисперсности и пористости углеродсодержащего восстановителя и оксида является положительным фактором. В РНП, способной работать на любых дисперсных материалах, предел измельчения ограничивается только скоростями уноса частиц. При вращении печи материал также увеличивает дисперсность, если при загрузке окалина имеет $d_5 \approx 3-5$ мм, то после обработки в течение 1 ч $d_{50} \leq 1-2$ мм, а доля фракций $d < 0,5$ мм увеличивается вдвое.

Что же касается реакционной способности, то в перечисленном выше ряду восстановителей она возрастает в направлении лигнина.

Следует также отметить, что теоретически при температурах $T > 810$ °С (точка пересечения кривых равновесия на графиках $K = f(T)$) эффективность H₂ выше, чем CO, и, следовательно, необходимо при повышении температуры поддерживать более высокое соотношение CO/CO₂.

На практике расход CO на восстановление FeO заметно выше, чем рассчитанный по стехиометрическим соотношениям FeO + CO = Fe + CO₂. Ряд исследователей считают, что из-за нестехиометрического состава вюститита (т. е. отношения Fe/O±1) количество CO в реакции восстановления увеличивается с 1 моля на 1 моль FeO до 3,5 молей при температурах $t \geq 1000$ °С. Очевидно, данная реакция должна рассчитываться по уравнению: FeO + nCO = Fe + CO₂ + (n - 1) CO и при $t > 800$ °С равновесный состав без учета N₂ будет содержать

~70% CO или в смеси $\geq 20\%$. В экспериментальных плавках содержание CO довели до 25–26%.

Восстановление FeO, происходящее на поверхности частицы, образует тонкий поверхностный слой железа (~10 нм). Дальнейшее восстановление обуславливается скоростью диффузии атомов и ионов в твердом теле. Конечно, при измельчении материала механическое дробление, изломы, сколы способствуют обновлению поверхности, но это не может служить определяющим фактором.

Диффузия в твердой фазе является лимитирующим фактором при уровне восстановления >50%. Помимо прочих факторов, решающую роль играет толщина восстанавливаемой частицы.

В работе на РНП-05 использовали прокатную окалину с толщиной пластин (чешуек) 0,5–1,0 мм. Возможно, этот фактор является одной из причин существенного сокращения продолжительности процесса восстановления. В экспериментальных плавках стадия твердофазного восстановления занимала от 1,5 до 2,5 ч, в то время как аналогичные процессы получения губчатого железа в известных установках прямого восстановления занимают до 10–14 ч.

Другое важное обстоятельство – это, конечно, температурный режим. В РНП-05 температура устанавливалась предельно высокой для твердофазной стадии восстановления (1100–1150 °С). Верхний предел ограничивается развитием «спекания», т. е. образованием окатышей, «слипшихся» гранул и комков, которые быстро вырастают до шаров диаметром 200–300 мм.

Для того чтобы избежать этого, в большинстве агрегатов, работающих с дисперсными материалами, верхний предел температуры поддерживается не более 900–950 °С. Так как процессы переноса пропорциональны температуре, то в диффузной области снижение температуры приводит к замедлению процесса в целом.

Скорость восстановления или скорость изменения концентрации продуктов реакции определяется концентрационным градиентом в направлении, нормальном к поверхности:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2},$$

а расход восстановителя соответственно равен

$$I = D \frac{\partial c}{\partial \tau}.$$

Коэффициент диффузии зависит от температуры по экспоненциальному закону:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right).$$

Для вюстита кажущаяся энергия активации составляет $E = 125\text{--}150$ кДж/моль.

Скорость роста толщины слоя восстановленного железа пропорциональна скорости диффузии через него. Тогда

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = k \frac{\partial \delta}{\partial \tau} = kD \frac{\Delta c}{\xi}.$$

Отсюда (от 0 до τ)

$$\delta = \sqrt{2kD\Delta c\tau},$$

а

$$I = \sqrt{\frac{D\Delta c}{2k\tau}},$$

т. е. скорость диффузии по мере роста степени восстановления при постоянном градиенте концентрации замедляется пропорционально $t^{1/2}$. Отсюда вытекает понятие критического размера окатышей в практике получения губчатого железа в обжиговых печах. Сохранить достаточно высокую скорость можно путем увеличения концентрации восстановителей в потоке и площади эффективной реакционной поверхности:

$$\frac{\partial I}{\partial \tau} = km_c S_3 (\text{CO} - \text{CO}^p) = km_c S_3 (\text{CO}_2^p - \text{CO}_2),$$

где CO и CO_2 – текущие значения концентрации в потоке или пограничном слое; k – коэффициент пропорциональности. Более активно действует H_2 и скорость восстановления сохраняется постоянной практически в течение всего процесса (лабораторный эксперимент).

Диффузионный перенос в слое восстановленного железа зависит от развития микродефектов и образования дислокаций, приводящих к нарушению сплошности частиц. Этому способствуют различие коэффициентов термического расширения кристаллов и кластеров в разных направлениях, а также присутствие инородных включений, например в вюстите наличие включений Fe_2O_3 .

На скорость восстановления влияют добавки CaO (до 10%), MnO и MgO , которые образуют твердые растворы. При этом возрастает пористость образующегося железа. Средний размер пор находится в пределах 20–250 нм, но при этом суммарная поверхность их может составить более 1000 $\text{см}^2/\text{г}$, что, конечно, увеличивает скорость процесса.

В целом механизм твердофазного восстановления дисперсного материала изучен недостаточно, что не позволяет однозначно прогнозировать и рассчитывать параметры и режимы технологического

процесса. Так, стадии внутри- и межкуристаллической диффузии атомов Fe, O и C, а также миграции дислокаций в условиях восстановления FeO в литературе не имеют точных количественных оценок и достаточно противоречивы. Недостаточно изучены процессы адсорбции газов-восстановителей и редиффузии продуктов реакции CO и CO_2 .

Однако проведенные натурные эксперименты позволяют сделать сравнительный анализ процессов восстановления в РНП и вывод об определенных преимуществах данной техники и технологии. Особенно с учетом осуществления в том же агрегате второй стадии процесса – жидкофазного восстановления с получением расплава металла – чугуна или стали. При этом ликвидируются неизбежные потери тепла, которые имеют место при перегрузке в системах, состоящих из последовательной цепочки агрегатов.

Несмотря на условность сопоставления данных, полученных на экспериментальной печи РНП-05 и промышленных агрегатах емкостью десятки тонн, тем не менее, можно сопоставить такие параметры, как степень восстановления, продолжительность процесса, удельные затраты, габариты, удельная производительность и др.

В РНП за счет высокой турбулентности потоков коэффициенты конвективного тепло- и массообмена выше, чем в проходных (прямоточных) вращающихся печах и естественно выше, чем в печах других типов. Печи РНП позволяют работать с шихтой, дисперсность которой выше на порядок, а, следовательно, не требуется подготовка (окомковывание) исходных материалов. При этом сокращается и длительность процесса восстановления, которое лимитируется внутренней диффузией в твердой фазе.

Осуществление последовательно двух различных по природе процессов восстановления (в твердой и жидкой фазе) создает возможность корректировки режима обработки и состава сплава до получения продукции.

Наконец, «всеядность» РНП позволяет использовать не только сырье, но и восстановители любого качества. Так, в отдельных экспериментальных плавках был использован лигнин из отвалов гидролизных заводов с влажностью около 40%. Стоимость такого материала составляет менее 15 тыс. бел. руб. за 1 т.

Общий расход тепловой энергии в установках получения губчатого железа (до расплавления) колеблется в пределах 3–16 МДж/т, 15–16 МДж/т расходуется в доменных печах, но уже с получением жидкого металла. В экспериментальной РНП

затраты тепла составили 30–45 МДж/т. Однако, очевидно, что при переходе к промышленным печам емкостью 10–20 т потери тепла, а, следовательно, и удельные затраты будут существенно снижены. Так, данные теплотехнического обследования РНП-2,0 на ГЛЗ «Центролит» показали, что термический к. п. д. печи составляет 50%, что примерно вдвое превышает к. п. д. традиционных топливных печей. Опыты по металлизации (твердофазному восстановлению) железной руды в экспериментальной вращающейся барабанной печи диаметром 0,9 м и длиной 3,6 м, выполненные в свое время на предприятии «Механобрчермет», привели к удельным энергозатратам в 21 МДж/т. Тот же эксперимент на промышленной печи диаметром 4 м и длиной 50 м потребовал 5,5 МДж/т.

Удельная производительность промышленных установок для получения губчатого железа колеблется от 0,3 до 1,5 т/м³ в сутки. При пересчете на суточную работу даже экспериментальная РНП-05 показала сопоставимый результат: 0,8–1,0 т/м³ в сутки. Это дает основание предположить, что промышленные РНП (емкостью 10–20 т) позволят не менее чем на порядок улучшить этот показатель.

Большие достоинства ротационных печей – их относительно невысокая стоимость и компактность. Так, например, потребность в производственной площади для РНП емкостью 3–10 т по расплаву чугуна в 3–5 раз меньше площади, занимаемой индукционными или дуговыми печами аналогичного объема (с учетом систем электрообеспечения и охлаждения электропечей).