

УДК УДК 622.788.5:669.094.1.

Н.А. Колбин, Л.В. Камкина, А.В. Бабенко

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ МЕТАЛИЗАЦИИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ В ШАХТНОМ АГРЕГАТЕ

Аннотация. Проведены исследования, позволяющие выбрать рациональный режим металлизации железорудных окатышей применительно к их восстановлению в слоевых условиях. Показана связь между скоростью продвижения реакционной зоны, ее шириной и производительностью шахтного агрегата. Скорость продвижения реакционной зоны прямо-пропорциональна расходу газа-восстановителя и при определенной ширине реакционной зоны именно она определяет производительность шахтного агрегата.

Ключевые слова: окатыш, восстановление, скорость реакционной зоны, ширина реакционной зоны, производительность шахтного агрегата.

Введение. Современная черная металлургия основывается на двухстадийном способе получения железа из руды, развитию которого уделяют большое внимание. В то же время дороговизна кокса и развитие процессов обогащения руд благоприятствуют поиску эффективных способов непосредственного получения металла из железорудного сырья. Существует несколько направлений использования конечного продукта внедоменного восстановления. Одно из них – производство металлизированного сырья для переплавки в сталь. Это направление определяется несколькими факторами. Один из них – значительное повышение требований к качеству стали. Опыт убедительно показывает, что сталь, выплавленная с использованием металлизированного материала, вместо металлолома, имеет лучшие свойства. Основная причина улучшения качества стали – металлизированные материалы, в отличие от металлолома, практически не имеют вредных примесей. Для плавки в сталеплавильных печах металлизированное сырье должно иметь степень металлизации более 80%. Это достигается путем газового восстановления железорудного сырья в ретортах либо шахтных печах.

При проектировании промышленных реакторов необходимо соблюдать следующие требования [1]: максимальная производительность единицы реакционного объема; обеспечение максимальной избирательности процесса; минимальные энергетические затраты; управляемость и обеспечение устойчивого режима; дешевизна аппарата, простота и безопасность обслуживания. Достичь оптимума по всем параметрам невозможно, тем не менее, анализ этих требований позволяет поставить задачи для решения конкретных целей.

Постановка задачи. Обоснование выбора рационального режима металлизации и установление вида связи со скоростью движения реакционной зоны, ее шириной требуют проведения кинетических исследований. Полученные данные являются основой для создания устойчивого режима работы шахтного агрегата.

Основная часть

Результаты проведенных ранее исследований [2] показывают, что весь слой можно представить в виде нескольких зон последовательно проходящих его от места их формирования до выхода из реакционного пространства. При этом наблюдаются две-три зоны, в которых процесс восстановления не происходит (зона восстановленного железа, вюстит и невосстановленного гематита) и зоны активного восстановления, в которых процессы идут практически стационарно, о чем свидетельствует постоянство их ширины. Постоянство состава газа, поступающего в эти зоны, и постоянство температуры стабилизируют скорость продвижения зоны вдоль слоя. Это позволяет использовать результаты исследования неподвижного слоя для анализа работы и расчета характеристик противоточных реакторов.

Принято, что реактор должен быть управляем, а режим его работы – устойчив. Расчет производительности таких агрегатов следует вести по скорости продвижения наиболее медленной из реакционных зон. В случае восстановления железа из оксидов самой медленной зоной реагирования является зона вюстит-железо. Исходя из этого, для обеспечения устойчивого режима работы шахтного агрегата скорость выгрузки готового продукта должна соответствовать скорости передвижения по высоте слоя зоны реагирования вюстит-железо.

При газовом восстановлении линейного слоя окатышей в потоколимитируемом режиме, восстановление окатыша происходит за конечное время, т.е. соотношение между скоростью потока и скоростью восстановления одиночного окатыша таково, что газ достигает равновесия на высоте слоя большей одного окатыша. Метод линейного слоя описан в работе [3]. Схема такого процесса изображена на рис. 1. Газ, подходящий к сечению h_1 имеет максимальный восстановительный потенциал для начинающейся реакционной зоны. В сечении h_2 , газ имеет нулевой восстановительный потенциал при выходе из реакционной зоны. Через некоторое время “ τ ” точка h_1 займет место точки h_2 , а она в свою очередь переместится выше. Следовательно, за время “ τ ” реакционная зона переместится на величину $h_2 - h_1 = S$. Таким образом, за время “ τ ” восстановятся “ n ” окатышей, расположенных между сечениями h_2 и h_1 , которые содержат “ m ” молей кислорода, для восстановления которых в соответствии со стехиометрией требуется “ $2m$ ” молей водорода.

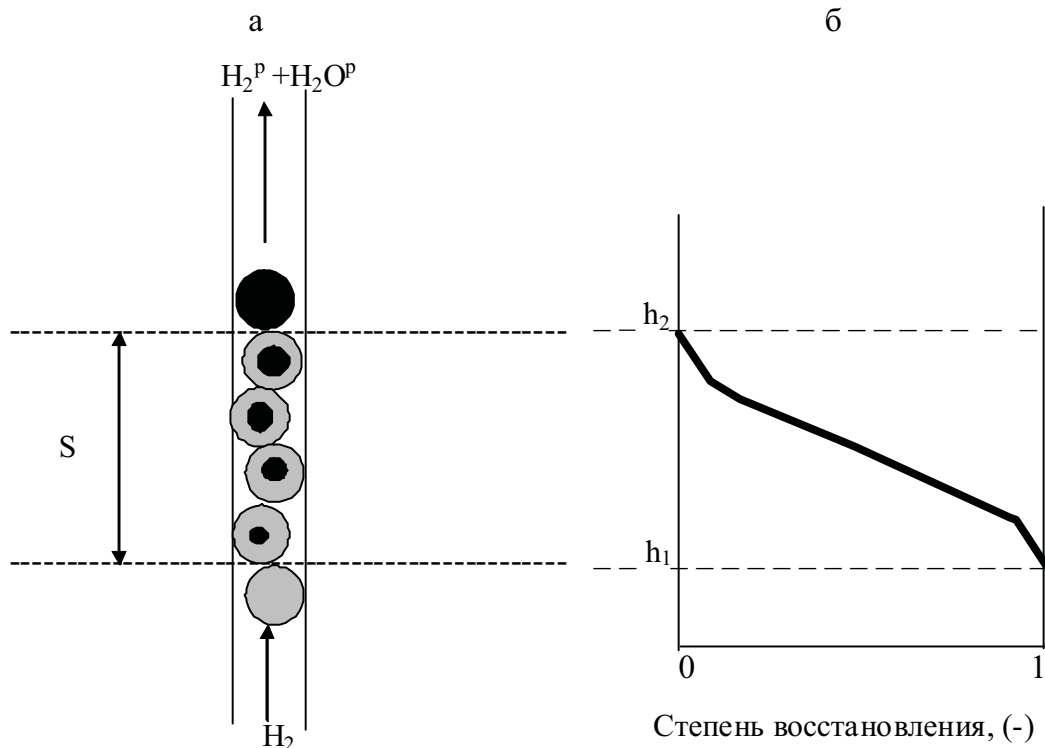


Рис.1 Схема развития процесса восстановления в зоне реагирования $\text{FeO}_{1,05} - \text{Fe}$ (а) и изменение степени восстановления материала по высоте слоя (б).



Учитывая, что не весь водород потока идет на восстановление, а лишь тот, который определяется равновесием конкретной реакции, количество водорода, выраженное в молях, необходимое на восстановление “n” окатышей, равно

$$N = \frac{2 m 100}{\Delta(\%H_2O)_i} = \frac{2 m}{\Delta x_i} \quad (1)$$

где m – количество молей кислорода, содержащихся в “n” окатышах реакционной зоны (моль/ок); Δx_i – разность равновесных концентраций газа или восстановительная способность для изучаемой реакционной зоны, (-).

Расход водорода, выраженный в моль/с, равен Q , отсюда время, необходимое для восстановления “n” окатышей, равно

$$\tau = N/Q \quad (2)$$

Реакционная зона за время τ проходит путь, равный “n” окатышам. Тогда выражение для определения скорости движения реакционной зоны по слою будет:

$$V = \frac{n \Delta x_i Q}{2m} \quad (3)$$

С учетом количества молей кислорода, содержащегося в одном окатыше, окончательное выражение для определения скорости движения реакционной зоны:

$$V = \frac{\Delta x_i Q}{2m_i} \quad (4)$$

где m_i – количество молей кислорода, отнимаемого на данной ступени для одного окатыша.

Равновесные характеристики газа - восстановителя устанавливаются для двух последовательных реакций в соответствии с принципом последовательных превращений А.А. Байкова. Например, для реакционной зоны магнетит – вюстит необходимо использовать равновесные характеристики для следующих превращений: магнетит – вюстит и вюстит – железо, аналогично для других реакционных зон.

Для поддержания устойчивого режима работы скорость движения этой зоны должна быть постоянна, а это, как следует из уравнения (4), определяется, во-первых, постоянством расхода газа-восстановителя и его химического потенциала в условиях постоянной температуры, а во-вторых, постоянством химического состава

железорудных материалов (содержание кислорода). В случае, если скорость выгрузки материала будет выше скорости движения зоны вюстит-железо не достигается полная металлизация, что нежелательно для противоточного агрегата, в котором необходимо достичь максимальную степень металлизации. Если скорость выгрузки материала будет меньше, чем скорость движения зоны вюстит-железо, то зоны реагирования будут сосредоточена в верхней части шахты, и коэффициент использования химического потенциала газа-восстановителя будет уменьшаться.

В работе [4] приводится выражение для определения высоты реакционной зоны в потоколимитируемом режиме для линейного слоя окатышей, которое имеет следующий вид:

$$Z = \frac{\ln \frac{Y_1}{Y_2} \cdot G_M}{\frac{j_D \cdot G_M}{P \cdot Pr^{2/3}} \cdot a \cdot \left(P_0 - \frac{j_D \cdot G_M \cdot P_0}{P \cdot Pr^{2/3}} \right) \cdot \left(1 - Y \right) \cdot \frac{K_D}{RT} + \frac{j_D \cdot G_M}{P \cdot Pr^{2/3}}} \quad (5)$$

где: Z – высота зоны реагирования, окатыш; G_M – мольная скорость газа восстано-вителя, моль/(м² с); Y_1 – исходная доля реагента в потоке (-); Y_2 – доля реагента в конце зоны реагирования (-); Y – равновесная доля реагента (-); P – общее давле-ние, н/м²; P_0 – давление реагента в ядре газового потока, н/м²; $j_D =$; Re – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля.

Высота зоны реагирования зависит от температуры процесса и скорости подвода газа-восстановителя. При проектировании шахтных агрегатов и для создания стабильной и устойчивой работы необходимо, чтобы высота зоны реагирования не превышала размеры реакционного пространства шахты. В противном случае будет мал коэффициент использования химической энергии газа-восстановителя. Если высота зоны реагирования очень мала, будет низким коэффициент использования полезного объема. Проведенные исследования показали, что скорость передвижения зоны реагирования с ростом температуры и расхода газа- восстановителя увеличивается, а высота зоны реагирования с ростом температуры – уменьшается. Увеличение расхода газа-восстановителя приводит к увеличению высоты зоны реагирования. Степень использования газа на ступени вюстит-железо увеличивается с ростом температуры. Это

приводит к тому, что для увеличения производительности агрегата необходимо увеличивать скорость подвода газа-восстановителя до значений близких к критической скорости, а для увеличения степени использования газа необходимо увеличивать температуру. Очевидно, что максимальная производительность противоточного агрегата и высокий коэффициент использования газа будут в том случае, когда при скорости газа, близкой к критической, ширина этой реакционной зоны станет сравнимой с рабочей зоной реактора.

В качестве примера проведем некоторые расчеты. Примем, что диаметр шахтного агрегата равен 2м, высота изотермической зоны (при температуре 1000°C) 0,5м, диаметр окатышей 0,72см, а расход газа восстановителя 6000м³/час (соответствует расходу 100л/час для линейного слоя). При этих условиях высота реакционной зоны равна 12 окатышам, а скорость продвижения по слою 2,23ок/мин. При таком диаметре шахты и при кубической укладке окатышей масса одного слоя окатышей составит 49кг. В таком случае высота зоны реагирования будет равна $12 \cdot 0,72 = 8,64$ см, а производительность $49 \cdot 2,23 \cdot 60 = 6,5$ т/час по исходному материалу или 4,55т/час по металлизированному материалу. Степень использования газа на этой ступени будет близка к равновесной. Высота изотермической зоны 0,5м позволяет, не уменьшая степень использования газа, увеличить расход газа и тем самым увеличить производительность. Критическая скорость газа для данного диаметра окатышей равна 22м/сек [5] и она соответствует объемному расходу газа для линейного слоя 500л/час или 30000м³/час для выбранного нами реактора. В этом случае скорость продвижения реакционной зоны равняется 15 ок/мин, при этом высота зоны составляет 55 окатышей (55 слоев) или 40 см., т.е. не превышает высоту изотермической зоны. Производительность по исходному материалу в этом случае составит 44т/час. Высокие температуры процесса способствуют свариваемости металлизированных окатышей. В данном случае высота изотермической зоны позволяет уменьшить температуру процесса, при этом увеличится высота зоны реагирования и уменьшится производительность. Для 800°C высота зоны составит 52см, скорость передвижения зоны 1,8 ок/мин и производительность по металлизированному материалу 3,7т/час. Для 900°C высота зоны составит 25 см, скорость продвижения зоны 2,06ок/мин, а

производительность 4,2т/час. Это приведет, в данном конкретном случае к тому, что при температуре 800°C может незначительно уменьшится коэффициент использования химической энергии газа-восстановителя.

Следует отметить, что в качестве примера рассмотрен идеализированный вариант. В каждом конкретном случае необходимо учитывать технологические особенности процесса, но общие положения остаются неизменными. Производительность определяется скоростью движения зоны вюстит-железо, скорость выгрузки конечного продукта должна соответствовать скорости движения зоны реагирования (для устойчивой работы агрегата). Высота зоны реагирования на ступени вюстит-железо не должна превышать высоту изотермической или рабочей зоны агрегата. Выбор рационального режима металлизации обеспечивается согласованием температуры, расхода газа-восстановителя, состава исходного сырья, изменения параметров зоны реагирования и граничных значений технологических факторов. Изменение одного из этих факторов приводит к необходимости корректировки других факторов процесса, при которых будет достигнута заданная величина металлизации сырья.

Выводы. При восстановлении слоя железорудных окатышей в условиях потоколимитируемого режима реакционная зона вюстит-железо является лимитирующей для процесса восстановления. Производительность шахтного агрегата определяется скоростью передвижения реакционной зоны вюстит-железо, которая в свою очередь зависит от скорости подвода газа восстановителя. Для создания устойчивого режима работы шахтного агрегата необходимо, чтобы скорость продвижения реакционной зоны вюстит-железо равнялась скорости выгрузки готового материала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иоффе И.И. Инженерная химия гетерогенного катализа /И.И. Иоффе, Л.М. Писмен. – Л.: Химия, 1972, 462с.
2. Колбин Н.А. Формирование реакционных зон при восстановлении слоя железорудных окатышей водородом / Камкина Л.В., Костелов О.Л., Ежи Сивка, Стомба Я.В. // XV Международная научная конференция «Новые технологии и оборудование в металлургии и инженерном материаловедении» - Политехника Ченстоховская – Польша – Ченстохов – 2007. С. 74-79.

3. Костелов О.Л. Скорость восстановления окатышей в линейном слое / О.Л. Костелов, Н.А. Колбин // Физико-химические исследования процессов восстановления окисных систем: сб. науч. трудов. – М.: Metallurgia, 1983. - № 149. – С. 36-40.
4. Колбин Н. Влияние температуры на формирование и параметры реакционных зон в слое / Н. Колбин, О. Костелов, Р. Анкудинов [и др.] // Nove technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej: сб. научн. тр. -Chstochowa : Politechnikiej, 2008. – р. 209-213.- ISBN 978-83-7193-372-1.
5. Богданди Л.Ф. Восстановление железных руд /Л.Ф. Богданди, Г.Ю. Энгель; пер. с нем. Е.Ф.Вегман, Ю.С. Юсфин. – М.: Metallurgia, 1971. – 519 с.