

В.П. ЛЯЛЮК, д-р техн. наук, проф., А.Д. ДОНСКОВ,
Д.Е. ДОНСКОВ инженер, ПАТ “АрселорМиттал Кривой Рог”

ОПТИМАЛЬНАЯ СТЕПЕНЬ ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

Все доменные печи при нормальном нагреве работают с “оптимальным” для сложившихся условий плавки соотношением прямого и косвенного восстановления оксидов железа.

Одним из вопросов теории доменной плавки требующих уточнения представлений на существенном уровне является определение оптимального соотношения прямого и косвенного восстановления оксидов железа (оптимального значения r_d) обеспечивающего, как это многократно отмечено, минимальный расход кокса [1-6 и др.]. Данный вопрос рассматривается ниже с использованием известной диаграммы М.М. Лейбовича и А.Н. Рама одновременно с необходимым [7] ее уточнением. Исследуемые закономерности детально иллюстрируются рис. 1, где приведена уточненная диаграмма А.Н. Рамма и М.М. Лейбовича.

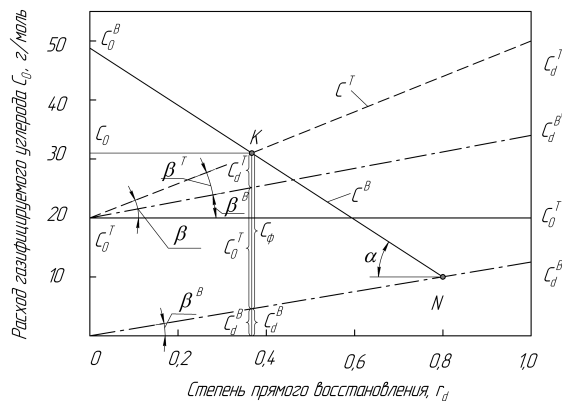


Рис. 1. Взаимосвязи r_d и C_0 условиями плавки

Процесс анализируется в связи с изменениями только расхода газифицируемого углерода и степени прямого восстановления закиси железа в пределах: от 100 % восстановления FeO газом CO, образовавшимся в результате горения углерода кокса в кислороде дутья у фурм ($r_d=0$); до 100 % восстановления FeO твердым углеродом; при условии участия образовавшегося при этом CO в процессе восстановления FeO ($r_d = r_d^{\max}$).

В соответствии с этим реакции косвенного и прямого восстановления монооксида железа целесообразно представить в виде



Схема (1) является суммой реакций горения углерода у фурм до CO и последующего восстановления монооксида железа полученным таким образом оксидом углерода и отображает одно из граничных состояний исследуемого процесса. Схема (2) получена в результате суммирования реакции восстановления закиси железа твердым углеродом и газом CO, образовавшимся при этом, и отображает другое граничное состояние процесса восстановления железа.

Коэффициент m в обоих случаях характеризует потребность реакции непрямого восстановления монооксида железа в избыточном оксиде углерода и представляет собой величину, обратную степени использования CO в реакции непрямого восстановления FeO. Значение коэффициента может быть определено, исходя как из равновесных, найденных по диаграмме состояния системы Fe-FeO-CO-CO₂-C, так и из действительных условий. В первом случае он будет характеризовать предельный минимальный, а во втором - требуемый действительный избыток монооксида углерода, с учетом кинетики реакции восстановления FeO и условий плавки.

Показано [8 и др.], что в благоприятной для косвенного восстановления точке диаграммы состояния Fe-FeO-CO-CO₂-C ($t = 685$ °C, $P = 98$ кПа) степень использования CO составляет около 42 %, что соответствует минимальному значению m около 2,4. Для работающей печи эта величина больше, зависит от условий лавки и, как показано ранее [9,10], может быть рассчитана с использованием данных анализа колошниковога газа и состава шихты. В простейшем случае, при использовании в качестве восстановителя только углерода кокса и изменения соотношения реакций (1) и (2), расход углерода в восстановительном процессе, для всех перечисленных значений m , изменяется от максимума, при восстановлении всего железа по схеме (1)

$$C_0^B = 12m, \text{ г/моль} \quad (3)$$

до минимума, когда все железо из FeO восстанавливается по схеме (2)

$$C_{\min}^B = 12m/(m+1), \text{ г/моль} . \quad (4)$$

С учетом теории теплообмена Б.И. Китаева, в первом случае (при $r_d = 0$) вся доменная печь должна работать по схеме верхней ступени теплообмена; во втором, в предельном случае (при $r_d = 1,0$) – соответственно, по схеме нижней ступени теплообмена.

Следует подчеркнуть, что в том и другом случае процесс отличается от доменного или, точнее, не является доменным, поскольку одним из характерных отличий доменного процесса является наличие двух автономных ступеней теплообмена, разделенных холостой высотой.

В зависимости от величины m не только меняются значения C_0^B и C_{\min}^B ; при увеличении m возрастает угол α наклона прямых C^B и растет r_d^{\max} , т.е. значение r_d , когда все железо восстанавливается по схеме (2). При увеличении r_d^{\max} до 1,0 C_{\min}^B возрастает до 12, а C_0^B – до бесконечности. Таким образом, прямая C_d^B ($0 - N$) на рис. 1 правее точки N отображает изменения с одной стороны r_d^{\max} вдоль горизонтальной оси, а с другой – изменения C_{\min}^B вдоль вертикальной оси.

При этом

$$r_d^{\max} = m/(m+1) . \quad (5)$$

В общем случае прямая C_d^B отображает расход твердого углерода как химического реагента в реакции прямого восстановления, поэтому можно записать

$$C_d^B = 12r_d \quad (6)$$

Уравнение прямых C^B выразим как

$$C^B = C_0^B - r_d \cdot \text{tg}\alpha, \text{ г/моль}, \quad (7)$$

где

$$\text{tg}\alpha = (C_0^B - C_{\min}^B)/r_d^{\max} . \quad (8)$$

После подстановки значений и сокращений получаем

$$\text{tg}\alpha = 12m = C_0^B . \quad (9)$$

откуда

$$C^B = C_0^B(1 - r_d), \text{ г/моль}. \quad (10)$$

Важным моментом в рассматриваемых отношениях является необходимость различать совместный расход углерода и СО на восстановление FeO (C^B) и расход углерода твердого на восстановление в условиях доменной плавки C_d^B , где

$$C_d^B = C^B - C_{\phi} . \quad (11)$$

Поскольку для всех значений m при $r_d = 1,0$ $C^B = 0$, а при $r_d = 0$ $C^B = C_0^B$, угловой коэффициент уравнения, или иначе, угол наклона прямых C^B задается значением C_0^B . В поле рисунка каждая из прямых C^B распространяется от C_0^B до пересечения с прямой C_d^B . Минимальная предельная потребность в углероде-восстановителе при восстановлении всего железа по реакции (2) и предельно низком значении m (2,4), на рисунке не показана. Прямая отображающая эту зависимость в поле рисунка располагается ниже прямой $C_0^B - N$. В приведенных обстоятельствах (для $m = 4$) при движении от точки N влево расход углерода в восстановительном процессе возрастает из-за увеличения доли реакции (1); правее точки N возрастает минимальный расход углерода на восстановление из-за увеличения m , иначе, в связи со снижением степени использования оксида углерода в реакции (2). При снижении степени использования СО до нуля r_d^{\max} возрастает до 1,0, а значения m и C_0^B увеличиваются до бесконечности. В связи с изложенным, в поле рисунка предельный минимум по расходу углерода в восстановительных процессах ограничивается ломаной линией $C_0^B - N - C_d^B$.

Расход углерода, как горючего, на погашение теплового эффекта эндотермической реакции (2) изменяется от нуля, при восстановлении всего железа по реакции (1), до максимума, при восстановлении по реакции (2). Максимум зависит от степени использования СО, образующейся в реакции прямого восстановления, т.е. от величины m , г/моль

$$C_{\max}^T = q_{\text{Fe}} \cdot m / q_C \cdot (m+1), \quad (12)$$

где q_{Fe} и q_c - тепловые эффекты реакций восстановления закиси железа углеродом и горения углерода до CO, соответственно, Дж/моль.

Потребность в углероде всех прочих каналов его расходования как источника тепла, включая нагрев и плавление чугуна и шлака, разложение известняка, теплопотери, восстановление кремния, марганца, фосфора и прочих компонентов при этом, не меняется и может характеризоваться величиной C_0^T , которая рассчитывается на основе теплового баланса высокотемпературной зоны, составленного для условий, когда $r_d = 0$.

Уравнение прямой C^B на рисунке получаем по аналогии с равенством (7), г/моль

$$C^T = C_0^T + r_d \cdot \operatorname{tg}\beta. \quad (13)$$

Угол β наклона прямой C^T следует рассматривать как сумму углов наклона прямой C_d^B над горизонтом $-\beta^B$ и прямой C_d^T над прямой $C_d^B - \beta^T$.

Тогда

$$\operatorname{tg}\beta = (C^T - C_0^T) / r_d. \quad (14)$$

При $r_d = 1,0$ $\operatorname{tg}\beta^B$ может быть найден по уравнению (6). Как видно он равен 12 г/моль. Тангенс β^T находим как отношение тепловых эффектов реакций прямого восстановления железа и горения углерода до CO у фурм

$$\operatorname{tg}\beta^T = q_{Fe} / q_c \quad (15)$$

Полагая q_{Fe} равным 152190 Дж/моль, а $q_c - 9797$ Дж/моль, находим приближенное значение $\operatorname{tg}\beta^T$; оно составляет 15,534 г/моль или 0,277 г/г железа.

С учетом приведенных данных, уравнение (13) принимает вид

$$C^T = C_0^T + r_d \cdot C_d^\Sigma, \quad (16)$$

при $C_d^\Sigma = \operatorname{tg}\beta = \operatorname{tg}\beta^B + \operatorname{tg}\beta^T = 12 + 15,534 = 27,534$ г/моль.

Здесь для наглядности прямая C_d^B (распространяющаяся вдоль вертикальной оси от 0 до 12 г/моль) перенесена выше в положение $C_d^{B'}$ ($C_0^T - 32$ г/моль).

При определении значений C_0^T и C_0^B (или m), исходя из действительных условий плавки, пересечение прямых C^T и C^B дает точку K , проектируя которую на вертикальную ось, получаем действительный расход газифицируемого углерода C_0 , а на горизонтальную – действительное значение степени прямого восстановления Fe из FeO. При этом C_0^T и C_0^B выступают в роли показателей, характеризующих потребности в углероде процессов теплопотребления и восстановления, соответственно, т.е. условия плавки. Причем, при изменениях C_0^B значения C_0 и r_d изменяются вдоль прямой C^T , а при изменениях C_0^T , соответственно, вдоль прямой C^B . Действительные потребности в углероде процессов теплопотребления и восстановления в точке пересечения прямых C^T и C^B (точке K) равны друг другу. Здесь

$$C_0 = C^B = C^T. \quad (17)$$

По признаку использования в высокотемпературной нижней зоне приведенная схема подразделяет газифицируемый углерод, с одной стороны, как обычно, на углерод, сгорающий у фурм C_ϕ и углерод, окисляющийся в реакции прямого восстановления C_d^B , с другой стороны, на углерод, расходуемый как источник тепла на погашение отрицательного теплового эффекта реакции прямого восстановления C_d^T , всех прочих статей теплового баланса плавки C_0^T и расходуемый в реакции прямого восстановления FeO в качестве химического реагента C_d^B .

$$C_0 = C_\phi + C_d^B = C_d^T + C_0^T + C_d^B = C_0^B (1 - r_d) = C_0^T + r_d \cdot C_d^\Sigma. \quad (18)$$

В соответствии с диаграммой и равенством (18) “идеальный ход” по Л. Грюнеру соответствует равенству

$$C_0 = C_\phi = C_0^T = C_0^B. \quad (19)$$

Иными словами в данном случае для плавки в целом в полной мере и без избытка достаточно количеств выделяющегося тепла (C_0^T) и образующегося восстановительного газа C_0^B при горении C_ϕ в кислороде дутья.

Как представляется такое сочетание расходования углерода в процессах химических (в виде молекул) и физических (в виде калорий) заслуживает определения хода процесса как “идеального”. Вместе с тем следует иметь ввиду также и то, что такое состояние плавки, как это хорошо видно на рисунке, может быть достигнуто от исходного (точка K) двумя способами: снижением C_0^B , т.е. сокращением потребностей в углероде процессов восстановления из-за чего уменьшается r_d обуславливая сокращение C_0 и расход кокса; повышением C_0^T , что увеличит C_0 и расход кокса из-за чего снизится r_d .

В точке K , как уже отмечено, расходы углерода в процессах химических (восстановительных) и физических (нагрева) равны между собой. Хотя в условиях доменной плавки через колошник всегда уходят значительные количества недоиспользованных и восстановительной и тепловой энергии, но, при соблюдении нормального нагрева печи, по всей очевидности, данное сочетание расходов энергии по указанным каналам следует полагать оптимальным. Следовательно, степень прямого восстановления для этих условий также является оптимальной. При отклонениях r_d от оптимума нарушается нормальный нагрев, что вынуждает корректировать расход кокса и приводить степень прямого восстановления в норму.

При улучшении условий плавки, обеспечивающих сокращение потребностей в углероде процессов восстановления, на диаграмме точка C_0^B смещается вниз. Прямая C^B также располагается ниже, обращаясь вокруг точки $r_d = 1,0$ как вокруг центра вращения. Точка K перемещается в поле рисунка влево и вниз вдоль прямой C^T обеспечивая снижение значений r_d и C_0 вплоть до предела, определяемого равенством (19). Вести речь о каком-то промежуточном оптимуме в данном случае оснований нет, поскольку оптимум соответствует изменению знака функции при каком-то значении аргумента в условиях его изменения. При этом связь, по крайней мере, не должна быть линейной. Следует отметить, что значения C_0^B , r_d и C_0 в данном случае изменяются в одном и том же направлении. Вначале снижается C_0^B , затем r_d , вызывая повышение нагрева печи, что и определяет, с одной стороны, возможность, а с другой – необходимость сокращения расхода кокса. При сокращении по условиям плавки потребностей в углероде химических процессов расход углерода в процессах физических сокращается за счет изменения (снижения) r_d . Таким образом, в данном случае снижение r_d может расцениваться как причина снижения расхода углерода в процессах нагрева, в частности, и вообще на плавку в целом.

При улучшении других условий плавки, обеспечивающих сокращение потребностей в углероде процессов нагрева (снижение выхода шлака, теплотеря и др.) точка C_0^T на диаграмме смещается вниз. Соответственно располагается ниже, оставаясь параллельной самой себе прямая C^T . Точка K перемещается вправо вниз вдоль прямой C^B обуславливая снижение C_0 и повышение r_d . В данном случае C_0 и r_d изменяются в противоположных направлениях. При этом первопричиной, так же как и в предыдущем случае, является улучшение условий плавки. Здесь они воздействуют непосредственно на нагрев печи и, соответственно, на расход кокса, который сокращается. Из-за этого уменьшается выход горнового восстановительного газа на единицу обрабатываемого материала, сокращается количество кислорода отнимаемого от оксидов железа в шахте и, следовательно, возрастает степень прямого восстановления оксидов железа.

Все вместе обеспечивает сокращение расхода суммы твердого углерода и СО в целом на процесс восстановления. В самой доменной плавке, как показано ранее, при сокращении расходования СО возрастает расход углерода на прямое восстановление. Одновременно сокращается доля загруженного в печь кокса, доходящая до фурм требуя увеличения расхода кокса. Таким образом, здесь часть углерода - источника тепла, сэкономленная в связи с улучшением условий плавки, затрачивается на усиление прямого восстановления. Поэтому снижение расхода кокса всегда меньше сокращения потребностей в углероде (коксе) процессов нагрева. Сокращение расхода на восстановление газообразного восстановителя, которое по величине больше увеличения расхода твердого углерода на расход кокса, таким образом, влияния не оказывает. Иными словами и здесь повышение r_d увеличивает расход кокса, который скрыт одновременным

сокращением расхода газообразного восстановителя, на образование которого в доменной плавке кокс специально не расходуется.

Таким образом, и при снижении потребности в углероде процессов нагрева расход кокса в зависимости от r_d изменяется не по кривой с каким-то оптимальным значением аргумента (max или min), а по прямой C^B в пределах от $r_d = 0$ до $r_d = 1,0$. При любом постоянном значении C_0^T (теплопотребности плавки) оптимальное значение C^B соответствует точке К. Любое отклонение от него, так же как и в ранее рассмотренном случае, нарушает нормальный нагрев печи и при его устранении возвращает величину показателя до оптимального значения. При этом от любого “оптимального” значения r_d расход кокса может быть уменьшен путем снижения C_0^B , при одновременном снижении r_d ниже исходного “оптимума”, или путем снижения C_0^T при одновременном повышении r_d выше исходного “оптимума”.

Произведенный анализ позволяет отметить важную роль степени прямого восстановления железа, как своеобразного и универсального синхронизатора изменений расхода углерода в процессах химических (в виде молекул) и физических (в виде калорий и джоулей). При любых изменениях потребности плавки в тепле (в джоулях) с помощью r_d соответствующим образом изменяется расход углерода в процессах восстановления (в молекулах) и наоборот, о чем уже было опубликовано ранее [10]. Уместно отметить также и то, что анализируя рассматриваемую проблему, всегда следует иметь в виду, что степень прямого восстановления оксидов железа в доменной плавке определяется потребностью в углероде, процессов восстановления и расходом кокса, а расход кокса – потребностью в углероде процессов нагрева и степенью прямого восстановления. При этом, при снижении расхода кокса степень прямого восстановления всегда возрастает, а при снижении степени прямого восстановления расход кокса всегда снижается; при сокращении потребности плавки в восстановителе это осуществляется в явном виде, а при сокращении потребности плавки в тепле – в скрытом виде.

Вывод. Все доменные печи при нормальном нагреве работают с “оптимальным” для сложившихся условий плавки соотношением прямого и косвенного восстановления оксидов железа.

Список литературы

1. Павлов М.А. Metallurgia чугуна. т. II. Доменный процесс. Изд. 6. – М.: Metallurgizdat, 1949. – 628 с.
2. Любан А.П. Анализ явлений доменного процесса. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 532 с.
3. Готлиб А.Д. Доменный процесс. – М.: Metallurgia, 1958. – 510 с.
4. Ефименко Т.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. Metallurgia чугуна. Киев: “Вища школа”, 1981. – 495 с.
5. Тихомиров Е.Н. К вопросу о развитии косвенного и прямого восстановления в доменной плавке и ее преимуществах перед альтернативными процессами // Сталь. – 1995. – № 11. – С. 8-13.
6. Федулов Ю.В. К вопросу прямого восстановления железа в доменной печи // Сталь. – 1996. – №1. – С. 16-18.
7. Шур А.Б. Проблемы теории доменного процесса в свете дискуссии о принципе Грюнера. Труды V Международного конгресса доменщиков. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – С. 261-265.
8. Вегман Е.Ф., Пареньков А.Е., Чургель В.О. Влияние степени прямого восстановления железа на удельный расход кокса в доменных печах // Сталь. – 1983. – №3. – С. 8-10.
9. Донсков Д.Е. Уточнение методики анализа явлений доменной плавки на основе раздельного учета потребностей в углероде процессов восстановления и теплопотребления. Труды V Международного конгресса доменщиков. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – С. 204-208.
10. Донсков Е.Г. Анализ перспектив снижения расхода кокса в доменном процессе // Известия вузов. Черная металлургия. – 1990. – №4. – С. 10-13.

Рукопись поступила в редакцию 26.03.13

УДК 669.18

В.В. ПЛОТНИКОВ, канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «Криворізький національний університет»

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ УСЕРЕДНЕННЯ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ПІДГОТОВЦІ ДО АГЛОМЕРАЦІЇ

Розглянуті основні причини коливань складу агломерату вітчизняних аглофабрик та резерви підвищення ефективності усереднення сировини для аглодоменного виробництва

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. В даний час життєздатність економіки країни значною мірою залежить від конкурентноздатності продукції металур-