

го топлива с 52,1 до 51,4-50,9 кг/т агломерата, более полному сгоранию углерода в слоях и улучшению прочностных характеристик агломерата.

В следующих сериях опытов, в дополнение к оптимизации количества высоко- и низкорекреакционного топлива в верхнем и нижнем слоях аглошихты, оптимизирована также крупность этого топлива в этих же слоях. Результаты испытаний показали (см. табл. 2), что при оптимизации количества и крупности высоко- и низкорекреакционного топлива в слоях аглошихты все технологические показатели спекания и металлургические характеристики агломерата существенно улучшаются. Так удельная производительность аглошаши возросла с 1,08 до 1,35-1,45 т/м²·ч, удельный расход углерода твердого топлива снизился с 52,3 до 50,7-50,9 кг/т агломерата. Практически полностью выгорает углерод твердого топлива, снижается содержание оксида железа в агломерате с 11,7 до 10,9-11,0 % и повышаются его прочностные характеристики.

Таким образом, проведенными испытаниями показано, что оптимизация количества, крупности и реакционной способности твердого топлива в верхнем и нижнем слоях аглошихты при ее спекании на агломашине способствует повышению удельной производительности агломашин, снижению удельного расхода твердого топлива, практически полному выгоранию его в слое, повышению прочности агломерата и снижению содержания в нем мелочи, а также снижению содержания оксида железа, что способствует повышению восстановимости агломерата.

Список литературы

1. Сигов В.А., Шурхал В.А. Агломерационный процесс. – Киев: Техника, 1969. – 232 с.
2. Структура и физические свойства агломерата из руд КМА, полученного на агломашине с площадью спекания 252 м² при двухслойной загрузке шихты / Г.В. Коршиков, С.И. Шаров, Е.В. Невмержицкий и др. // Сталь. – 1971. – №1. – С. 3-8.
3. Снижение расхода твердого топлива на процесс спекания путем рационального перераспределения его по высоте загружаемого слоя / Ю.С. Кравец, В.Е. Шешегов, В.П. Маймур, В.Д. Кучук // Сталь. – 1984. – №7. – С. 7-9.
4. Изучение распределения гранул окомкованной агломерационной шихты при загрузке на спекательные тележки / А.А. Вовк, П.М. Челгий, В.Е. Шешегов и др. // Металлургия и коксохимия. – Вып. 75. – 1982. – С. 8-11.
5. Новая технология загрузки шихты на агломашину / Ю.С. Кравец, В.Е. Шешегов, П.М. Челгий и др. // Металлург. – 1982. – №9. – С. 15-17.
6. Оптимизация режима сжигания газообразного и твердого топлива при агломерации / В.В. Дябин, А.Г. Михалевич, Б.Н. Серебренников и др. // Сталь. – 1984. – №7. – С. 8-11.
7. Карабасов Ю.С., Валавин В.С. Использование топлива в агломерации. – М.: Металлургия, 1976. – 263 с.
8. Ефимов С.П., Ефименко Г.Г. Влияние крупности топлива на процесс агломерации и качество агломерата // Известия вузов Черная металлургия. – 1970. – №9. – С. 21-24.
9. О механизме влияния крупности коксовой мелочи на агломерационный процесс / Ю.С. Карабасов, А.Н. Похвиснев, Е.Ф. Шкурко и др. // Известия вузов Черная металлургия. – 1975. – №11. – С. 22-26.
10. Об эффективной реакционной способности агломерационного топлива и оптимальной высоте спекаемого слоя / Ю.С. Карабасов, В.С. Валавин, В.Л. Севрюгин и др. // Известия вузов Черная металлургия. – 1975. – №3. – С. 36-40.
11. Хлапонин Н.С., Кривошеев В.Н., Андронов В.В. О двухслойном спекании аглошихты // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1967. – №4. – С. 8-10.
12. Анализ газодинамической работы агломерационных машин АКМ-312 Новолипецкого металлургического комбината / Ю.А. Фролов, Б.С. Расин, С.Л. Зевин и др. // Сталь. – 1993. – №2. – С. 5-10.
13. Ефименко Г.М., Дябин В.В., Колокольцов Б.И. Подача топлива в агломерационную шихту на аглофабрике ЗСМК по двухслойной схеме // Сталь. – 1974. – №10. – С. 876-878.
14. Михалевич А.Г., Кузнецов А.И., Тихомиров В.Е. Степень использования топлива при различных режимах спекания // Известия вузов Черная металлургия. – 1979. – №9. – С. 149-151.

Рукопись поступила в редакцию 26.03.13

УДК 669.162.16

Е.Г. ДОНСКОВ, В.П. ЛЯЛЮК, доктора техн. наук, проф.

КМИ ГВУЗ “Криворожский национальный университет”

Д.Е. ДОНСКОВ инженер, ПАТ “АрселорМиттал Кривой Рог”

О ПРИНЦИПЕ ГРЮНЕРА С ПОЗИЦИИ ДОМЕННОГО ПРАКТИКА

В доменной плавке расход кокса регулируется в зависимости от нагрева печи и сокращается лишь при его повышении, в частности, от сокращения расхода тепла на погашение отрицательного теплового эффекта реакции пря-

мого восстановления железа. Исходя из этого, принцип Грюнера, который заключается в восстановлении всего железа в доменной плавке непрямым путем, является абсолютно верным.

Как известно [1 и др.], одна из основных задач доменной плавки, отнятие кислорода от оксидов железа, осуществляется последовательно от высших оксидов к низшим, вплоть до металла $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow FeO \rightarrow Fe$. При нормальных условиях стадии восстановления $Fe_2O_3 \rightarrow FeO$ осуществляются в зоне умеренных температур газообразными восстановителями CO и H_2 образующимися при горении топлива в кислороде дутья у фурм, а FeO до Fe восстанавливается в высокотемпературной зоне, частично также газами, другой частью твердым углеродом.

Наличие двух вариантов восстановления FeO до Fe закономерно порождает вопрос о том, какой из них более целесообразен. Впервые данный вопрос был поставлен в 1872 году Л. Грюнером, который высказал соображения позже названные “принципом Грюнера”: “... необходимо, чтобы восстановление железной руды в доменных печах совершалось, насколько это возможно, ..., окисью углерода, переходящей в CO_2 , другими словами, без потребления твердого углерода, что я буду называть “идеальным ходом” доменных печей. Там где этот способ будет иметь место, реакции будут самые простые. Оксид углерода, образовавшийся у фурм, восстанавливает руду, превратясь в CO_2 , которая улетит из печи, не реагируя на твердый углерод в этом случае весь углерод засыпанный на колошник достигнув горизонта фурм будет превращен действием на него воздуха в CO” [2, с. 100].

Эти соображения были положительно восприняты специалистами и на протяжении достаточно продолжительного промежутка времени расценивались как общепризнанные. Первые сомнения в неизбежности таких представлений были опубликованы в 1894 году русским инженером, впоследствии академиком, М.А. Павловым. На основе анализа опытного материала он определил положения Грюнера как ошибочные, поскольку минимальный расход кокса в доменной плавке достигается при некотором развитии прямого восстановления [1, с. 106]. Указанная работа [3] М.А. Павлова породила в мировой печати дискуссию, которую нельзя считать исчерпанной и в настоящее время.

История дискуссии в период от Л. Грюнера до 60-х годов прошлого века подробно освещена Н.И. Красавцевым [4]. В последующие годы борьба мнений была сосредоточена, главным образом, на страницах журнала “Сталь”, где с перерывом в 30 лет проведено два этапа дискуссии: первый из них начат статьей [5] профессора А.Н. Рамма, опубликованной в 1965 году, а второй, соответственно, статьей [6] В.П. Лозового и Л.Д. Шаркевича, опубликованной в 1995 г.

Здесь необходимо отметить, что если итоги дискуссии, проведенной в шестидесятые годы, были подведены А.Н. Раммом на страницах журнала “Сталь” и в его монографии [2], то обобщения взглядов по второму витку дискуссии, начатой работой [6], до сих пор не произведено.

Анализ взаимосвязей степени прямого восстановления железа и расхода кокса в отечественной литературе чаще всего производится с использованием известной диаграммы М.М. Лейбовича и А.Н. Рамма, которая, как многократно отмечено, отображает взгляды академика М.А. Павлова [1, с. 110 и др.]. Следует добавить, что данная диаграмма вначале была применена обоими авторами для доказательства ошибочности принципа Грюнера. Позднее, в ряде случаев анализ проблемы с ее использованием заканчивался противоположным заключением, которое обосновывается и ниже.

По мнению А.Н. Чернытина, опубликованному несколько позже, в развитии теории М.А. Павлова с помощью указанной графической интерпретации допущены ошибки, затруднившие понимание этой теории [7]. Он отмечает “... вопреки известному факту о том, что снижение расхода кокса уменьшает как нагревательную, так и восстановительную способность горнового газа, было создано предствление о возможности снижения расхода углерода-теплоносителя с повышением расхода углерода-восстановителя, то есть о возможности изменения показателей в отрыве друг от друга”.

В порядке предварительной реплики здесь уместно отметить некоторую неточность изложения вопроса А.Н. Чернытиным, в связи с чем непонятно, что он имел ввиду. Упомянутая графическая интерпретация наглядно иллюстрирует очевидный и хорошо известный факт, состоящий в том, что при любом изменении степени прямого восстановления, то есть соотношения реакций прямого и косвенного восстановления, например FeO до Fe, расход углерода в процессах нагрева и восстановления изменяется в противоположных направлениях. Реакция прямого восстановления, по сравнению с реакцией косвенного восстановления, более экономна

в расходовании восстановителя, но более затратна в части расходования тепла. Поэтому при ее усилении расход углерода-теплоносителя, возрастает, а расход углерода-восстановителя сокращается. При усилении реакций косвенного восстановления процесс изменяется в противоположном направлении. Детально это будет показано специально и поэтому в настоящей работе не рассматривается.

В работах школы А.Н. Похвиснева указывается, что "...в любых условиях плавки существует устанавливаемая балансом связь между тремя показателями работы печи: расходом горючего, использованием восстановительной способности газов и степенью прямого восстановления. Построение диаграмм, функционально связывающих только две из трех величин, является неправомерным" [8 и др.]. В данном случае также не понятно о чем идет речь, поскольку все три названные показателя на диаграмме отражены.

У А.Б. Шура использование данной диаграммы особых возражений не вызывает, однако, по его мнению, она требует некоторого уточнения [9].

В целом в литературе бывшего СССР преобладает отрицательное отношение к точке зрения, высказанной Грюнером. В ходе дискуссии обе стороны часто отмечают друг у друга недостаточную обоснованность высказываемых положений, неопределенность граничных условий, нечеткость формулировок и т.п. Обращает на себя внимание также и то, что в последние годы наблюдается (появилась) тенденция, в том числе и на немногочисленных конференциях, уходить от обсуждения данной проблемы.

Не углубляясь в сложные теоретические коллизии и в полемику с обозначенными и иными мнениями, а также в терминологический анализ публикаций, попытаемся на основе лишь элементарного анализа производственных факторов уяснить физическую сущность проблемы.

Не требует каких-то особых обоснований отмеченное выше соображение о том, что если есть в доменной плавке различные варианты восстановления FeO до Fe, то правомерен вопрос о том, какой из них лучше. Отсюда сложно назвать рациональной позицию специалистов, в соответствии с которой обходится вниманием или объявляется как несущественный или неверный один из коренных вопросов теории доменной плавки.

Как известно углерод (C_k) топлива (кокса) (k) в доменной плавке расходуется по трем направлениям:

теряется бесполезно, по отношению к процессам восстановления и нагрева, с колошниковым газом ($C_{к.г.}$), через чугунную летку на выпусках продуктов плавки ($C_{ч.л.}$) и растворяясь в чугуне ($C_{ч.}$);

расходуется в качестве химического реагента в процессах прямого восстановления одновременно увеличивая потребность доменной плавки в высокотемпературном тепле (C_d);

сгорает в кислороде дутья у воздушных фурм (C_f) с выделением тепла, необходимое количество которого должно обеспечивать заданный нормальный нагрев печи

$$k \cdot C_k = C_{к.г.} + C_{ч.л.} + C_{ч.} + C_d + C_f. \quad (1)$$

Особо отметим еще раз, что необходимое для хода плавки тепло обеспечивается только сжиганием C_f в кислороде дутья и регулируется путем изменения расхода загружаемого в печь кокса k в зависимости от нагрева печи. Нагрев печи отслеживается по виду и температуре продуктов плавки, содержанию Si в чугуне и другим известным признакам.

Необходимый уровень нагрева Q_n , обеспечиваемый сжиганием C_f , в соответствии с теорией Б.Н. Китаева [10, с. 241] определяется теплотребностью высокотемпературной ступени теплообмена, иначе необходимым количеством высокотемпературного тепла. При этом

$$Q_n = Q_{ч.} + Q_{ш.} + Q_{потерь} + Q_d = C_f \cdot q_c, \quad (2)$$

где $Q_{ч.}$ – теплосодержание чугуна, кДж/кг; $Q_{ш.}$ – теплосодержание шлака, кДж/кг; $Q_{потерь}$ – потери тепла, кДж/кг; Q_d – расход тепла на прямое восстановление, кДж/кг; q_c – тепловой эффект реакции горения у фурм C до CO, кДж/кг.

При постоянной теплотребности плавки необходимое количество углерода сжигаемого у фурм C_f постоянно. Расход кокса в этом случае может быть уменьшен за счет снижения любого из первых четырех слагаемых схемы (1) в том числе за счет сокращения C_d . При снижении C_d большая часть загруженного на колошник углерода кокса доходит до фурм и сгорает в кислороде дутья выделяя тепло. Это один канал снижения k при сокращении r_d и, соответственно, C_d .

Другим путем снижения расхода кокса является снижение Q_n и необходимого уровня (количества) сжигаемого C_ϕ в том числе и за счет сокращения Q_d .

Таким образом, из любого исходного состояния при $r_d > 0$, т.е. и при $r_d = 0,8$ и при $r_d = 0,1$ сокращение прямого восстановления, вплоть до $r_d = 0$, приводит к снижению расхода кокса. В этой части принцип Грюнера справедлив целиком и полностью, поскольку такое сокращение снижает расход кокса всегда.

В соответствии с приведенной схемой (уравнения 1 и 2) имеются два пути снижения расхода загружаемого в доменную печь кокса:

сокращения его количества, расходуемого до прихода на фурму, укажем еще раз, в частности, на прямое восстановление в качестве химического реагента C_d^B . Иными словами здесь сокращение расхода углерода в реакциях прямого восстановления в качестве химического реагента равноценно снижению его выбросов с колошниковым газом и на выпусках и растворением (потерями) в чугуна;

снижение теплотребности нижней ступени теплообмена Q_n , в частности, за счет сокращения Q_d , то есть расхода тепла в реакциях прямого восстановления. В данном случае сокращение прямого восстановления равноценно снижению теплотерь высокотемпературной зоны, снижению выхода шлака и др.

Идеальный ход по Грюнеру $C_d = 0$ и $Q_d = 0$ и все железо восстанавливается газом CO, образующимся только по реакции



в количестве, обеспечивающем потребность плавки в тепле. В данном случае выделившегося здесь тепла хватает в полной мере и без избытка для осуществления плавки

$$Q = Q_n = Q_c + Q_{ш} + Q_{пот}, \quad (4)$$

а образующегося CO достаточно для восстановления всего железа непрямым путем.

В условиях “идеального хода” расход кокса тем не менее может быть уменьшен, например, за счет снижения $Q_{ш}$ или $Q_{пот}$. При этом r_d возрастает, из-за снижения расхода кокса, и для новых изменившихся условий процесс перестает быть идеальным по Грюнеру.

Таким образом, расход кокса при идеальном по Грюнеру ходе может быть самым разным, поскольку “идеальный ход” это не $\kappa = \min = \text{const}$, [1, 113], а $r_d = \text{const} = 0$.

Вывод. Принцип Л. Грюнера абсолютно правилен в любых условиях доменной плавки, которая ограничивается рамками $0 < r_d < 1$.

Список литературы

1. Готлиб А.Д. Доменный процесс. – М.: Металлургия, 1958. – 510 с.
2. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.
3. Павлов М.А. Исследование плавильного процесса доменных печей Климовского завода. Горный журнал. – 1994. – Т. 3. – С. 265.
4. Красавцев Н.И. Развитие представлений о влиянии прямого и косвенного восстановления на удельный расход кокса в доменных печах. – В кн.: “Научные исследования в помощь доменному производству”. – Днепропетровск, 1960. – С. 9-57.
5. Рамм А.Н. О необоснованной критике принципа Грюнера // Сталь. – 1965. – №8. – С. 686-689.
6. Лозовой В.П., Шаркевич Л.Д. Прямое восстановление железа в современном доменном процессе // Сталь. – 1995. – №3. – С. 8-10.
7. Чернятин А.Н. Противоречивость учения о роли косвенного восстановления железа – результат отрыва термодинамики доменного процесса от кинетики // Известия вузов. Черная металлургия. – 1974. – №8. – С. 19-22.
8. Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С. О соотношении между показателями восстановления и расхода кокса в доменной печи // Известия вузов. Черная металлургия. – 1974. – № 1. – С. 23-25.
9. Шур А.Б. Проблемы теории доменного процесса в свете дискуссии о принципе Грюнера. Труды V Международного конгресса доменщиков. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – С. 261-265.
10. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Т., Лазарев Б.Л. Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия, 1960. – 356 с.

Рукопись поступила в редакцию 26.03.13