



With application of physical and mathematical modeling there is carried out complex estimation of efficiency of different kinds of inert-gas flushing of ark steel furnace.

П. В. БИЗЮКОВ, С. Н. БОГДАНОВ, С. В. КАЗАКОВ,
П. В. ЧАЙРЕВ, Московский государственный институт стали и сплавов,
М. П. ГУЛЯЕВ, В. В. ЭНДЕРС, РУП "БМЗ"

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫПЛАВКИ СТАЛИ В ДСП С ПОМОЩЬЮ ДОННОЙ ПРОДУВКИ ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ

УДК 669.187

Интенсификация работы сверхмощных ДСП является актуальной задачей, а в условиях предприятия качественной металлургии, каким является РУП "БМЗ", она, кроме того, не должна приводить к снижению качественных показателей предприятия в целом. Для решения поставленной задачи в сталеплавильных цехах РУП "БМЗ" используется продувка инертным (аргон) и нейтральным (азот) газами.

Цель данной работы — комплексная оценка металлургической эффективности различных вариантов продувки ("скрытая", "прямая", "комбинированная") для выработки рекомендаций по организации технологии продувки, а также описания процессов для изучения возможности управления им за счет донной продувки.

Известно, что продувка расплава инертным газом позволяет ускорить процессы массопереноса в жидкой ванне, что ведет к ускорению процессов плавления, увеличивает скорость обезуглероживания, тепловую эффективность, ускоряет процессы на межфазных границах (десульфурация металла) и т.д. Однако при среднем суммарном расходе инертного газа на плавку $3,3 \text{ м}^3$ ($20 \text{ л} \times 3 \text{ пробки} \times 55 \text{ мин} = 3300 \text{ л} = 3,3 \text{ м}^3$) количество вдуваемого газа намного меньше объема CO , образующегося при обезуглероживании. Например, при выгорании $0,1\%$ [С] в ванне 120 т ДСП количество образующегося оксида углерода составляет 120 м^3 . Так как из опытных данных известно, что эффект продувки на указанные процессы значителен, объяснить влияние донной продувки только за счет дополнительного объема газа нельзя.

Оценка гидродинамического состояния ванны предполагает ответ на следующие вопросы:

- 1) оптимальное количество и место расположения продувочных устройств;
- 2) оптимальный режим продувки, т.е. режим, обеспечивающий максимальную эффективность обработки при минимальном расходе газа;
- 3) влияние режимов продувки на скорость процессов, протекающих в сталеплавильной ванне.

За время работы РУП "БМЗ" были опробованы следующие варианты пневматического перемешивания:

- "скрытая" продувка (продувка через пористые элементы в днище ковша);
- "прямая" продувка (продувка через огнеупорные элементы с направленными каналами);
- "комбинированная" продувка ("прямая" продувка с одновременным тангенциальным подводом газа через боковую фурму).

Так как часть вариантов была реализована до начала выполнения работы, при проведении работы использовали данные базы плавок РУП "БМЗ", полученные в предыдущий период времени. Формат данных определялся паспортами плавок и необходимостью сопоставления данных, полученных при использовании различных вариантов донной продувки. Из шести вариантов режима продувки, предложенных поставщиками технологии, на момент проведения работы применялся преимущественно один — с постоянным расходом газа 20 л/мин на одно продувочное устройство в течение всей плавки. Для решения данной проблемы провели холодное моделирование.

Так как продувку проводили одновременно через три продувочных устройства, что не позволяло использовать фактические данные для оценки эффективности разных схем продувки, гидродинамику ванны изучали на физической модели. Модель ванны электропечи была изготовлена в масштабе 1:25. В установку для моделирования также входят блок продувочных устройств, системы подачи воздуха и

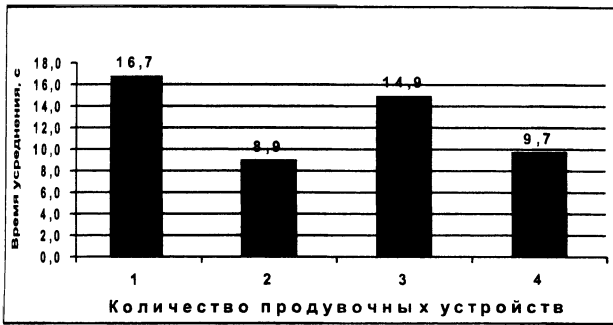


Рис.1. Усредненные результаты холодного моделирования при различном количестве продувочных устройств

газораспределительная установка. Моделирующей жидкостью служила вода, а трассером — краситель, который вводили в фиксированную точку расплава. О достижении времени усреднения судили по выравниванию интенсивности окрашивания расплава в различных частях модели. В процессе эксперимента изменяли количество и расположение продувочных устройств. Расход газа через каждое продувочное устройство в течение экспериментов был постоянен. Результаты опытов приведены на рис. 1. Для повышения точности было выполнено по 10 замеров для каждой схемы подачи газа.

Из рисунка видно, что наиболее предпочтительно использование двух продувочных устройств, расположенных диаметрально противоположно друг другу.

Поскольку гидродинамические условия в реальной ДСП отличаются от модельных (наличием конвективных потоков за счет действия дуг, неравномерностью охлаждения ванны и т.д.), истинную эффективность продувки можно оценить только по данным, полученным на реальном агрегате. Так как естественным индикатором процесса является изменение химического состава расплава, разработали физико-химическую модель, прогнозирующую основной гидродинамический параметр модели k , описывающий влияние режима продувки на поведение ванны. При построении модели исходили из того, что изменение состава металла возможно только в результате протекания массообменных процессов, протекающих на различных межфазных поверхностях. В качестве таких поверхностей могут выступать поверхности раздела металл—атмосфера, металл—футеровка, металл—шлаковая фаза, металл—пузыри инертного газа и CO , неметаллические включения и т.п. Общее состояние системы определяется полностью ее химическим составом и температурой, что зависит от совокупности процессов, протекающих на различных границах. Поэтому рассмотрели все возможные реакции, протекающие на различных границах, сопровождающиеся заметным изменением свободной энергии Гиббса при температурах сталеварения.

Очевидно, что оценку гидродинамического состояния ванны можно провести при наличии единого, независимого от режима продувки, критерия. Такой критерий k был найден исходя из того, что состояние всей системы в целом можно описать при помощи энергии Гиббса системы G , которая изменяется под воздействием совокупности процессов на различных межфазных границах ΔG_i :

$$\frac{dG}{d\tau} = -k \sum_{i=1}^n \Delta G_i p_i, \tag{1}$$

где ΔG_i — изменение энергии Гиббса в результате протекания частной реакции; p_i — вклад частной реакции в изменение энергии Гиббса системы;

$$\frac{dG}{d\tau} = -k(\Delta G_1 p_1 + \Delta G_2 p_2 + \dots + \Delta G_i p_i);$$

$$\frac{dG}{d\tau} = k(p_1 RT \ln K_{p_1} + p_2 RT \ln K_{p_2} + \dots + p_i RT \ln K_{p_i});$$

$$\frac{dG}{d\tau} = kRT \ln K_{p_1}^{p_1} + kRT \ln K_{p_2}^{p_2} + \dots + kRT \ln K_{p_i}^{p_i};$$

$$G = RT \ln \prod a_i.$$

Отсюда

$$\int \frac{d \ln \prod a_i}{\ln \prod K p_i p_i} = \int k d\tau.$$

Интегрируя по каждой переменной, получаем

$$\int \frac{d \ln a_i}{A + p_i \ln a_i} = \frac{1}{p_2} \ln \prod K p_1^{p_1} + \frac{1}{p_2} \ln \prod K p_2^{p_2} + \dots + \frac{1}{p_i} \ln \prod K p_i^{p_i}.$$

Зная величину p_i , можно рассчитать значение коэффициента k , определяющего гидродинамическую ситуацию в расплаве.

Для шлака:

$$p_{\text{шл}} \ln \frac{a_{\text{Si}}^{0.5} P_{\text{CO}} a_{\text{Mn}} P_{\text{CO}} a_{\text{Al}}^{2/3} P_{\text{CO}} P_{\text{CO}} (\text{MnO}) a_{\text{Al}}^{2/3} (\text{MnO}) a_{\text{Al}}^{4/3} (\text{SiO}_2) (\text{SiO}_2)}{(\text{SiO}_2)^{1/2} a_{\text{C}} (\text{MnO}) a_{\text{C}} a_{\text{C}} a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^{1/3} (\text{FeO}) a_{\text{C}} (\text{Al}_2\text{O}_3)^{1/3} a_{\text{Mn}} (\text{FeO}) a_{\text{Mn}} a_{\text{Si}}} \times$$

$$\times \frac{(\text{SiO}_2) a_{\text{Mn}}^2}{(\text{Al}_2\text{O}_3)^{2/3} (\text{FeO})^2 a_{\text{Si}} (\text{MnO})^2 a_{\text{Si}}} =$$

$$= p_{\text{шл}} \ln (a_{\text{Si}}^{0.5-3} P_{\text{CO}}^4 a_{\text{Mn}}^{1-2+1+1} a_{\text{Al}}^{2/3+2/3+4/3} a_{\text{C}}^{-4} (\text{SiO}_2)^{-1/2+3} (\text{MnO})^{-1+1+1-1+1} (\text{Al}_2\text{O}_3)^{-1/3-2/3-1/3} (\text{FeO})^{-1-1});$$

для атмосферы:

$$p_a \ln \frac{P_{\text{CO}} (\text{MnO}) (\text{SiO}_2) (\text{FeO}) a_{\text{N}}}{P_{\text{O}_2}^{1/2} a_{\text{C}} P_{\text{O}_2}^{1/2} a_{\text{Mn}} a_{\text{Si}} P_{\text{O}_2} P_{\text{O}_2}^{1/2} P_{\text{N}_2}^{1/2}} = p_a \ln (l(\text{MnO}) (\text{SiO}_2) (\text{FeO}) a_{\text{N}} P_{\text{O}_2}^{-5/2} P_{\text{N}_2}^{-1/2} a_{\text{C}}^{-2} a_{\text{Mn}}^{-1} a_{\text{Si}}^{-1});$$

для футеровки:

$$p_{\text{фут}} \ln \frac{P_{\text{CO}} a_{\text{Al}}^{2/3} a_{\text{Al}}^{2/3} (\text{MnO}) (\text{SiO}_2) a_{\text{Al}}^{4/3} P_{\text{CO}} a_{\text{Si}}^{1/2} P_{\text{CO}}^3}{(\text{Al}_2\text{O}_3)^{1/3} a_{\text{C}} (\text{Al}_2\text{O}_3)^{1/3} a_{\text{Mn}} a_{\text{Si}} (\text{Al}_2\text{O}_3)^{2/3} (\text{SiO}_2)^{1/2} a_{\text{C}} (\text{Fe}_2\text{O}_3) a_{\text{C}}} =$$

$$= p_{\text{фут}} \ln (l a_{\text{Al}}^{2/3+2/3+4/3} (\text{MnO}) (\text{SiO}_2)^{1-1/2} a_{\text{Si}}^{1/2-1} (\text{Al}_2\text{O}_3)^{-1/3-1/3-2/3} a_{\text{C}}^{-3} a_{\text{Mn}}^{-1} (\text{Fe}_2\text{O}_3)^{-1} =$$

$$= p_{\text{фут}} \ln (a_{\text{Al}}^{8/3} a_{\text{Si}}^{-0.5} a_{\text{C}}^{-2} a_{\text{Mn}}^{-1} (\text{MnO}) (\text{SiO}_2)^{-0.5} (\text{Al}_2\text{O}_3)^{-5/3});$$

$$S_{\text{шлак-металл}} = 15 \text{ м}^2, p_{\text{м}} = 0,412,$$

$$S_{\text{металл-футеровка}} = 21,4 \text{ м}^2, p_{\text{фут}} = 0,588.$$

Если предположить, что шлак покрывает расплав сплошным слоем, т.е. взаимодействие атмосферы с расплавом осуществляется посредством шлака, получим

$$\Delta G_{\Sigma} = \Delta G_{\text{ш}} p_{\text{ш}} + \Delta G_{\text{ф}} p_{\text{ф}}. \quad (2)$$

Для шлака:

$$P_{\text{ш}} \ln (a_{\text{Si}}^{-2.5} a_{\text{Al}}^{8/3} a_{\text{C}}^{-4} (\text{SiO}_2)^{2.5} (\text{Al}_2\text{O}_3)^{-4/3} (\text{FeO})^{-2} a_{\text{Mn}} (\text{MnO})^{-2}) =$$

$$= \ln (a_{\text{Si}}^{-1.03} a_{\text{Al}}^{2.129} a_{\text{C}}^{-1.648} (\text{SiO}_2)^{1.03} (\text{Al}_2\text{O}_3)^{-0.549} (\text{FeO})^{-0.824} a_{\text{Mn}}^{0.412} (\text{MnO})^{-0.824});$$

для футеровки:

$$p_{\text{фут}} \ln (a_{\text{Al}}^{8/3} a_{\text{Si}}^{-0.5} a_{\text{C}}^{-3} a_{\text{Mn}}^{-1} (\text{MnO}) (\text{SiO}_2)^{-0.5} (\text{Al}_2\text{O}_3)^{-5/3} (\text{Fe}_2\text{O}_3)^{-1}) =$$

$$= \ln (a_{\text{Al}}^{1.568} a_{\text{Si}}^{-0.294} a_{\text{C}}^{-1.764} a_{\text{Mn}}^{-0.588} (\text{MnO})^{0.588} (\text{SiO}_2)^{-0.294} (\text{Al}_2\text{O}_3)^{-0.98} (\text{Fe}_2\text{O}_3)^{-0.588}).$$

Подставляя в последнее выражение состав футеровки, получаем:

$$\ln (a_{\text{Al}}^{1.568} a_{\text{Si}}^{-0.294} a_{\text{C}}^{-1.764} a_{\text{Mn}}^{-0.588} (\text{MnO})^{0.588} \cdot 1,5^{-0.294} \cdot 0,2^{-0.98} \cdot 3,5^{-0.588}) =$$

$$= \ln (a_{\text{Al}}^{1.568} a_{\text{Si}}^{-0.294} a_{\text{C}}^{-1.764} a_{\text{Mn}}^{-0.588} (\text{MnO})^{0.588} \cdot 1 \cdot 4,842 \cdot 0,479) =$$

$$= \ln (a_{\text{Al}}^{1.568} a_{\text{Si}}^{-0.294} a_{\text{C}}^{-1.764} a_{\text{Mn}}^{-0.588} (\text{MnO})^{0.588} \cdot 2,318);$$

$$\Delta G_{\Sigma} = \ln (a_{\text{Si}}^{-1.03} a_{\text{Al}}^{2.129} a_{\text{C}}^{-1.648} (\text{SiO}_2)^{1.03} (\text{Al}_2\text{O}_3)^{-0.549} (\text{FeO})^{-0.824} a_{\text{Mn}}^{0.412} (\text{MnO})^{-0.824}) +$$

$$+ \ln (a_{\text{Al}}^{1.568} a_{\text{Si}}^{-0.294} a_{\text{C}}^{-1.764} a_{\text{Mn}}^{-0.588} (\text{MnO})^{0.588} \cdot 2,318) = \ln a_{\text{Al}}^{3.697} a_{\text{Si}}^{-1.324} a_{\text{C}}^{-3.412} (\text{SiO}_2)^{1.03} \times$$

$$\times (\text{Al}_2\text{O}_3)^{-0.549} (\text{MnO})^{0.588} (\text{FeO})^{-0.824} \cdot 2,318;$$

$$\frac{\ln (2,318 a_{\text{Al}}^{3.697} a_{\text{Si}}^{-1.324} a_{\text{C}}^{-3.412} (\text{SiO}_2)^{1.03} (\text{Al}_2\text{O}_3)^{-0.549} (\text{MnO})^{0.588} (\text{FeO})^{-0.824})_0}{\ln (2,318 a_{\text{Al}}^{3.697} a_{\text{Si}}^{-1.324} a_{\text{C}}^{-3.412} (\text{SiO}_2)^{1.03} (\text{Al}_2\text{O}_3)^{-0.549} (\text{MnO})^{0.588} (\text{FeO})^{-0.824})_{\tau}} = 1,285k, \quad (3)$$

где k — множитель, характеризующий гидродинамику ванны, т.е. степень турбулизации расплава; p_i — весовой вклад i -й реакции в суммарное изменение состояния системы; ΔG_i — изменение энергии Гиббса при протекании межфазного массообмена.

Если известно изменение состояния системы (по опытным данным), то, интегрируя уравнение, можно определить значение величины k , которое для конкретного варианта обработки будет величиной постоянной.

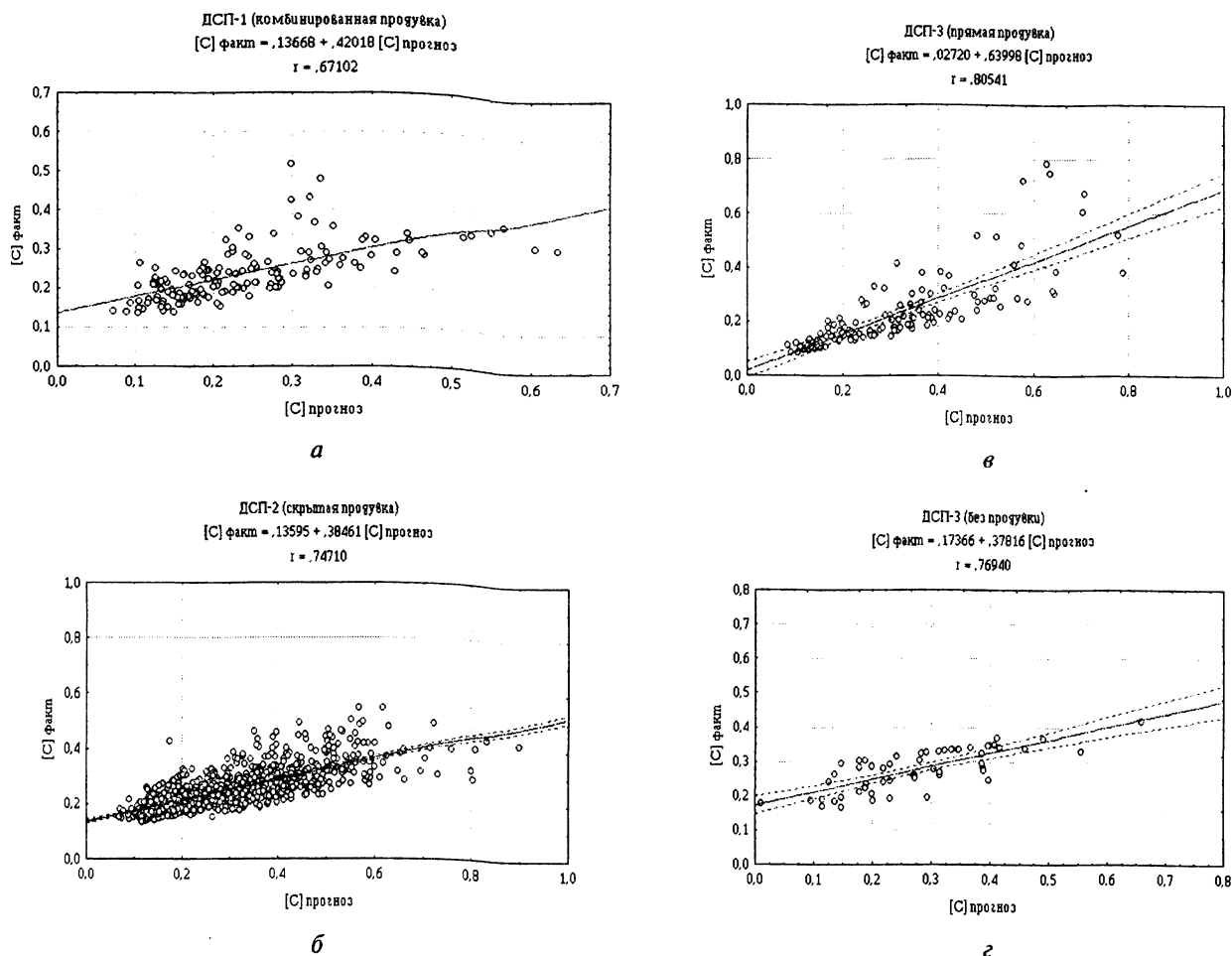


Рис. 2. Прогнозирование химического состава по углероду: а — комбинированная продувка; б — скрытая продувка; в — прямая продувка; г — без продувки

Результаты расчета гидродинамического параметра системы k

Режим продувки	ДСП-1	ДСП-2	ДСП-3
Без продувки	0,0084	—	0,011
«Скрытая продувка»	—	0,0094	—
«Прямая продувка»	—	0,106	0,098
Комбинированная продувка	0,214	—	—

В таблице представлены значения k для различных вариантов продувки. Из таблицы видно, что при увеличении интенсивности продувки возрастает и значение k . При этом на величину этого параметра оказывают влияние конструктивные и технологические параметры печи, такие, как геометрическая форма агрегата, наличие и режим подачи газа (прежде всего кислорода) через дополнительные продувочные устройства (фурма-манипулятор, эркерная фурма, "копье"), т.е. при использовании результатов данной модели для управления ходом плавки необходимо определить значение параметра k для каждой печи отдельно.

Зная величину k , можно прогнозировать содержание любого компонента в расплаве. Результаты прогноза содержания углерода с помощью разработанной модели представлены на рис. 2.

Итак, установили, что донная продувка позволяет существенно интенсифицировать скорости массообменных процессов в сталеплавильной ванне, что ведет к сокращению длительности плавки.

Существует пропорциональная связь между интенсивностью перемешивания и скоростью протекающих межфазных реакций, при этом наиболее эффективна комбинированная продувка.

Разработанная физико-химическая модель позволяет прогнозировать поведение отдельных компонентов ванны, что дает возможность использовать ее в системах АСУ ТП плавки.