

4. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Пекарский М. Я. Кольцевые печи: Теория и расчеты. — Мн.: Выш. шк., 1993. — 248 с.

5. Маковский В. А. Эмпирические формулы для выражения температурной зависимости теплофизических свойств стали // Сталь. — 1972. — № 1. — С. 87—89.

6. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Козлов С. М. Влияние кантования на нагрев цилиндрических заготовок с изменяющимися по периметру граничными условиями в кольцевых печах оспекатного производства // Литье и металлургия. — 1999. — № 4. — С. 35—37.

7. Разработка и внедрение ресурсосберегающих теплотехнологий производства осевых заготовок на Днепровском металлургическом комбинате им. Ф. Э. Дзержинского / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, И. С. Тимошпольский и др. // Литье и металлургия. — 1998. — № 3. — С. 21—24.

УДК 669.187.2

С. Н. ПАДЕРИН, докт. техн. наук (МИСиС),  
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, докт. техн. наук (БГПА),  
А. Д. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук (БМЗ),  
М. Г. ПШОНИК, канд. техн. наук,  
Н. Г. МАЛЬКЕВИЧ, канд. техн. наук (БГПА)

## **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В 100-ТОННОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАЛЛИЗОВАННЫХ ОКАТЫШЕЙ**

В электросталеплавильном производстве к настоящему времени сформировалась концепция технологии высшего уровня, направленная на коренное изменение технологии плавки и конструкции дуговых печей для решения двух основных задач: повышения производительности и уменьшения энергопотребления. Сверхмощная печь используется как высокопроизводительный агрегат для выплавки полупродукта. Использование металлизированных окатышей приводит к работе по специфическим энерготехнологическим режимам.

На Белорусском металлургическом заводе технология выплавки жидкого полупродукта в 100-тонной сверхмощной печи включает непрерывную загрузку металлизированных окатышей на жидкий металл, их плавление, совмещенное с окислительным рафинированием металлической ванны.

Важнейшей технологической задачей является синхронизация процессов непрерывной загрузки окатышей и их плавление с дос-

тижением прогнозируемой температуры металлической ванны переменной массы. Вдуванием кислорода в металлическую ванну при непрерывной загрузке металлизированных окатышей обеспечивается совмещение процессов нагрева и плавления окатышей и окислительного рафинирования металлической ванны переменной массы. Это не противоречит требованиям технологии высшего уровня, так как окислительное рафинирование металла не выделяется в самостоятельный технологический период и не связано со снижением производительности печи. Более того, энергия экзотермических химических реакций взаимодействия компонентов металлической ванны с кислородом добавляется к электрической и способствует ускорению процесса плавления. Одновременно с плавлением окатышей происходят обезуглероживание и дефосфорация жидкого металла.

В период непрерывной загрузки окатышей в печь происходят их нагрев и плавление в зоне электрических дуг, а также нагрев и окислительное рафинирование постоянно увеличивающейся массы жидкого металла. Одновременно осуществляются нагрев и ошлакование загружаемой в печь извести и нагрев жидкого шлака. Эти энергоемкие процессы происходят за счет электрической энергии. Некоторый вклад в энергетику этих процессов вносят экзотермические химические реакции при вдувании в жидкий металл газообразного кислорода. За время непрерывной нагрузки и плавления металлизированных окатышей необходимо увеличить массу жидкого металла от начальной  $m_0$  до заданной  $m_{\text{кон}} = 115 - 125$  т, получить температуру и химический состав жидкого металла в рекомендованных пределах, причем металл должен быть хорошо перемешан, однороден по температуре и составу. Этот результат достигается интенсивным кипением ванны за счет развития реакции обезуглероживания стали при вдувании кислорода.

При разработке энерготехнологических режимов этого периода важно синхронизировать скорость загрузки и скорость расплавления окатышей. Мощность печи должна быть максимальной, чтобы обеспечить высокую производительность агрегата и требования технологии высшего уровня. Этой максимальной мощности должны соответствовать оптимальные скорости загрузки окатышей, равные скоростям их плавления. Не должны происходить как накопление массы нерасплавившихся окатышей, так и значительные перегревы металлической ванны. В период непрерывной загрузки и плавления окатышей необходимо обеспечить нагрев металлической ванны до температуры, близкой к температуре выпуска жидкого металла из печи.

Процесс плавления окатышей совмещают с процессом окислительного рафинирования стали. Желательно иметь продолжительный период интенсивного обезуглероживания и кипения металла при относительно высокой и постоянной температуре, что приводит к дегазации стали, удалению неметаллических включений, усреднению температуры и состава металла в печи. Результаты опытных плавов позволяют рассчитать возможные варианты энерготехнологических режимов выплавки жидкого полупродукта в 100-тонной сверхмощной дуговой печи, удовлетворяющие требованиям технологии высшего уровня.

Уравнение полезной мощности запишем в форме

$$\dot{Q} = A + B(T - T_{\text{пл}}) + C(T - T_{\text{пл}}) / \Delta\tau, \quad (1)$$

где  $A = (c_1 \delta \dot{m} + c_{\text{из}} \dot{m}_{\text{из}})(T_{\text{пл}} - 293) + L_{\text{Fe}} \dot{m} + L_{\text{из}} \dot{m}_{\text{из}}$ ;  $B = c_1 \delta \dot{m} + c_{\text{из}} \dot{m}_{\text{из}}$ ;  $C = c_2 m_0$ .

Коэффициенты  $A$  и  $B$  являются функциями скоростей загрузки окатышей  $\delta \dot{m}$  и извести  $\dot{m}_{\text{из}}$ , коэффициент  $C$  зависит от массы жидкого металла  $m_0$  в печи перед началом загрузки окатышей. Если принять, что скорость загрузки извести составляет 10 % от скорости загрузки окатышей, то коэффициенты  $A$  и  $B$  можно выразить функциями одной переменной: скорости увеличения массы жидкого металла  $\dot{m}$ , кг/с. С учетом величин констант  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_{\text{из}}$ ,  $L_{\text{Fe}}$ ,  $L_{\text{из}}$  ( $c_1 = 0,698$  кДж/(кг · К) — средняя удельная теплоемкость стального лома,  $c_2 = 0,835$  кДж/(кг · К) — удельная теплоемкость жидкого металла,  $c_{\text{из}} = 0,903$  кДж/кг — средняя удельная теплоемкость твердой извести,  $L_{\text{Fe}} = 284$  кДж/(кг · К) — удельная теплота плавления шихтовых материалов на основе железа,  $L_{\text{из}} = 0,209$  кДж/кг — удельная теплота «ошлакования» извести) получим:

$$A = (c_1 \delta \dot{m} + 0,1 \dot{m}_{\text{из}})(T_{\text{пл}} - 293) + L_{\text{Fe}} \dot{m} + 0,1 L_{\text{из}} \dot{m}_{\text{из}} = 1538 \dot{m}; \quad (2)$$

$$B = c_2 \dot{m} + c_{\text{из}} 0,1 \dot{m} = (c_2 + 0,1 c_{\text{из}}) \dot{m} = (0,835 + 0,1 \cdot 0,624) \dot{m} = 0,897 \dot{m}; \quad (3)$$

$$C = c_2 m_0 = 0,835 m_0. \quad (4)$$

Уравнение (1) и значения коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  по уравнениям (2)—(4) позволяют получить следующие взаимосвязанные зависимости между двумя технологическими параметрами (скорость увеличения массы жидкого металла и продолжительность загрузки окатышей) и температурой металлической ванны:

$$\tau = f(\dot{m}, T) = \frac{0,835m_0(T - T_0)}{\dot{Q} - [15838 + 0,897(T - T_{пл})]\dot{m}};$$

$$\dot{m} = f(\tau, T) = \frac{\dot{Q}\tau - 0,835m_0(T - T_0)}{[1538 + 0,897(T - T_{пл})]\tau};$$

$$T = f(\dot{m}, \tau) = \frac{(\dot{Q} + 14\dot{m})\tau + 0,835m_0T_0}{0,897\dot{m}\tau + 0,835m_0}. \quad (5)$$

С помощью этих уравнений можно разрабатывать разные энерготехнологические режимы периода загрузки окатышей, удовлетворяющие заданным требованиям. В соответствии с высказанными выше технологическими рекомендациями загрузку окатышей можно разделить на два периода.

В течение первого, относительно короткого, регулируем скорость загрузки окатышей при постоянной и высокой мощности так, чтобы обеспечить нагрев металлической ванны до оптимальной температуры  $T$ . Во втором периоде при постоянной и максимальной скорости загрузки окатышей температура металлической ванны должна оставаться практически постоянной, что обеспечивает оптимальные условия окислительного рафинирования жидкого металла.

Уравнение (5) использовали для расчета температуры металлической ванны на опытной плавке в 100-тонной дуговой печи.

На этой плавке загрузку окатышей начали на 23-й минуте от начала плавления брикетов. Начальную температуру металла приняли равной температуре плавления металлизированных окатышей:  $T_0 = 1730\text{ К}$ . В расчетах взяты фактические значения активной мощности и скорости загрузки окатышей. При скорости подвода кислорода  $17,5\text{ м}^3/\text{мин}$  тепловая мощность экзотермических реакций

$$\dot{Q}_x = 0,744\dot{Q}_{O_2} (1,6 \cdot 159,32 + 0,3 \cdot 254,85 - 0,029(T - 293)) = 3,73\text{ МВт}. \quad (6)$$

Тепловой КПД на весь период загрузки  $\eta_T = 0,70$ . Полезную мощность (МВт) в расчетных промежутках времени определили по уравнению

$$\dot{Q} = \eta_T(\bar{P} + \dot{Q}_x) = 0,70(\bar{P} + 3,73).$$

Исходные данные и результаты расчетов представлены в таблице 1. Из таблицы видно, что расчетные и измеренные температуры металлической ванны находятся в удовлетворительном соответствии.

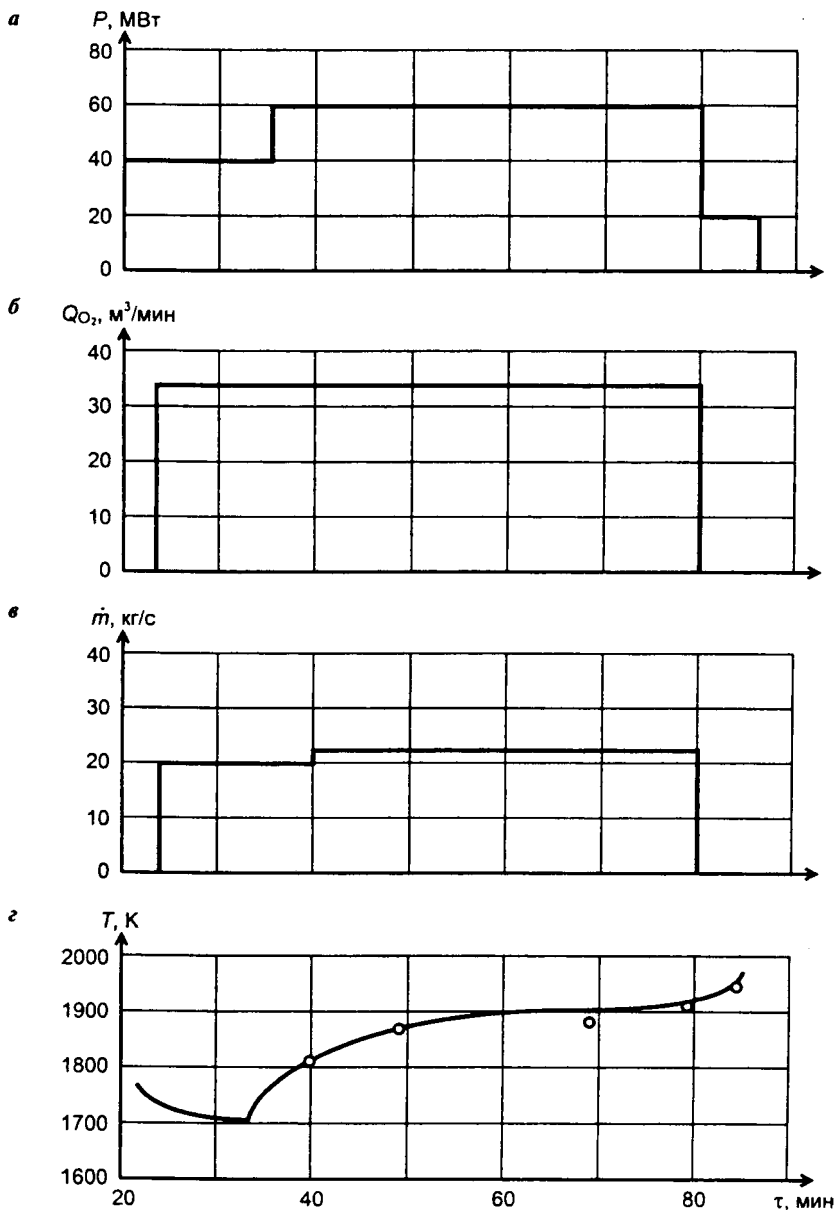


Рис. 1. Технологические параметры опытной плавки в 100-тонной дуговой печи: а — активная мощность  $P$ ; б — скорость подвода кислорода  $Q_{O_2}$ ; в — скорость увеличения массы жидкого металла  $\dot{m}$ ; г — расчетная кривая изменения температуры металлической ванны и измеренные значения температуры по ходу плавки

Технологические параметры опытной плавки в 100-тонной дуговой печи.  
 Расчетные и измеренные температуры металлической ванны  
 в период загрузки окатышей

Время, мин	Δt, с	$\bar{P}$ , МВт	$\dot{m}$ , кг/с	$m_i$ , т	Температура T, К	
					расчетная	измеренная
23				39,0	1730	—
33	600	41,2	21,85	52,11	1700	—
39	360	58,9	21,85	59,98	1776	1780
49	600	58,9	23,75	74,23	1836	1865
69	1200	59,8	23,75	102,73	1905	1867
79	600	59,8	23,75	117,0	1927	1923
84	300	24,0	0	117,0	1978	1950

На рис. 1 приведены технологические параметры этой плавки: активная мощность трансформатора, скорость увеличения массы жидкого металла и скорость подвода кислорода. На рис. 1, 2 показана рассчитанная по уравнению (6) кривая изменения температуры металлической ванны. Измеренные значения температуры удовлетворительно укладываются на расчетную кривую.

Таким образом, разработана и опробована физико-химическая модель энергетических и технологических процессов периода непрерывной загрузки окатышей в 100-тонную дуговую печь. Модель позволяет рассчитывать и прогнозировать температуру металлической ванны при заданных энерготехнологических параметрах и совмещении процессов загрузки—плавления окатышей и окислительного рафинирования жидкого металла. Предложенную модель целесообразно использовать для разработки оптимальных энерготехнологических режимов, удовлетворяющих требованиям технологии высшего уровня.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лопухов Г. А., Кацов Е. З. Производство стали в дуговых печах. Итоги науки и техники. Серия. Производство чугуна и стали. — М.: ВИНТИ, 1989. — Т. 19. — С. 3—87.

2. Расчеты металлургических реакций на ЭВМ / Д. И. Рыжонков, С. Н. Падерин, С. В. Серов и др. — М.: Металлургия, 1987. — 231 с.

3. Кинематические закономерности и технологические константы обезуглероживания стали в 100-т дуговой печи / С. Н. Падерин, А. Г. Афанасиади, С. И. Чемерис и др. // Физико-химические основы металлургических процессов. — М.: АН СССР. Ин-т металлургии им. Байкова, 1991. — Ч. 2. — С. 137—140.

УДК 669.041

В. Б. КОВАЛЕВСКИЙ, докт. техн. наук,  
Д. М. ЗЕЗЮЛИН (БГПА)

### МИНИМИЗАЦИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТ ЗАДАННОЙ ПРИ ВЫДЕРЖКЕ МЕТАЛЛА В КАМЕРНЫХ ПЕЧАХ

При рассмотрении задачи тепловой обработки термически тонкого тела в камерной печи [1], ввиду отличия реального теплового процесса от желаемого, возникает проблема минимизации имеющегося рассогласования по температуре газа  $\Delta T_r$ , металла  $\Delta T$  и расходу топлива  $\Delta v$ .

Задача минимизации рассогласования может быть представлена в виде [2]:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu; \quad (1)$$

$$x(t_k) = x_k; \quad (2)$$

$$I(u) = \int_0^{t_k} (x^T Px + u^T Qu) dt \rightarrow \min_{u \in R}, \quad (3)$$

где  $x = \begin{pmatrix} \Delta T_r \\ \Delta T \end{pmatrix}$ ;  $u = \Delta v$ ,  $A = \begin{pmatrix} A_2 + A_3 & -A_3 \\ -\mu & \mu \end{pmatrix}$ ;  $B = \begin{pmatrix} -A_1 \\ 0 \end{pmatrix}$ ;  $x_k = \begin{pmatrix} \Delta T_{r0} \\ \Delta T_0 \end{pmatrix}$ ;  
 $P = \begin{pmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \beta \end{pmatrix}$ ;  $Q = \gamma$ .

В формулах (1)—(3) были приняты следующие обозначения:  $T_r(t)$  — температура греющей среды, °С;  $T(t)$  — температура металла, °С;  $v$  — расход газа, м<sup>3</sup>/ч;  $t_k$  — конечное время выдержки,