

*Е.А. Черменёв, Э.Э. Меркер, Д.А. Харламов*

Старооскольский технологический институт (филиал)  
Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА, НАГРЕВА И ПЛАВЛЕНИЯ ОКАТЫШЕЙ В ВАННЕ ДУГОВОЙ ПЕЧИ

**Аннотация.** В работе с применением методов моделирования рассмотрены процессы теплообмена, нагрева и плавления окатышей в ванне дуговой печи и определены условия передачи тепла от дуг и характер распределения тепла в ванне с учетом процессов обезуглероживания при подаче окатышей в железо-углеродистый расплав ванны печи, показаны пути интенсификации режимов нагрева и плавления потока железорудных металлизированных окатышей в дуговой печи.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, распределения тепла, электрическая дуга.

## MODELLING OF TRANSMISSION OF HEAT, A HEATING AND FUSION OF PELLETS IN AN ARC FURNACE BOSH

**Abstract.** With application of methods of modelling processes of heat interchange, a heating and fusion of pellets in a bosh of the arc furnace are viewed and requirements of transmission of heat from arcs and character of allocation of heat in a bosh taking into account decarburizing processes are spotted at delivery of pellets in iron-carbonaceous melt of a bosh of the oven, trajectories of an intensification of modes of a heating and stream fusion DRI pellets in the arc furnace are shown.

**Keywords:** the arc steel furnace, heat allocations, an electric arc.

При электроплавке металлизированных окатышей в ванне дуговой печи скорость нагрева металла, удельный расход электроэнергии и электродов существенно зависят от эффективности использования тепла электрических дуг [1, 2]. Долю выделяющегося в дуге тепла, идущую на нагрев металла со шлаком [3] обозначили как  $\eta_m = P_m/P_d$ , а долю выделяющегося в дуге тепла, передаваемую всей ванне печи [3] определяли соотношением:

$$\eta_b = 1 - P_{п.д}/P_d,$$

где  $P_d$  – тепловая мощность электрических дуг;  $P_m$  – часть мощности дуги, идущая на нагрев металла со шлаком;  $P_{п.д}$  – потери мощности в дуге МВт.

При отсутствии существенных тепловых потерь ванной печи величины  $\eta_m$  и  $\eta_b$  совпадают и в этом случае они связаны соотношением:  $\eta_m = \eta_b - P_{п.в}/3P_d$ , где  $P_{п.в}$  – мощность тепловых потерь ванной печи после отключения агрегата, МВт.

Полагали, что потери мощности в дуге  $P_{п.д}$  пропорциональны мощности, выделяющейся в открытой части столба электрической дуги и в приэлектродном анодно-катодном пятне, т.е. в этом случае длину открытой части столба дуги ( $L_{о.д}$ , м) находили по уравнению

$$L_{о.д} = L_d - h_m - k_2 H_{ш},$$

где  $L_d$  – длина дуги, м;  $h_m$  – глубина мениска, образованного давлением дуги на жидкий металл, м;  $H_{ш}$  – высота шлака, м;  $k_2$  – эмпирический коэффициент.

Обычно глубину мениска  $h_m$  принимают [1] пропорциональной току дуги  $I_d$ , кА, т.е.  $h_m = k_1 I_d$ , где  $k_1$  – коэффициент пропорциональности, мм/кА. Напряжение дуги является функцией ее длины:

$$U_d = \beta L_d + \alpha,$$

где  $\beta$  – градиент напряжения в столбе дуги, В/мм;  $\alpha$  – анодно-катодное падение напряжения, В.

Полагая, что анодно-катодное падение напряжения со стороны электрода [2, 3] равно половине общего анодно-катодного падения напряжения дуги, из приведенных выше выражений после преобразований получили:

$$\eta_b = 1 - c \left( 1 - \beta \frac{k_1 I_d + k_2 H_{ш}}{U_d} - \frac{\alpha}{2U_d} \right),$$

где  $c$  – коэффициент пропорциональности.

При  $c = 0,75$ ;  $k_1 = 0,36$  мм/кА;  $k_2 = 0,15$ ;  $\alpha = 40$  В;  $\beta = 1,0$  В/мм;  $P_{п.в} = 5$  МВт для 150-т дуговой печи расчетами установлено, что доля тепла, идущая на нагрев металла  $\eta_m$ , возрастает с увеличением толщины шлака в ванне и слабо зависит от мощности дуги  $P_d$  в интервале 20 – 30 МВт. В случае увеличения отношения толщины шлака к длине дуги  $H_{ш}/L_d$  до 1,5 – 2,0 эффективность

усвоения тепла [3] ванной печи ( $\eta_b \rightarrow \max$ ) возрастает до 60 – 70 %. Результаты расчетов показывают, что тепловые характеристики работы дуговой печи [2, 3] улучшаются с увеличением вводимой активной мощности и высоты вспененного шлака, а при  $H_{\text{ш}} = \text{const}$  – уменьшением длины дуги.

Железорудные металлизированные окатыши (ЖМО) в ванну дуговой печи подают непрерывно по ходу электроплавки стали из дозаторов через свод агрегата в зону высоких температур. Проведенные исследования [3] показали, что процессы нагрева и плавления ЖМО осуществляются в пределах границы раздела шлак–металл в ванне печи и зависят от температуры ванны, содержания углерода и кислорода в расплаве, окисленности шлака, скорости обезуглероживания металла и темпа подачи окатышей в жидкую ванну.

Скорость плавления ЖМО при постоянстве их свойств и размеров в ванне печи зависит от температуры расплава и поверхности окатышей, интенсивности теплопередачи, времени растворения потока окатышей:

$$v_{\text{пл}} = \frac{dm_{\text{ок}}}{d\tau} = \rho_{\text{ок}} \frac{dV}{d\tau} = \frac{4}{3} \pi \rho_{\text{ок}} r^2 \frac{dr}{d\tau}, \text{ кг/с,}$$

где  $m_{\text{ок}}$  – масса окатышей, кг;  $r_{\text{ок}}$  – радиус окатыша, м;  $dV$  – изменение объема окатыша в ходе плавки, м<sup>3</sup>.

Анализ опытных данных [2, 3] показывает, что непрерывную подачу ЖМО в печь целесообразно осуществлять при содержании углерода [C] в пределах 0,15 – 0,2 %, т.е. в области максимума обезуглероживания металла за счет наличия эффекта самораскипания сталеплавильной ванны.

Тепло от дуги передается металлу через мениск на зеркале под дугой и через шлак на остальной поверхности, а шлак получает [1, 3] тепло от дуги и отраженного излучения от кладки печи. Количество теплоты, передаваемой от «горячего пятна» под электродом теплопроводностью вглубь ванны равно:

$$q_{\text{тепл}} = \lambda_{\text{ме}} (T_s - T_{\text{под}}) / h,$$

где  $q_{\text{тепл}}$  – тепловой поток ванны, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda_{\text{ме}}$  – теплопроводность металла, равная 19 Вт/(м·К);  $h$  – толщина слоя металла, м;  $T_s$  и  $T_{\text{под}}$  – температура поверхности мениска под дугой (3148 К) и температура внутренней поверхности подины (1873 К) соответственно.

При этих данных и значении  $h = 1,4$  м величина  $q_{\text{тепл}} = 1,7 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. Установлено, что количество теплоты, передаваемой теплопроводностью от трех «горячих пятен»,  $Q_{\text{тепл}} = 1,7 \cdot 10^4 \cdot 2,88 = 49$  кВт, где 2,88 – поверхность трех «пятен» от электрических дуг в печи, м<sup>2</sup>.

Общее количество теплоты, полученной всей массой металла, определяли замерами температуры ванны ( $T_1$  и  $T_2$ , °С):

$$Q_1 = c_m M \Delta T / \tau,$$

где  $c_m$  – теплоемкость металла, равная 500 Дж/(кг·К);  $M$  – масса металла (150 000 кг);  $\Delta T$  – разность температур  $T_2 - T_1$ , °С;  $\tau$  – время между начальным и конечным замерами температур, с. При мощности трансформаторов печи в пределах 84 700 – 101 845 кВт·А значение  $Q_1$  изменялось от 6000 до 8000 кВт. В общем виде

$$Q_1 = Q_{\text{тепл}} + Q_2 + Q_3,$$

где  $Q_2 = \lambda \Delta T F / H_{\text{ш}}$  – количество теплоты, передаваемой ванне металла от шлака. При  $\lambda = 3$  Вт/(м·К);  $H_{\text{ш}} = 0,3$  м;  $\Delta T = 50$  К (перепад температур по толщине слоя шлака) и  $F = 18,84 - 2,88 = 15,96$  м<sup>2</sup>, получили  $Q_2 = (3 \cdot 50 \cdot 15,96) / 0,3 = 7,98$  кВт.

Количество теплоты, полученной всей массой металла за счет вынужденной конвекции ( $Q_3$ ) определяли из выражения

$$Q_3 = Q_1 - Q_{\text{тепл}} - Q_2$$

и эта величина изменялась в пределах 5985 – 7950 кВт, т.е. отношение  $Q_3 / Q_1 = 95,3 - 99,3$  %. Из анализа расчетных данных следует, что ванна получает тепло за счет теплопроводности от «горячих пятен» ( $Q_{\text{тепл}} / Q_1$ ) в пределах 1 – 5 %, а от шлака ( $Q_2 / Q_1$ ) в пределах 0,7 – 1,0 %. Следовательно доля тепла от вынужденной конвекции достигается за счет интенсификации процессов перемешивания ванны путем обезуглероживания и продувки металла кислородом, применения топливно-кислородных горелок, подачи ЖМО в зону воздействия электрических дуг в подэлектродное пространство и оптимизации теплообмена в системе дуга–шлак–металл при соблюдении рациональной загрузки потока окатышей в зависимости от параметров теплового состояния ванны в дуговой печи.

Таким образом, процессы теплообмена, нагрева и плавления окатышей в ванне дуговой печи определяются условиями теплогенерации тепла в дугах, характером распределения тепла в ванне, режимом обезуглероживания металла и подачи окатышей в расплав, скорость расплавления которых повышается в зависимости от размеров и свойств окатышей, температуры и степени перемешивания железо-углеродистого расплава в агрегате.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. – М.: Металлургия, 1981. – 320 с.
2. Игнатов И.М., Хаинсон А.В. Математическое моделирование и расчет дуговых сталеплавильных печей. – М.: Металлургия, 1983. – 275 с.
3. Черменёв Е.А., Меркер Э.Э. // Изв. вуз. Черная металлургия. № 9. 2011. С. 8 – 10.