

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 η_m и η_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 β – градиент напряжения в столбе дуги, В/мм; α – 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 η_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, м³.

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/м²; $\lambda_{\text{ме}}$ – 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/м². 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, м².

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); ΔT – разность температур $T_2 - T_1$, °С; τ – 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 $F = 18,84 - 2,88 = 15,96$ м², 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.