

Методика расчета продолжительности расплавления кускового лома в расплаве жидкой стали

Тимошпольский В. И.*, Ратников П. Э.

НАНБ*, Белорусский национальный технический университет

Цель работы: С целью совершенствования теплотехнических режимов работы дуговых сталеплавильных печей разработать математическую модель плавления металлического лома, учитывающую зависимость теплофизических свойств материала от температуры, влияние условий теплообмена с течением времени, влияние оплавленного слоя на процесс плавления кускового лома и другие факторы, оказывающие значительное влияние на процесс плавления.

Математическая модель процесса плавления металла. В основу математической модели симметричного плавления термомассивного кускового лома с переменными теплофизическими характеристиками положена широко известная схема термического слоя [1], разбивающая процесс плавления на три этапа: 1) инерционный, когда температурные возмущения достигнут центра; 2) регулярный когда происходит нагрев тела по всему сечению; 3) период расплавления. Схема теплового пограничного слоя приведена на рисунке 1.

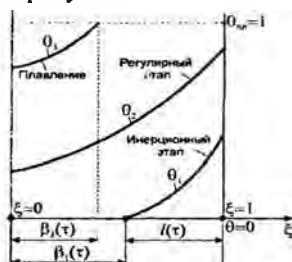


Рисунок 1. Схема теплового пограничного слоя при расплавлении металла

Предполагаем также, что расплав непрерывно удаляется с поверхности тела, растворяясь в общей массе жидкого металла. Такое предположение вводилось во многих работах ([2, 3] и др.).

Математическая модель процесса состоит из уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left[(1 + \varepsilon_x \theta_j) \frac{\partial \theta_j}{\partial \xi} \right] = (1 + \varepsilon_x \theta_j) \frac{\partial \theta_j}{\partial \tau} \quad (1)$$

и краевых условий:

на стадии предварительного нагрева ($0 \leq \tau \leq \tau_\phi^0$), расчлененного (согласно модели термического слоя [1] рисунок 1) на инерционный этап ($j = 1, 0 \leq \tau \leq \tau_0; \beta_1(\tau) \leq \xi \leq 1; \theta_1(\xi, 0) \equiv \theta_0 = 0$)

$$\left. \begin{aligned} (1 + \varepsilon_x \theta_{1n}) \frac{\partial \theta_1}{\partial \xi} \Big|_{\xi=1} &= Bi [\theta_c - \theta_{1n}(\tau)]; \\ \theta_1(\xi, \tau) \Big|_{\xi=\beta_1(\tau)} &= 0; \quad \frac{\partial \theta_1}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\beta_1(\tau)} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

и упорядоченный этап ($j = 2, \tau_0 \leq \tau \leq \tau_\phi^0; 0 \leq \xi \leq 1; \theta_{1n}^0 = \theta_{1n}(\tau_0) \leq \theta_{2n}(\tau) \leq 1$)

$$\left. \begin{aligned} (1 + \varepsilon_x \theta_{2n}) \frac{\partial \theta_2}{\partial \xi} \Big|_{\xi=1} &= Bi [\theta_c - \theta_{2n}(\tau)]; \quad \frac{\partial \theta_2}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = 0; \\ \theta_2(\xi, \tau_0) \Big|_{\xi=0} &= \theta_{2n}^0 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

на стадии плавления ($j = 3, \tau_\phi^0 \leq \tau \leq \tau_\phi; 0 \leq \xi \leq \beta_3(\tau); \theta_{3n} \equiv 1$)

$$(1 + \varepsilon_x) \frac{\partial \theta_3}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\beta_3(\tau)} = Bi K_T + Ko \beta_3(\tau); \quad \frac{\partial \theta_3}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = 0. \quad (4)$$

Для учета термической чувствительности стали принимаем линейную зависимость теплофизических свойств от температуры

$$\lambda(T) = \lambda_0 + \delta_\lambda (T - T_0) = \lambda_0 (1 + \varepsilon_\lambda \theta); \quad \varepsilon_\lambda = \frac{\delta_\lambda}{\lambda_0} (T_\phi - T_0); \quad (5)$$

$$c(T) = c_0 + \delta_c (T - T_0) = c_0 (1 + \varepsilon_c \theta); \quad \varepsilon_c = \frac{\delta_c}{c_0} (T_\phi - T_0).$$

Здесь введены безразмерные величины

$$\left. \begin{aligned} \theta(\xi, \tau) &= \frac{T(\xi, \tau) - T_0}{T_\phi - T_0}; \quad \xi = \frac{x}{h}; \quad \beta_j(\tau) = \frac{B_j(\tau)}{h}; \quad \tau = \frac{a_0 t}{h^2}; \\ Bi &= \frac{\alpha_x h}{\lambda_0}; \quad Ko = \frac{q_\phi}{c_p^0 (T_\phi - T_0)}; \quad K_T = \frac{T_c - T_\phi}{T_\phi - T_0} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где T_0 , $T_\phi = T_{\text{ликв}}$, T_c – температуры: начальная, плавления и перегрева расплава, К; q_ϕ – скрытая теплота плавления, кДж/кг; α_c – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К); $a_0 = \lambda_0/(c_p \gamma)$ – коэффициент температуропроводности, м²/ч; γ – плотность, кг/м³; c_p – удельная теплоемкость, кДж/(кг·К); x – координата, м; $H = 2h$ – толщина пластины, м; t – время, ч; $B_j(\tau)$ – непрогретая ($j = 1$) или неоплавившаяся ($j = 3$) зона, м.

Подобная задача, но с граничными условиями не 3-го, а 2-го рода, была поставлена и решена [4] методом эквивалентных источников (МЭИ) Постольника. Позже это решение подробно изложено в работах [5...7].

Продолжительность процесса нагрев-плавление. Как известно (например, [8]), одним из основных критериев оценки работы плавильных печей является продолжительность процесса плавления. Опуская полное решение поставленной задачи (1)...(6), приведем лишь ту его часть, которой определяется время прогрева (τ_0), нагрева (τ_ϕ^0) и плавления (τ_ϕ) кусковых материалов

$$\tau_0 = [1 - 0,15(\varepsilon_\lambda - \varepsilon_c) \text{Bi}K_T] / 6; \quad (7)$$

$$\Delta\tau_\phi^0 = \tau_\phi^0 - \tau_0 = \frac{1 - \theta_n^0}{\text{Bi}K_T} \sum_{i=1}^3 \delta_{\phi i}, \quad (8)$$

где

$$\delta_{\phi 1} = 1 + \varepsilon_c \frac{1 + \theta_n^0}{2}; \quad (9)$$

$$\delta_{\phi 2} = \frac{\varepsilon_\lambda - \varepsilon_c}{3(1 + \varepsilon_\lambda)} \cdot \frac{\text{Bi}K_T}{(1 + \varepsilon_\lambda \theta_n^0)}; \quad (10)$$

$$\delta_{\phi 3} = \frac{\varepsilon_\lambda \varepsilon_c}{5(\varepsilon_\lambda - \varepsilon_c)} [2 + \varepsilon_\lambda (1 + \theta_n^0)] \delta_{\phi 2}^2; \quad (11)$$

$$\theta_n^0 = \frac{1}{\varepsilon_\lambda} (\sqrt{1 + \varepsilon_\lambda \text{Bi}K_T} - 1); \quad (12)$$

$$\Delta\tau_\phi = \frac{1}{3} \cdot \frac{1 + \varepsilon_c}{1 + \varepsilon_\lambda} \cdot \frac{\text{Ko}}{\text{Bi}K_T}. \quad (13)$$

Заметим, что при выводе формул (7)...(13) предполагалось, что $\tau_0 \leq \tau_\phi^0$, т.е. что инерционный этап закончится до

начала плавления. Учитывая (12), приходим при $\theta_n^0 \leq 1$ к неравенству

$$\text{Bi}K_T \leq 2 + \varepsilon_\lambda. \quad (14)$$

Это условие практически всегда выполняется. Например, для стального среднеуглеродистого лома предельная толщина пластины, при которой будет соблюдаться условие (14), равна $H = 2h = 1,56$ м, что явно превышает размеры кусков шихты.

Анализ влияния переменности теплофизических свойств. С использованием полученного решения (7)...(13) выполнен анализ влияния теплофизических характеристик на продолжительность процесса плавления лома.

Формула (7) показывает, что время τ_0 прогрева с ростом теплоемкости ($\varepsilon_c > 0$) увеличивается, т.е. скорость распространения тепла уменьшается. Если же возрастает теплопроводность ($\varepsilon_\lambda > 0$), скорость продвижения теплового возмущения вглубь тела возрастает, и время прогрева уменьшается. Таким образом, в этом случае совместное влияние обоих параметров нелинейности (ε_c и ε_λ) может оказаться мало существенным (например, при $\varepsilon_c \approx \varepsilon_\lambda$ оно вообще будет пренебрежимо мало), что позволяет пренебречь переменностью теплофизических свойств.

Третье слагаемое δ_{ϕ_3} (11) в общем виде проанализировать довольно сложно. Можно утверждать лишь то, что во всех случаях переменной теплофизики (5) (за исключением маловероятного варианта $\varepsilon_c > \varepsilon_\lambda > 0$) учет члена δ_{ϕ_3} (11) приведет к увеличению расчетного времени τ_ϕ^0 .

Формула (13) определяет продолжительность непосредственно плавления тела (от начала τ_ϕ^0 до конца τ_ϕ). Это уже касается времени продвижения изотермы $T = T_\phi$ ($\theta_\phi = 1$) от начала ($\beta_3 = 1$) до конца ($\beta_3 = 0$). Простота выражения (13) четко указывает, что увеличение теплоемкости ($\varepsilon_c > 0$) тормозит процесс плавления, а изменение теплопроводности будет этому или способствовать ($\varepsilon_\lambda < 0$), или препятствовать ($\varepsilon_\lambda > 0$).

Таким образом, приведенные формулы (7)...(13) четко отражают общую закономерность влияния переменности теплофизических характеристик:

– увеличение теплоемкости замедляет процессы прогрев-нагрев-плавление;

– увеличение теплопроводности ($\epsilon_\lambda > 0$) ускоряет процессы прогрева (продвижение теплового потока) и плавления (продвижение изотермы $T = T_\phi$) и замедляет процесс нагрева до $T_n = T_\phi$;

– уменьшение теплопроводности ($\epsilon_\lambda < 0$) тормозит протекание процессов прогрева и плавления и сокращает стадию нагрева поверхности до точки плавления.

С помощью представленной методики был осуществлен расчет времени плавления брикетов стали ШХ15 различного типоразмера. Зависимость времени плавления от условий теплообмена приведена на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2 увеличение коэффициента теплоотдачи α более 5000 Вт/(м²К) - нецелесообразно, так как это не приводит к существенному сокращению продолжительности плавления.

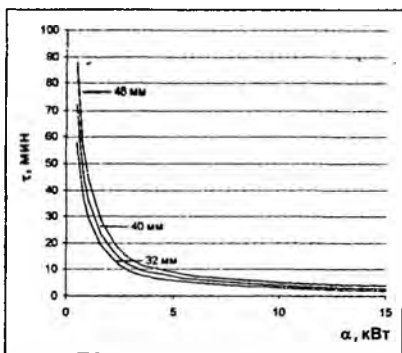


Рисунок 2. Зависимость времени плавления от условий теплообмена

Расчет удельной продолжительности каждого этапа процесса плавления показал, что при малой интенсивности теплообмена в общем времени t_ϕ преобладает доля предварительного нагрева, а при больших коэффициентах теплоотдачи α_k — преобладает доля непосредственного плавления.

Выводы: Предложена нелинейная математическая модель расчета времени плавления и температурных полей в процессе расплавления металла с учетом нелинейности теплофизических

свойств материала и переменности условий теплообмена, размеров и плотности лома и т.д. Разработан алгоритм решения представленной математической модели с помощью «метода эквивалентных источников».

Разработанная методика может быть использована для оценки времени плавления кускового лома, горячепрессованных брикетов в электродуговых печах, для разработки теплотехнологических режимов работы действующих печных агрегатов в зависимости от используемого материала, его размеров и плотности, для определения скорости подачи в печь металлургических окатышей и т.д.

Литература

1. Лыков, А. В. Методы решения нелинейных уравнений нестационарной теплопроводности / А. В. Лыков // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1971. – № 5. – С. 109–150.
2. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. школа, 1967. – 599 с.
3. Невский, А. С. Дифференциальные уравнения процесса плавления шихты со стеканием и намерзанием расплава / А. С. Невский // Сб. научн. тр. ВНИИМТ. – М.: Metallurgizdat, 1963. – № 3. – С. 150–157.
4. Постольник, Ю. С. Расчет динамики плавления тел различной формы / Ю. С. Постольник // Сб. научн. тр. МИСиС: Тепло- и массообмен в ваннах сталеплавильных агрегатов. – М.: Metallургия, 1979. – № 120. – С. 59–62.
5. Постольник, Ю. С. Металургійна термомеханіка / Ю. С. Постольник, А. П. Огурцов. – Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. – 633 с.
6. Тимошпольский, В. И. Теоретические основы теплофизики и термомеханики в металлургии / В. И. Тимошпольский, Ю. С. Постольник, Д. Н. Андрианов. – Мн.: Бел. навука, 2005. – 560 с.
7. Тимошпольский, В. И. Усовершенствование методик расчета процессов плавления материалов на основе метода мгновенного регулярного режима / В. И. Тимошпольский, В. М. Ольшанский, Н. П. Свинолобов // Известия вузов и энергетических объединений СНГ. – № 3 – С.49–56.
8. Глинков, М. А. Общая теория печей / М. А. Глинков, Г. М. Глинков. – М.: Metallургия, 1978. – 266 с.