

**Решение задачи затвердевания слитка в изложнице и
последующего нагрева металла с повышенным теплосодержанием
в ячейке нагревательного колодца**

Тимошпольский В.И., Кабишов С.М., Савань П.Н.
Белорусский национальный технический университет

В настоящее время на металлургических и машиностроительных предприятиях одной из наиболее актуальных проблем является уменьшение энергозатрат на производство металлопродукции.

Анализ технической литературы по данному вопросу показал, что для получения максимального эффекта в плане уменьшения топливopotребления при нагреве металла в нагревательных колодцах необходимо рассматривать всю технологическую цепочку получения металлопродукции «разливка и затвердевание стали в изложнице – транспортировка слитка (охлаждение на воздухе) – посад и нагрев в ячейке нагревательного колодца» [1-4].

Учитывая сказанное, была сформулирована математическая модель совмещенного процесса «затвердевание – охлаждение – нагрев слитков» [1]. Температурное поле в системе «слиток – изложница» для всего совмещенного технологического процесса можно описать единым дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности (1):

$$c_i(T)\rho_i(T)\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_i(T)\frac{\partial T_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_i(T)\frac{\partial T_i}{\partial y} \right], \quad (1)$$

где индексом $i = 1$ обозначены величины, относящиеся к слитку (в области $0 \leq x \leq b_x; 0 \leq y \leq b_y$); $i = 2$ – к изложнице (в области $b_x \leq x \leq dx; b_y \leq y \leq dy$) и, кроме того,

$$\rho_1 = \begin{cases} \rho_{\text{т}}(T) & \text{при } T_1 < T_{\text{сол}}, \\ \frac{\rho_{\text{т}} + \rho_{\text{ж}}}{2} & \text{при } T_{\text{сол}} < T_1 < T_{\text{лик}}, \\ \rho_{\text{ж}} & \text{при } T_1 > T_{\text{лик}}; \end{cases}$$

$$\lambda_1 = \begin{cases} \lambda_{\text{т}}(T) & \text{при } T_1 < T_{\text{сол}}, \\ \frac{\lambda_{\text{т}} + \lambda_{\text{ж}}}{2} & \text{при } T_{\text{сол}} < T_1 < T_{\text{лик}}, \\ \lambda_{\text{ж}} & \text{при } T_1 > T_{\text{лик}}; \end{cases} \quad (2)$$

$$c_1 = \begin{cases} c_T(T) & \text{при } T_1 < T_{\text{сол}}, \\ c_T - L \frac{d\psi}{dT} & \text{при } T_{\text{сол}} < T_1 < T_{\text{лик}}, \\ c_{\text{ж}} & \text{при } T_1 > T_{\text{лик}}, \end{cases}$$

где $\psi = (C_{\text{ж}} - C_0)/(C_{\text{ж}} - C_T)$; C_0 – исходная концентрация углерода в стали.

Принимая гипотезу о мгновенном заполнении изложницы расплавом; запишем краевые условия для уравнения

$$(1): T(x, y, 0) = \begin{cases} T_{1,0} & \text{для слитка,} \\ T_{2,0} & \text{для изложницы.} \end{cases} \quad (3)$$

На оси симметрии

$$-\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; \quad -\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0. \quad (4)$$

На границе слитка и изложницы имеется двухслойная контактная зона, состоящая из газового зазора $\delta_3 = \delta_3(t)$ и неметаллического слоя на внутренней поверхности изложницы δ_n . Учитывая данное обстоятельство, граничное условие для системы «слиток – изложница» запишем в виде:

$$\begin{aligned} -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x} &= (T_1 - T_n) \left(\frac{\lambda_3}{\delta_3} + \alpha_n \right) = (T_n - T_2) \frac{\lambda_n}{\delta_n} = -\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x}; \\ -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial y} &= (T_1 - T_n) \left(\frac{\lambda_3}{\delta_3} + \alpha_n \right) = (T_n - T_2) \frac{\lambda_n}{\delta_n} = -\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial y}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{где } \alpha_n = \sigma_3(T_1 + T_n)(T_1^2 + T_n^2); \quad T_n = \frac{T_2 \lambda_n / \delta_n + T_1 (\lambda_3 / \delta_3 + \alpha_n)}{\lambda_n / \delta_n + \lambda_3 / \delta_3 + \alpha_n}$$

– температура внутренней (рабочей) поверхности изложницы; λ_3, λ_n – теплопроводности газового зазора и неметаллического слоя соответственно, Вт/(м·К).

При условии идеального контакта между поверхностями слитка и изложницы имеем:

$$\begin{aligned} -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x} &= -\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x}; \\ -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial y} &= -\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial y}. \end{aligned} \quad (6)$$

Согласно рекомендациям В.А. Ефимова [5] величина зазора δ_3 определяется из условия:

$$\delta_3 = \varepsilon_{yc} - \varepsilon_{пл.д} + \varepsilon_{изл},$$

где $\varepsilon_{yc} = 0,5\alpha_1 \Delta T$ – усадка слитка; α_1 – линейный коэффициент усадки в области температур затвердевания, град⁻¹, $D = 2R$ – поперечный размер слитка, м; ΔT – разность температур между жидким ядром и поверхностью слитка, К; $\varepsilon_{пл.д}$ – пластическая деформация корки слитка:

$$\varepsilon_{пл.д} = (n/4)\rho g H D^3 / (K \sqrt{t}),$$

где β – коэффициент линейного расширения чугуна, град⁻¹; $R_{изл}$ – толщина стенки изложницы, м; ΔT – разность температур между начальной температурой изложницы и в момент времени t , К.

Момент образования газового зазора при появлении твердой корки, способной выдержать ферростатическое давление жидкого металла, задавался в соответствии с рекомендациями [3], согласно которым толщина твердой корки при пересчете на размер слитка должна составлять 0,15...0,17 $R_{сл}$.

На внешних поверхностях изложницы осуществляется конвективно-радиационный теплообмен:

$$\begin{aligned} -\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=d_x} &= \alpha_K^B (T_2 - T_c) + \sigma_B^B (T_2^4 - T_c^4), \\ -\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=d_y} &= \alpha_K^B (T_2 - T_c) + \sigma_B^B (T_2^4 - T_c^4), \end{aligned} \quad (7)$$

где T_c – температура окружающей среды, К; σ_B^B – видимый коэффициент излучения, Вт/(м²·К⁴); α_K^B – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К).

После (снятия изложницы) исходное уравнение теплопроводности (1) дополнится краевыми условиями, соответствующими охлаждению на воздухе и нагреву в печи:

$$\begin{aligned} -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \begin{cases} \alpha_K^B (T_1 - T_c) + \sigma_B^B (T_1^4 - T_c^4) & \text{– при охлаждении на воздухе;} \\ \alpha_K^{печ} (T_{печ} - T_1) + \sigma_B^{печ} (T_{печ}^4 - T_1^4) & \text{– при нагреве в печи;} \end{cases} \\ -\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial y} &= \begin{cases} \alpha_K^B (T_1 - T_c) + \sigma_B^B (T_1^4 - T_c^4) & \text{– при охлаждении на воздухе;} \\ \alpha_K^{печ} (T_{печ} - T_1) + \sigma_B^{печ} (T_{печ}^4 - T_1^4) & \text{– при нагреве в печи;} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

где $T_{печ} = T_{печ}(t)$ – температура рабочего пространства, К; α_K^B , $\alpha_K^{печ}$

– коэффициент теплообмена конвекцией при охлаждении на воздухе и нагреве в печи соответственно, Вт/(м²·К); $\sigma_{\text{в}}^{\text{в}}$, $\sigma_{\text{в}}^{\text{печ}}$ – коэффициент лучистого теплообмена при охлаждении на воздухе и нагреве в печи соответственно, Вт/(м²·К).

Коэффициенты внешнего теплообмена α и σ при нагреве слитка в ячейке нагревательного колодца рассчитывались по методике, приведенной в работе [10].

Параметрическая идентификация математической модели, осуществленная по данным промышленного эксперимента, проведенного в условиях Днепровского металлургического комбината им. Дзержинского для слитка осевой стали поперечным сечением 0,736×0,655 м, массой 8 т, сталь 45) [2], показала, что максимальная погрешность расчетов составляет 3...4 %.

С использованием разработанной математической модели были проведены многовариантные расчеты, в результате которых разработаны новые теплотехнологические режимы совмещенного процесса для слитков массой 9,45, 10,55 и 13,9 т. Согласно расчетам тепловых балансов внедрение разработанных режимов позволит снизить удельный расход условного топлива на 1...5 кг у.т/т (в зависимости от количества жидкой сердцевины в момент посадки и типоразмера слитка).

Литература

1. Промышленные теплотехнологии. Моделирование нелинейных процессов. Учеб. Ч.5. / В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, А.П. Несенчук, С.С. Бродский, О.В. Дубина, И.А. Павлюченков. - Мн.: Выш. школа, 2000
2. Совершенствование режимов нагрева слитков в регенеративных колодцах блюминга 1150 / Л.А. Анисимов, В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова и др. // Сталь.–1999. № 7.
3. Закономерности нагрева слитков горячего посада. И.С. Тимошпольский, В.И. Тимошпольский, Б.Ф. Шендрик и др. // Сталь. – 1989. – № 9. С. 97-100.
4. В.И. Тимошпольский, Ю.А. Самойлович, И.А. Трусова. Научное издание «Стальной слиток»/Т 3. Нагрев. / Мн., 2001.
5. Ефимов, В.А. Разливка и кристаллизация стали. М.: Металлургия, 1976.