

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 ΔT_r , металла ΔT и расходу топлива Δv .

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, м³/ч; t_k — конечное время выдержки,

ч; A_1, A_2, A_3, μ — константы, характеризующие динамику процесса нагрева металла; α, β, γ — весовые коэффициенты, большие нуля.

Для решения полученной задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов (1)–(3) рассмотрим вспомогательное квазилинейное дифференциальное уравнение в частных производных

$$\frac{\partial S(x,t)}{\partial t} + \left(\frac{\partial S(x,t)}{\partial x}, Ax + Bu \right) = x^T Px + u^T Qu \quad (4)$$

с начальным условием

$$S(x, 0) = 0. \quad (5)$$

Решение системы (4), (5) производим при

$$u = \frac{1}{2} (Q^{-1})^T B^T \left(\frac{\partial S(x,t)}{\partial x} \right)^T. \quad (6)$$

После подстановки (6) в (4) получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial S(x,t)}{\partial t} + \left(\frac{\partial S(x,t)}{\partial x}, Ax + \frac{1}{2} W \left(\frac{\partial S(x,t)}{\partial x} \right)^T \right) = \\ = x^T Px + \frac{1}{4} \frac{\partial S(x,t)}{\partial x} W \left(\frac{\partial S(x,t)}{\partial x} \right)^T, \end{aligned} \quad (7)$$

где $W = B(Q^{-1})^T B^T$.

Таким образом, имеем задачу Коши для нелинейного уравнения с частными производными первого порядка (7), (5). Решим данную задачу методом характеристик [3]. На основании характеристической системы составляем уравнение

$$\begin{pmatrix} \frac{dx}{dv} \\ \left(\frac{dR}{dv} \right)^T \end{pmatrix} = \Lambda \begin{pmatrix} x \\ R^T \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $R_0 = \frac{\partial S}{\partial t}$, $R = \frac{\partial S}{\partial x}$, $\Lambda = \begin{pmatrix} A & \frac{1}{2} W \\ P + P^T & -A^T \end{pmatrix}$.

Решение уравнения (8) записывается в виде

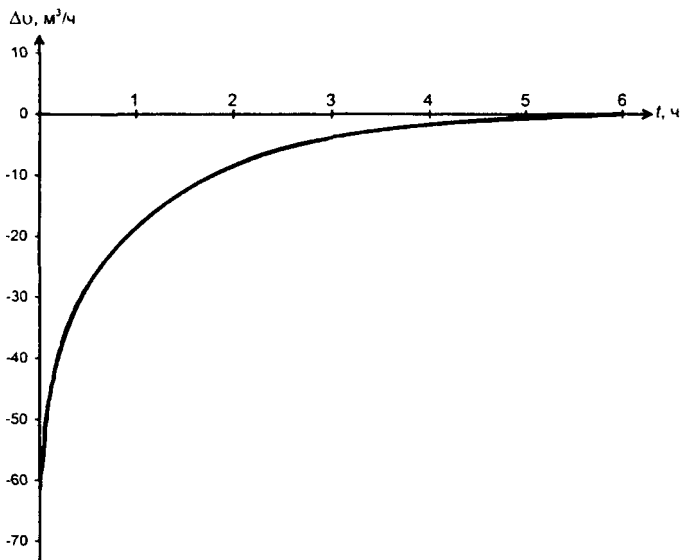


Рис. 1. Отклонение реального расхода топлива от желаемого

$$\begin{pmatrix} x \\ R^T \end{pmatrix} = e^{\Lambda v} \begin{pmatrix} \tau \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_1(v) & \varphi_3(v) \\ \varphi_2(v) & \varphi_4(v) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Из (9) легко видеть, что

$$\frac{\partial S(x, t)}{\partial x} = x^T \left(\varphi_1(t)^{-1} \right)^T \varphi_2(t)^T. \quad (10)$$

Тогда, исходя из (6), получим, что

$$u = \frac{1}{2} \left(Q^{-1} \right)^T B^T \varphi_2(t) \varphi_1(t)^{-1} x. \quad (11)$$

Подстановка (11) в исходную систему (1)—(2) и ее решение относительно x позволяют получить оптимальную траекторию $x^*(t)$, что в свою очередь дает возможность определить искомое программное управление $u^*(t)$.

Для реализации предложенной методики было разработано программное обеспечение в среде Borland Delphi 4.0.

В качестве исходных данных принимались следующие значения: начальные отклонения температур печи и металла соответственно — $\Delta T_{r0} = 30$ °С, $\Delta T_0 = 60$ °С, температура выдержки печи

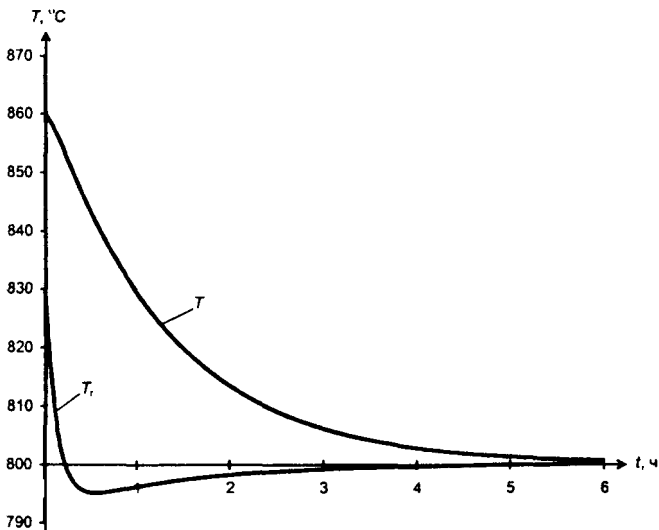


Рис. 2. Изменение температуры металла и греющей среды

$800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $A_1 = 6,11\text{ ч}^{-1}$, $A_2 = 0,638\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}^3$, $A_3 = 3,45\text{ ч}^{-1}$, $\mu = 0,69\text{ ч}^{-1}$, $\alpha = \beta = \gamma = 1$, $t_{\text{к}} = 6\text{ ч}$.

Отклонение реального расхода топлива при оптимальном процессе нагрева от желаемого при заданной температуре выдержки металла, график оптимального режима работы печи представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Таким образом, получен алгоритм решения задачи минимизации отклонения температуры от заданной. Разработано программное обеспечение, позволяющее получить оптимальное отклонение расхода газа и оптимальное изменение температуры печи и металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лисиенко В. Г., Ковалевский В. Б., Хо Жуйтиюань. Оптимальный нагрев металла в камерных печах с минимальным расходом газа // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1994. — № 12. — С. 40—42.
2. Ковалевский В. Б., Козлов С. М. Минимизация рассогласования при выдержке металла в камерных печах // Инженерно-физический журнал. — 1999. — № 5. — С. 980—982.
3. Смирнов В. И. Курс высшей математики. — М.: Наука, 1981. — 624 с.