

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 669.041

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, докт. техн. наук (БГПА),
В. В. ФИЛИППОВ (БМЗ),
С. М. КОЗЛОВ, канд. техн. наук,
И. А. ТРУСОВА, канд. техн. наук,
Н. Л. МАНДЕЛЬ, канд. техн. наук (БГПА)

УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ НАГРЕВА КОРДОВОЙ ПРОВОЛОКИ В ПЕЧИ ПАТЕНТИРОВАНИЯ

Печи патентирования предназначены для рекристаллизации и снятия внутренних напряжений быстрым кратковременным нагревом проволоки после волочения и дальнейшего ее смягчения в результате охлаждения в свинцовой ванне. Технические характеристики печи патентирования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики печи патентирования

Характеристика	Значение
Длина печи, м	26
Внутренняя ширина, м	1
Количество зон, шт.	5
Количество горелок, шт.	35
Топливо	Природный газ
Температура проволоки на входе, °С	20
Температура проволоки на выходе, °С	950±20
Диаметр проволоки, мм	2,40—3,15

Руководствуясь схемой определения массивности тел [1] и учитывая то, что температурным перепадом по сечению нагреваемого образца можно пренебречь, исследуемую проволоку необходимо отнести к термически тонким телам:

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} = 0,003 < 0,1 ; Sk = \frac{\sigma T_{\text{печ}}^3 R}{\lambda} = 0,005 < 0,15 ,$$

где α и σ — коэффициенты теплообмена конвекцией и излучением соответственно; R — радиус заготовки; λ — коэффициент теплопроводности; $T_{\text{печ}}$ — температура печи.

Поэтому процесс нагрева при лучисто-конвективном теплообмене может быть описан дифференциальным уравнением с сосредоточенными параметрами, представляющим собой уравнение элементарного теплового баланса

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Fq}{Mc} \quad (1)$$

с начальным условием

$$T(0) = T_0 , \quad (2)$$

где F — площадь тепловоспринимающей поверхности; q — удельный тепловой поток; M — масса нагреваемого тела.

Поскольку $F = 2\pi Rl$, $M = \pi R^2 l \rho$, $q = \alpha(T_{\text{печ}} - T) + \sigma(T_{\text{печ}}^4 - T^4)$, уравнение (1) можно записать в виде

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2}{R\rho c} [\alpha(T_{\text{печ}} - T) + \sigma(T_{\text{печ}}^4 - T^4)] . \quad (3)$$

Решить систему (3), (2) в общем виде с переменными теплофизическими величинами возможно лишь численными методами. Для оценки точности численного решения введем безразмерные величины $\theta = \frac{T}{T_{\text{печ}}}$, $Fo = \frac{\lambda t}{c\rho R^2}$.

Получим

$$\frac{d\theta}{dFo} = 2[Bi(1 - \theta) + Sk(1 - \theta^4)] . \quad (4)$$

При постоянных значениях теплофизических коэффициентов ρ , c , λ и нагреве тонких тел исключительно конвекцией ($Sk = 0$) задача нагрева проволоки имеет решение, полученное Г. П. Иванцовым [2]:

$$2Bi\Delta Fo = \ln \frac{1-\theta_1}{1-\theta_2} , \Delta Fo = Fo_2 - Fo_1 . \quad (5)$$

В случае нагрева только излучением, т. е. $Bi = 0$, получается известное решение Старка [3]:

$$2Sk\Delta Fo = \Delta\Phi , \Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 , \Phi_i = \frac{1}{4} \ln \frac{1+\theta_i}{1-\theta_i} + \frac{1}{2} \arctg \theta_i , i = \overline{1, 2} . \quad (6)$$

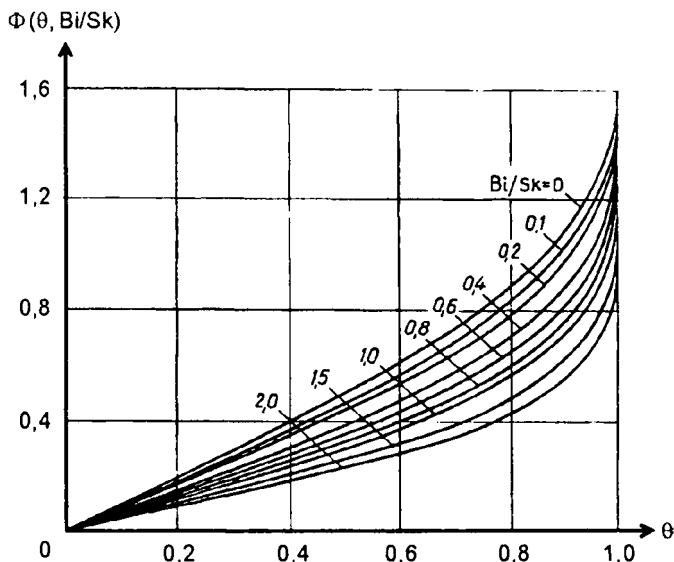


Рис. 1. Графики для определения функций Φ

Наконец, решение задачи о нагреве термически тонкого тела одновременно излучением и конвекцией имеет вид [4]

$$2Sk(Fo_2 - Fo_1) = \Phi_2 - \Phi_1, \quad (7)$$

где функции $\Phi = \Phi(\theta, Bi/Sk)$ определяются по графикам (рис. 1).

На рис. 2 показаны сравнительные результаты частных случаев численного решения уравнения (4) и аналитических решений (5)—(7). Среднее отклонение приближенного решения от точного составляет около 5 %, что можно считать вполне удовлетворительным. Для проверки адекватности приведенной методики реальным условиям и уточнения параметров внешнего теплообмена перед проведением дальнейших расчетов осуществлялась идентификация на основе экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях [4]. Результаты идентификации также показали удовлетворительную сходимость расчетной и экспериментальной температур.

Таким образом, следует отметить, что предложенная математическая модель описывает исследуемый процесс нагрева с достаточной точностью.

Дальнейшим этапом исследований явилась разработка технологии нагрева в печи патентирования, соответствующей требуемой динамике температуры металла.

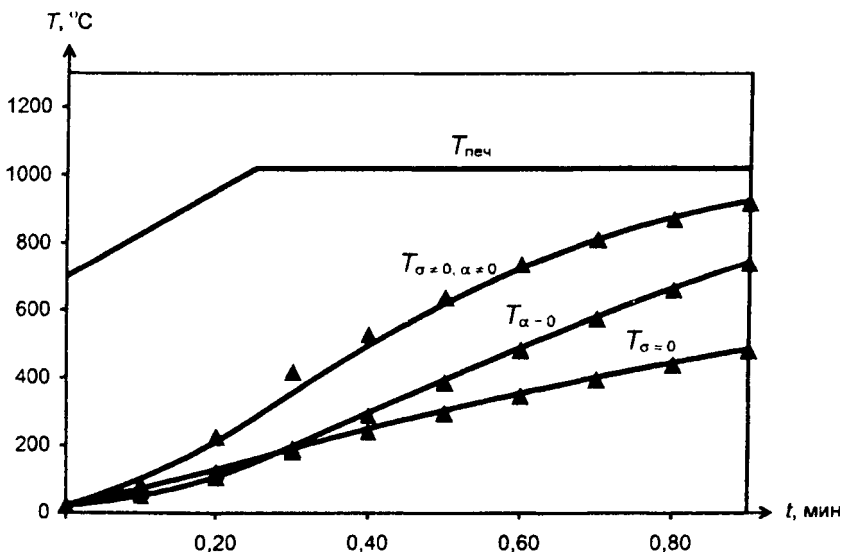


Рис. 2. Изменение температуры проволоки в процессе нагрева:
 — — численное решение; ▲▲▲ — точное решение

Из нелинейного уравнения (3) определить аналитически величину температуры печи в некоторый произвольный момент времени не представляется возможным. Поэтому приходится решать поставленную задачу численным методом. Обозначим

$$F(T_{\text{печ}}) = \frac{2}{R\rho c} [\alpha(T_{\text{печ}} - T) + \sigma(T_{\text{печ}}^4 - T^4)] - \frac{dT}{dt} = 0. \quad (8)$$

Тогда

$$F'(T_{\text{печ}}) = \frac{2}{R\rho c} [\alpha + 4\sigma T_{\text{печ}}^3].$$

Для определения корня трансцендентного уравнения (8) предлагается использовать метод Ньютона (касательных), обладающий высокой сходимостью. Как правило, абсолютная точность решения достигается уже через 5—6 итераций. В соответствии с алгоритмом Ньютона процесс определения температуры печи патентирования записывается итерационной формулой

$$T_{\text{печ}}^{(i+1)} = T_{\text{печ}}^{(i)} - F(T_{\text{печ}}^{(i)}) / F'(T_{\text{печ}}^{(i)}).$$

В качестве начального приближения $T_{\text{печ}}^{(0)}$ можно брать температуру металла в заданный момент времени. Заменяя производную dT/dt конечно-разностным отношением $\frac{T(t+\Delta t)-T(t)}{\Delta t}$, окончательно имеем

$$T_{\text{печ}}^{(i+1)}(t) = T_{\text{печ}}^{(i)}(t) - \frac{\frac{2}{R_{\text{PC}}}[\alpha(T_{\text{печ}}^{(i)}(t)-T(t)) + \sigma((T_{\text{печ}}^{(i)}(t))^4 - T(t)^4)] - \frac{T(t+\Delta t)-T(t)}{\Delta t}}{\frac{2}{R_{\text{PC}}}[\alpha + 4\sigma T_{\text{печ}}^3]},$$

$$T_{\text{печ}}^{(0)}(t) = T(t).$$

Процесс вычисления заканчивается, когда достигается выполнение условия

$$\left| T_{\text{печ}}^{(i+1)}(t) - T_{\text{печ}}^{(i)}(t) \right| \leq \varepsilon,$$

где ε — требуемая погрешность расчета.

Предложенная методика определения температуры печи может использоваться для разработки новых теплотехнологий и технологических режимов нагрева проволоки в печи патентирования.

Определить величину расхода топлива при нагреве проволоки, необходимую для поддержания требуемой температуры печи патентирования, можно следующим образом.

Будем считать, что количество теплоты, поступающей в нагревательную печь за некоторый достаточно малый период времени Δt , складывается из теплоты Q_{T} , выделившейся от сжигания топлива за этот период времени, и теплоты экзотермических реакций $Q_{\text{ЭКЗ}}$:

$$Q_{\text{T}} = Q_{\text{H}}^{\text{P}} B(t) \Delta t; \quad (9)$$

$$Q_{\text{ЭКЗ}} = \frac{\delta G}{100} 5652,18 \Delta t, \quad (10)$$

где Q_{H}^{P} — низшая теплота сгорания топлива; $B(t)$ — мгновенный расход топлива, соответствующий началу рассматриваемого интервала времени Δt ; G — производительность печи; δ — угар металла.

С учетом КПД печи патентирования η тепловой поток, усвоенный поверхностью нагреваемой проволоки,

$$qF = \eta (Q_{\text{T}} + Q_{\text{ЭКЗ}}). \quad (11)$$

Средняя температура металла за этот же период времени изменилась на ΔT .

Подставляя (9), (10) в (11) и переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, после некоторых преобразований получим

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\eta}{Mc} \left(Q_n^p B(t) + \frac{G\delta}{100} 5652,18 \right). \quad (12)$$

Уравнение (12) может использоваться как для определения мгновенного расхода топлива по известной динамике изменения температуры металла, рассчитанной на основе математической модели (1), (2) по заданному температурному режиму работы печи, так и для вычисления температуры проволоки по заданному мгновенному расходу топлива.

Суммарный расход топлива B за весь период нагрева t_k определяется выражением

$$B_{\Sigma} = \int_0^{t_k} B(t) dt.$$

На рис. 3 показана динамика температуры нагреваемой проволоки, представлены графики изменения мгновенного расхода топлива и технологический режим работы печи патентирования Белорусского металлургического завода, рассчитанные, согласно описанным методикам на основе уравнений (3), (12), при следующих исходных данных: сталь — 70К; $\alpha = 52 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; $\sigma = 6,5 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}^4)$; $T_0 = 20 \text{ °C}$; $R = 1,575 \text{ мм}$; $l = 21,4 \text{ м}$; $\rho = 7800 \text{ кг}/\text{м}^3$; $Q_n^p = 34,1 \text{ МДж}/\text{м}^3$; $v = 23,78 \text{ м}/\text{мин}$; $n = 22$; $\delta = 0,33 \%$; $t_k = 54 \text{ с}$; $\eta = 37,7 \%$.

Переменный характер коэффициента теплоемкости металла с учитывался с помощью эмпирической формулы, предложенной В. А. Маковским [5]:

$$c(T) = 4,186 \left[c_0 + c_1 \left(\frac{T}{1000} \right)^n + c_2 \exp(-c_3 |T - T_{c_0}|) \right],$$

$c_0 = 0,115$; $c_1 = 0,0477$; $c_2 = 0,194$; $c_3 = 0,0099/0,0261$; $n = 1$; $T_{c_0} = 768 \text{ °C}$.

Часовой расход топлива печи патентирования составил $90,4 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Предложенная в данной работе методика определения топливопотребления может использоваться теплотехническими службами для анализа влияния технологических параметров нагрева про-

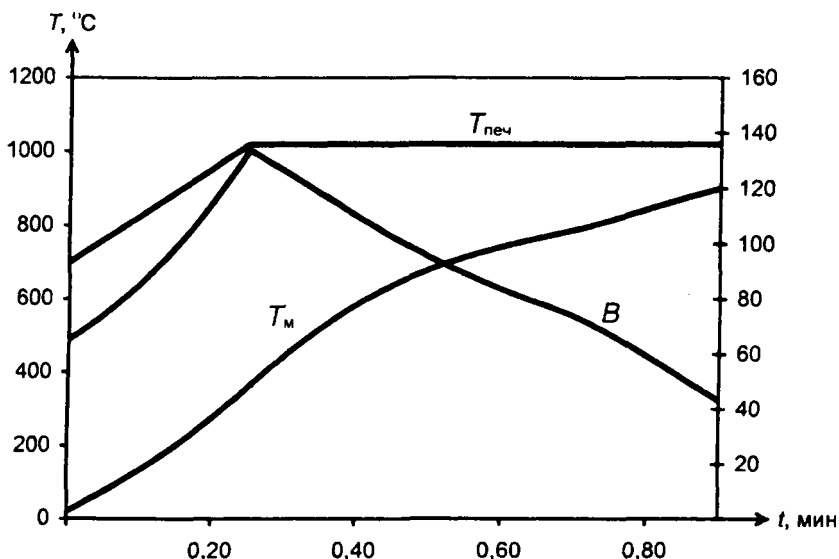


Рис. 3. Изменение температуры проволоки T_m и мгновенного расхода топлива V при нагреве проволоки $\varnothing 3,15$ м

волоки в печах патентирования БМЗ на величину расхода природного газа с целью его дальнейшей минимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. Б. Стеблов, И. А. Павлюченков. — Мн.: Выш. шк., 1992. — 217 с.
2. Иванцов Г. П. Нагрев металла. — М.: Metallurgizdat, 1948.
3. Старк Б. В. Явление нагрева в муфельных печах // ЖРМО. — 1926. — № 2.
4. Самойлович Ю. А., Тимошпольский В. И., Филиппов В. В., Козлов С. М., Хопова О. Г. Расчет процесса нагрева проволоки в печах патентирования // Литье и металлургия. — 2000. — № 1. — С. 51—52.
5. Маковский В. А. Эмпирические формулы для выражения температурной зависимости теплофизических свойств стали // Сталь. — 1972. — № 1. — С. 87—89.