



Ю. А. САМОЙЛОВИЧ,  
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ,  
В. В. ФИЛИППОВ, С. М. КОЗЛОВ,  
О. Г. ХОПОВА, БГПА, БМЗ

## РАСЧЕТ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ПРОВОЛОКИ В ПЕЧАХ ПАТЕНТИРОВАНИЯ

УДК 669.041

В работе приведен анализ решения нагрева проволоки в печах патентирования Белорусского металлургического завода. Печи патентирования предназначены для восстановления проволоки диаметром 2,40—3,15 мм после грубого волочения путем рекристаллизации и снятия внутренних напряжений быстрым кратковременным нагревом в нагревательной печи и дальнейшим смягчением проволоки путем охлаждения в свинцовой ванне. Техническая характеристика печей патентирования приведена ниже.

Длина печи, м	26
Внутренняя ширина, м	1
Количество зон, шт.	5
Количество горелок, шт.	35
Топливо	Природный газ
Температура проволоки, °С:	
на входе	20
на выходе	950±20
Диаметр проволоки, мм	2,4; 2,8; 3,15

При решении задач нагрева термически тонких тел (проволоки) авторами использован приближенный метод расчета, основанный на уравнении тепловых балансов.

Поскольку для термически тонкого тела перепадом температуры по сечению можно пренебречь, запишем уравнение теплового баланса для цилиндра в виде

$$2[\sigma_v(T_{печ}^4 - T^4) + \alpha_k(T_{печ} - T)] d\tau = R\rho c dT, \quad (1)$$

где  $\sigma_v, \alpha_k$  — коэффициенты теплообмена излучением и конвекцией;  $T_{печ}, T$  — соответственно температура печи и средняя по сечению тонкого тела;  $R$  — характерный размер заготовки (проволоки);  $c, \rho$  — теплоемкость и плотность металла.

После несложных преобразований запишем уравнение (1) в безразмерной форме

$$2SkdFo = \frac{d\theta}{\left(1 + \frac{Bi}{Sk}\right) - \frac{Bi}{Sk}\theta - \theta^4}, \quad (2)$$

где  $\theta = \frac{T}{T_{печ}}$  — безразмерная температура;  $Fo = \frac{a\tau}{R^2}$  —

критерий Фурье;  $Bi = \frac{\alpha_k R}{\lambda}$ ,  $Sk = \frac{\delta_v T_{печ}^3 R}{\lambda}$  — соответственно критерии Био и Старка.

The article gives analytical solution to the heating of thermally thin body under conditions of the radiant convective heat exchange based on the heat balance method.

Проинтегрировав выражение (2) по  $Fo$  и  $\theta$ , получим

$$2Sk(Fo_2 - Fo_1) = - \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{\theta^4 + \frac{Bi}{Sk}\theta - \left(1 - \frac{Bi}{Sk}\right)}. \quad (3)$$

Опуская промежуточные математические выкладки, имеем

$$\int \frac{d\theta}{\theta^4 - \frac{Bi}{Sk}\theta - \left(1 + \frac{Bi}{Sk}\right)} = - \left( M \ln \frac{\theta^2 + a_2\theta + b_2}{-\theta^2 - a_1\theta - b_1} + N \ln \frac{\theta - b_1}{1 - \theta} + L \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{2\theta + a_2}{\sqrt{L_0 + L_1}} \right) + \text{const} = -\Phi\left(\theta, \frac{Bi}{Sk}\right) + \text{const},$$

где

$$M = \frac{A}{2} = \frac{\sqrt{2\alpha_0}}{\alpha_1^2 + 8\alpha_0^2};$$

$$N = \frac{2B - Aa_1}{2(1 - b_1)} = \frac{\alpha_1 + 2\alpha_0}{\left(1 - \alpha_0 + \frac{\alpha_1}{2}\right)(\alpha_1^2 + 8\alpha_0^2)};$$

$$L = \frac{Aa_1 - 2D}{2K_2} = \frac{\alpha_1 - 2\alpha_0}{K_2(\alpha_1^2 + 8\alpha_0^2)}.$$

Параметры  $\alpha_0, \alpha_1, a_1, a_2, b_1, b_2, M, N, L$  являются однозначными функциями отношения критериев  $Bi/Sk$  и представлены в таблице в пределах изменения  $Bi/Sk$  от 0 до 2.

Зависимость параметров  $\alpha_0, \alpha_1, a_1, a_2, b_1, b_2, M, N, L$  от отношения критериев  $Bi/Sk$

$Bi/Sk$	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$a_1 = a_2$	$b_1$	$b_2$	$M$	$N$	$L$
0	0	2	0	-1	1	0	0,25	0,5
0,1	0,00114	2,09703	0,04769	-1,04738	1,04965	0,01084	0,23317	0,46507
0,2	0,00417	2,19001	0,09132	-1,09083	1,09917	0,01904	0,21921	0,43427
0,4	0,01428	2,3669	0,16900	-1,16917	1,19773	0,03016	0,19706	0,38242
0,6	0,02812	2,53027	0,23713	-1,23702	1,29324	0,03700	0,18042	0,34133
0,8	0,04439	2,68492	0,29796	-1,29807	1,38685	0,04124	0,16706	0,30761
1,0	0,06237	2,83137	0,35319	-1,35332	1,47805	0,04389	0,15608	0,27960
1,6	0,11193	3,17032	0,47314	-1,47323	1,69709	0,04661	0,13519	0,22658
2,0	0,16512	3,48032	0,57466	-1,57505	1,90528	0,04660	0,12001	0,18922

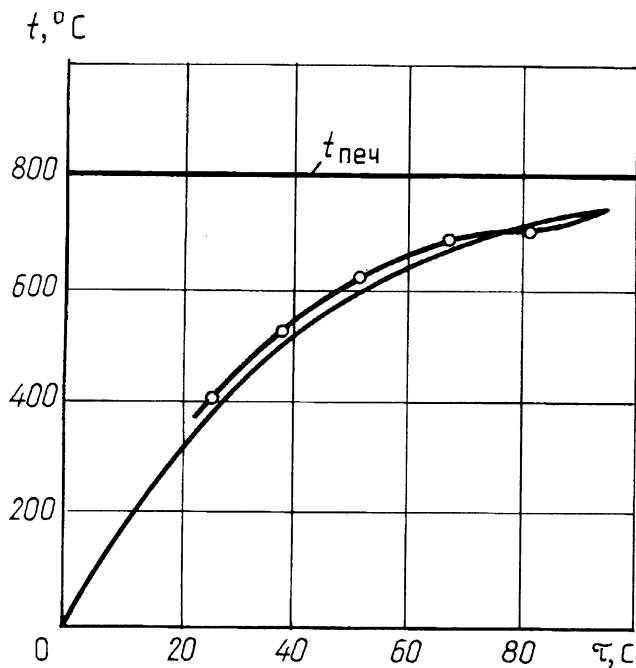


Рис. 1. Изменение средней температуры проволоки диаметром 5,5 мм при нагреве в камерной печи: — — расчет; —○— эксперимент

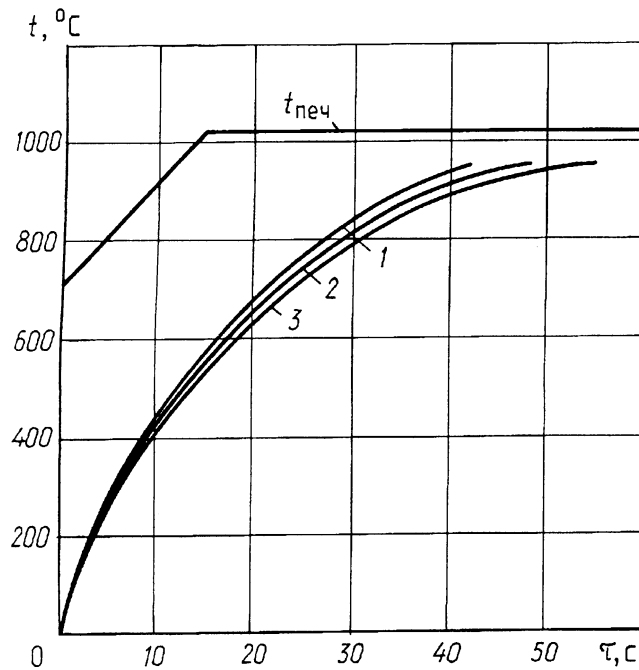


Рис. 2. Динамика средней температуры проволоки при нагреве в печи патентирования

Решение задачи о нагреве термически тонких тел одновременно излучением и конвекцией принимает вид

$$KSk(Fo_2 - Fo_1) = \Phi_2 - \Phi_1, \quad (4)$$

Функции  $\Phi = \Phi(\theta, Bi/Sk)$  в зависимости от  $\theta$  и  $Bi/Sk$  определяются из графиков.

Проанализируем полученное решение (4). В частном случае нагрева тонких тел только излучением ( $Bi = 0$ ):

$$\alpha_0 \rightarrow 0, \alpha_1 \rightarrow 2, b_1 \rightarrow -1, a_1 \rightarrow 0,$$

$$M \rightarrow 0, N \rightarrow \frac{1}{4}, L \rightarrow -\frac{1}{2}$$

и функция  $\Phi$  принимает вид:

$$\Phi = \psi = \frac{1}{4} \ln \frac{1+\theta}{1-\theta} + \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \theta,$$

т. е. получается известное решение Старка [1].

В другом частном случае при нагреве тонких тел только конвекцией ( $Sk = 0$ ) следует умножить обе части уравнения (3) на  $p = Bi/Sk$  и рассмотреть интеграл

$$p \int \frac{d\theta}{\theta^4 + p\theta + q} = \int \frac{d(1-\theta)}{(1-\theta) + \frac{1}{p} - \frac{\theta^4}{p}},$$

который при  $p \rightarrow \infty$  равен  $\ln(1-\theta) + \text{const}$ . Данное решение совпадает с известным решением, полученным Г. П. Иванцовым [2]:

$$K Bi(Fo_2 - Fo_1) = \ln \frac{1-\theta_1}{1-\theta_2}.$$

Для проверки адекватности приведенной методики реальным условиям и уточнения параметров внешнего теплообмена на первом этапе осуществляли идентификацию на основе экспериментальных данных, проведенных в лабораторных условиях. Проволоку диаметром 5,5 мм из высокоуглеродистой стали нагревали в печи камерного типа размером внутреннего пространства 814×470×400 мм и радиусом закругления верхнего свода 814 мм. Температуру поверхности кладки фиксировали с помощью хромель-алюмелевых термопар, температуру поверхности заготовки — вольфрам-рениевой термопарой. Температура рабочего пространства печи в процессе эксперимента составляла 800 °С. Результаты сравнения расчетной средней температуры проволоки и экспериментальных данных приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что сходимость расчетной и экспериментальной температур удовлетворительная.

На втором этапе проводили расчет изменения средней температуры для трех характерных размеров проволоки диаметром 3,15; 2,8; 2,4 мм при нагреве в печи патентирования БМЗ по существующему температурному режиму (рис. 2). Из рисунка следует, что время нагрева составляет 45—65 с (в зависимости от диаметра проволоки), а средняя температура проволоки к концу нагрева — 910—920 °С, что соответствует требованиям технологической инструкции.

Таким образом, полученное решение нагрева термически тонких тел может быть использовано для анализа технологии нагрева проволоки в печах патентирования БМЗ с целью определения скорости проволоки, продолжительности нагрева в зависимости от исходного диаметра проволоки, марки стали, температурного режима печей и т. д.

## Литература

1. Старк Б. В. Явление нагрева в муфельных печах // ЖРМО. 1926. № 2.
2. Иванцов Г. П. Нагрев металла. М.: Металлургия, 1948.