МЕТАЛЛУРГИЯ

It is shown that according to the results of industrial experiment and offered algorithm the real values of parameters α, σ for the model of metal heating in hardening furmace is shown.

В. Б. КОВАЛЕВСКИЙ, М. РАДЖУХ, БНТУ

УДК 621.783.231

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПЕЧИ

При прогнозировании распределения температурных полей в заготовках при нагреве в закалочной печи кузнечного цеха Минского автомобильного завода возникает задача определения (идентификации) значений коэффициентов теплообмена. В данной статье предлагается решать задачу идентификации математической модели на основе методов математического программирования и экспериментальных исследований.

Рассмотрим решение поставленного вопроса на примере нагрева призмы прямоугольного сечения. Согласно [1], процесс нагрева металла посредством радиации и конвекции опишем дифференциальным уравнением с граничными и начальными условиями:

$$\rho C(T)\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right], \qquad (1)$$

$$0 \le x \le R_1,\ 0 \le y \le R_2,\ 0 \le t \le t_k,$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T(x,R_2,t)}{\partial y}=\alpha(T_{\text{пч}}(t)-T(x,R_2,t))+ \sigma(T_{\text{пч}}^4(t)-T^4(x,R_2,t)), \qquad (2)$$

$$\frac{\partial T(0,y,t)}{\partial x}=0,$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T(x,R_2,t)}{\partial y}=\alpha(T_{\text{пч}}(t)-T(x,R_2,t))+ \sigma(T_{\text{пч}}^4(t)-T^4(x,R_2,t)), \qquad (3)$$

$$\frac{\partial T(x,0,t)}{\partial y}=0,$$

$$T(x,y,0)=T_0, \qquad (4)$$

где t – текущее время, ч; t_k – время окончания процесса нагрева, ч; R_1, R_2 – половина длины и ширины узкой грани призмы, м; x, y – текущие координаты узкой грани призмы, отсчитываемые от центра, м; $T_{\text{пч}}(t)$ – температура печи в момент времени t, °С; α – коэффициент теплообмена конвекцией, Вт/(м^2·°С); σ – коэффициент теплообмена радиацией, Вт/(м^2·°С^4); $\lambda(T)$ – теплопроводность, Дж/(м·ч·°С); $C(T)$ – теплоемкость, Дж/(кг·°С); ρ – плотность материала, кг/м^3; T_0 – начальное равномерное распределение температуры в призме, °С; $T(x, y, t)$ – температура в точке (x, y) в момент времени t, °С.

Задача идентификации математической модели процесса нагрева заключается в подборе таких значений α и σ, при которых значения температур металла и печи, полученные из уравнения (1) с начальными и граничными условиями (2)–(4), наименее отличаются от значений, полученных экспериментальным путем. За меру отклонения данных параметров примем величину

$$\delta=\int_0^{t_n}\sum_{i=0}^{K}(T(x_i,y_i,t)-T_э(x_i,y_i,t))^2dt, \qquad (5)$$

где t_n – время идентификации, ч; x_i, y_i – координаты точки заготовки, в которой определяли значения температур, м; K – количество экспериментальных точек; $T_э(x_i, y_i, t)$, $T(x_i, y_i, t)$ – температура в точке (x_i, y_i) заготовки, полученная опытным и расчетным путем, °С.

Предположим, что ошибки измерения значений $T_э(x, y, t)$ и температуры печи достаточно малы, ими можно пренебречь и они могут быть получены в любой момент времени.

На Минском автомобильном заводе был проведен промышленный эксперимент, результаты которого приведены на рис. 1.

При проведении эксперимента температуры в контрольных точках сечения опытной заготовки

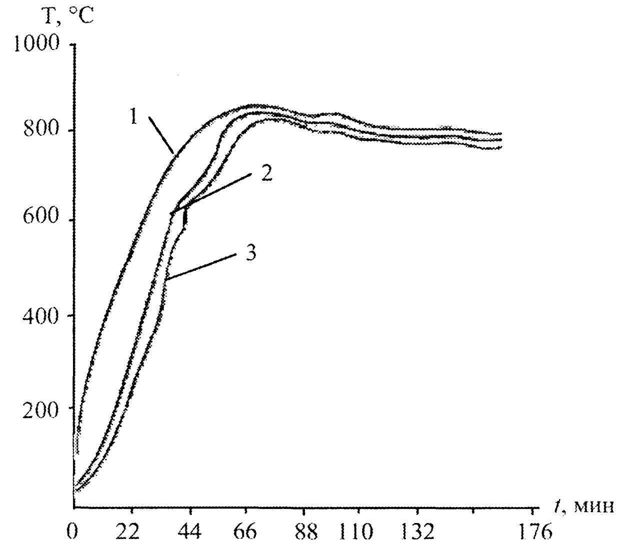

Рис. 1. Результаты промышленного эксперимента: *1–3* соответственно температура печи, поверхности заготовки, центра заготовки, °С

(поверхность, центр) определяли с помощью гибких термопар типа ХА с диаметром электродов 1,2 мм [2]. Для установки термопар в контрольных внутренних точках опытной заготовки высверливали отверстия. В них вставляли термоэлектроды, горячий спай которых надежно зачеканивали. После этого электроды защищали термическими изоляторами, оставшиеся полости заполняли огнеупорной обмазкой. Для защиты электродов от воздействия печных газов жгут (а также отдельные электроды в месте их выхода из опытной заготовки) обматывали слоем каолиновой ваты, что позволило проводить надежные измерения температур в заготовке по мере продвижения ее в печи к окну выдачи.

Таким образом, нам известны $T_э(0, 0, t)$, $T_э(0, R_2, t)$, $T_{пч}(t)$, $0 \le t \le t_n$.

Для определения наилучших значений считаем, что мера отклонения δ (см. выражение (5)) является функцией переменных α и σ:

$$\delta = \delta(\alpha, \sigma).$$

Понятно также, что действительные параметры α, σ могут изменяться лишь в конечных интервалах. Поэтому имеем ограничения

$$\alpha_1 \le \alpha \le \alpha_2,\ \sigma_1 \le \sigma \le \sigma_2, \qquad (6)$$

где нижние и верхние границы интервалов определяются из имеющегося опыта эксплуатации такого типа печей.

Для того чтобы решить задачу идентификации математической модели (1)–(4), необходимо найти такие значения параметров $\alpha = \alpha^*$, $\sigma = \sigma^*$, которые удовлетворяют ограничениям (6) и условию $\delta(\alpha, \sigma) \ge \delta(\alpha^*, \sigma^*)$ для любых допустимых значений α, σ.

Таким образом, нами получена задача условной минимизации функции двух переменных. Для ее решения использован метод координатного спуска. Аппроксимацию температуры печи проводили кубическим сплайном. Температурную задачу решали методом сеток.

При использовании разработанного математического и программного обеспечения были получены следующие значения коэффициентов: $\alpha^* = 25{,}7$ Вт/(м$^2\cdot$°С); $\sigma^* = 3{,}1\cdot10^{-8}$ Вт/(м$^2\cdot$°С).

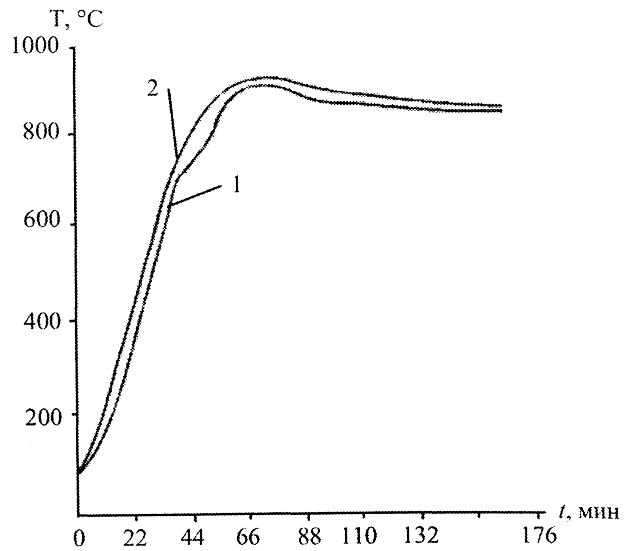

Рис. 2. Результаты идентификации математической модели (поверхность заготовки): *1* – температура заготовки, полученная опытным путем, °С; *2* – температура заготовки, рассчитанная с помощью ЭВМ, °С

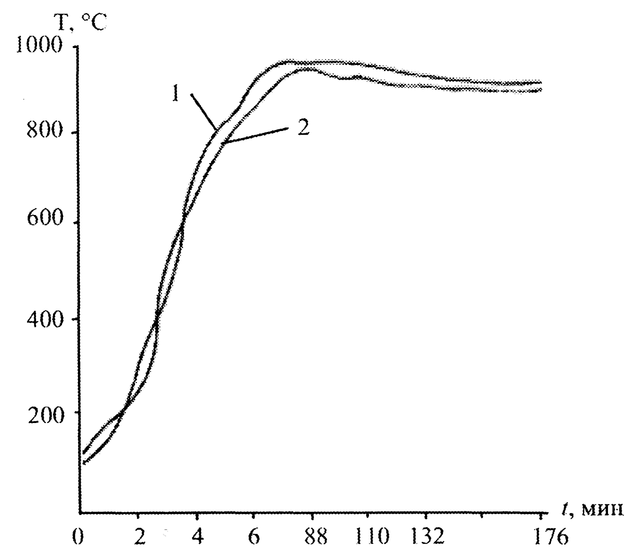

Рис. 3. Результаты идентификации математической модели (центр заготовки): *1* – температура заготовки, полученная опытным путем, °С; *2* – температура заготовки, рассчитанная с помощью ЭВМ, °С

На рис. 2, 3 приведены расчетные и экспериментальные значения температур поверхности и центра заготовки. Следует отметить, что среднее отклонение экспериментальных значений температур от расчетных в контрольных точках не превышает 30 °С, что можно считать удовлетворительным.

Вывод

Таким образом, по результатам промышленного эксперимента и предложенного алгоритма получены реальные значения параметров α, σ для модели нагрева металла в закалочной печи. Это имеет практическое значение для изучения процесса нагрева металла с целью его последующей оптимизации [3].

Литература

1. Теплотехнология металлургических мини-заводов / В. И. Тимошпольский, А. Б. Стеблов, В. Б. Ковалевский и др. Мн.: Наука и техника, 1992.

2. Методика теплотехнических испытаний и контроля эксплуатационных показателей работы нагревательных и термических печей / Под ред. К. М. Пахолуева. Свердловск: ВНИИМТ, 1978.

3. Управление температурным режимом нагрева металла по минимуму окалинообразования / В. Б. Ковалевский, Р. Б. Вайс, И. А. Трусова и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. завед.). 1993. № 5–6. С. 125–128.