

обдув нагретым до 150°C воздухом со скоростью $1,5$ м/с. Кривая сушки комбинированной имеет вид, схожий с кривой при высокотемпературном радиационном нагреве. $\bar{U}_{\text{отд}} = 0,205-0,210$ кг/кг, а $\bar{U}_{\text{кр.1}} = 0,185-0,190$ кг/кг. Температурные кривые характеризуются небольшими градиентами температуры по сечению материала. Скорость сушки достаточно велика за счет турбулизации пограничного слоя у открытой поверхности изделия, улучшающей условия испарения влаги.

Положительным фактором является общий невысокий уровень температуры изделия. Использование обдува формы не дает существенного эффекта. Исследование кривых кинетики сушки позволяет установить механизм переноса тепла и влаги в системе форма—изделие, проследить за характером изменения показателей, оказывающих решающее воздействие на качество сушки. Сравнивая результаты, полученные для различных методов и режимов, можно определить оптимальные параметры процесса сушки. Для пластических фарфоровых масс, приготовленных на основе Веселовской глины с начальным влагосодержанием $0,26$ кг/кг и толщиной $3,5-4$ мм, можно рекомендовать тепловой режим, характеризующийся радиационным нагревом со стороны формы в среде с температурой до 500°C и конвективным обдувом при температуре $350-400^{\circ}\text{C}$ и скорости теплоносителя $1,5-2$ м/с со стороны открытой поверхности изделия. Для снижения риска трещинообразования следует переходить на низкотемпературный режим либо начинать охлаждение с момента приближения влагосодержания к $\bar{U}_{\text{отд}}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красников В.В. Кондуктивная сушка. — М., 1973. — 288 с.
2. Чижский А.Ф. Сушка керамических материалов и изделий. — М., 1971. — 175 с.

УДК 621.24.536.02

В.И.ТИМОШПОЛЬСКИЙ, канд.техн.наук,
И.А.ТРУСОВА, Ю.А.МАЛЕВИЧ, канд.техн.наук,
Л.В.ШАТОН, канд.техн.наук (БПИ), В.А.ГАРАНЧУК
(Днепродзержинский индустриальный институт)

МЕТОД РАСЧЕТА НАГРЕВА МАССИВНОГО МЕТАЛЛА В КАМЕРНОЙ ПЕЧИ

Изучение температурных полей и расчеты нагрева металла имеют большое значение при исследовании и внедрении высокоинтенсивных и скоростных нагревательных процессов, а также при выборе наиболее рациональных схем и технологий термообработки и т.д.

В данной работе предлагается аналитическое решение нелинейной задачи теории нагрева, которое можно использовать с достаточной оперативностью и точностью для инженерных моделей при расчетах нагрева металла в пламенных печах.

Математическая постановка задачи для внутреннего теплопоглощения при лучисто-конвективном теплообмене имеет следующий вид:

$$\frac{1}{\xi^m} \frac{\partial}{\partial \xi} [(1 + \epsilon_\lambda \theta) \xi^m \frac{\partial \theta}{\partial \xi}] = (1 + \epsilon_c \theta) \frac{\partial \theta}{\partial Fo}; \quad (1)$$

$$(1 + \epsilon_\lambda \theta) \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{\xi=1} = \text{Bi}^* [1 - \theta_\Pi (Fo)]; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} = 0; \quad \theta(\xi; 0), \quad (3)$$

где $\text{Bi}^* = \text{Bi} + \text{Sk}(1 + \theta_\Pi)(1 + \theta_\Pi^2)$, $[1]$; $\theta(\xi; Fo) = \frac{T(x, t) - T_0}{T_c - T_0}$;

$Fo = \frac{a\tau}{R^2}$; $\text{Bi} = \frac{aR}{\lambda}$; $\text{Sk} = \frac{q_{\text{пр}} T_c^3 R}{\lambda}$ — числа Фурье, Био, Старка; $\epsilon_\lambda = \frac{\delta_\lambda}{\lambda_0} (T_c -$

$T_0)$; $\epsilon_c = \frac{\delta_c}{C_0} (T_c - T_0)$ — теплофизические константы; m — коэффициент формы тела ($m = 0$ — для пластины; $m = 1$ — для цилиндра; $m = 2$ — для шара).

В качестве математического аппарата при решении задачи (1)–(3) применен метод эквивалентных источников (МЭИ) [1]. Использование этого метода в сочетании с моделью термического слоя [2] позволило последовательно решить задачу теории нагрева для инерционного и регулярного этапов.

Температура поверхности в конце инерционного этапа определяется следующим выражением:

$$\theta_\Pi (Fo) = \theta_0 + \frac{\text{Sk} + \text{Bi}(1 - \theta_0)}{2(1 + \epsilon_\lambda \theta_0) + \text{Bi}}, \quad (4)$$

где $\theta_\Pi (Fo) = \frac{T_\Pi}{T_c}$; $\theta_0 = \frac{T_0}{T_c}$.

Длительность протекания инерционного периода находится из следующего трансцендентного уравнения:

$$\begin{aligned} & 6(\text{Bi}^*)^2 (1 + m) Fo_0 - 3 \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_\lambda}\right) \left\{ \epsilon_1 \left[\frac{1}{(1 - \theta_\Pi)^2} - 1 \right] + \right. \\ & + \epsilon_2 \frac{\theta_\Pi}{1 - \theta_\Pi} + \epsilon_3 \theta_\Pi + \epsilon_4 \ln(1 - \theta_\Pi) - \epsilon_5 [(1 - \theta_\Pi)^2] + \\ & + \epsilon_6 [(1 - \theta_\Pi)^3 - 1] \left. \right\} + \frac{\epsilon_c}{\epsilon_\lambda} \left\{ \frac{(1 - w^2)^2}{2\epsilon_\lambda^2} \left[\frac{1}{(1 - \theta_\Pi)^2} - 1 \right] + \right. \\ & \left. + 8w\epsilon_\lambda \theta_\Pi + \frac{3}{2} \epsilon_\lambda^2 [(1 - \theta_\Pi)^2 - 1] + 2(3w^2 - 1) \ln(1 - \theta_\Pi) \right\}. \quad (5) \end{aligned}$$

В выражениях (4), (5) приняты обозначения; $w = 1 + \epsilon_\lambda$; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4, \epsilon_5, \epsilon_6$ — константы, найденные в процессе решения исходной задачи.

Температурное поле в любой момент времени регулярного этапа описывается функцией:

$$\theta_2(\xi; Fo) = \frac{1}{\epsilon_\lambda} \left\{ \sqrt{U_\Pi^2 + \frac{Bi^*}{w^*} (1+Bi^{**})} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{1 - U_\Pi^2 (w^*)^2}{(1+Bi^{**})^2} \xi^2 - 1} \right] \right\}. \quad (6)$$

В работе [3] получена первообразная функция для вычисления температуры средней плоскости нагреваемых тел. В процессе анализа и приведения соответствующих членов выражения (4) установлено, что для теплотехнических расчетов достаточно использовать выражение

$$\theta_\Pi(Fo) = \frac{1}{\epsilon_\lambda} \left\{ \sqrt{U_\Pi^2 + Bi^* \left(\frac{Bi}{2} - \frac{1+Bi^{**}}{w^*} + U_\Pi \right)} - 1 \right\}. \quad (7)$$

Время, соответствующее значениям температур (6), (7), определяется из следующего трансцендентного уравнения:

$$\begin{aligned} 6Bi^*(1+m)(Fo - Fo_0) = & \left(1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_\lambda}\right) \left\{ \frac{1}{\sqrt{Bi^*}} \left[\frac{(4w - 3U_\Pi)^2 + 3Bi^*z}{z\sqrt{z}} \times \right. \right. \\ & \times \operatorname{atc} \sin \sqrt{\frac{z}{R}} - \frac{((4w - 3U_{\Pi 0})^2 + 3Bi^*z_0)}{z_0\sqrt{-z_0}} \operatorname{arc} \sin \sqrt{\frac{z}{R}} \left. \right] - \\ & - w \left(\frac{1}{z} - \frac{1}{z_0} \right) - b_1 \ln \frac{z}{z_0} + b_2 \ln \frac{R}{R_0} + b_3 (\Phi - \Phi_0) \left. \right\} - \\ & - 2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_\lambda} \left[3(U_\Pi - U_{\Pi 0}) + b_4 \ln \frac{z}{z_0} \right]. \quad (8) \end{aligned}$$

В выражениях (6)–(8) приняты следующие обозначения: $U_\Pi = 1 + \epsilon_\lambda \theta(Fo)$;

$U_\Pi = 1 + \epsilon_\lambda \theta_\Pi(Fo)$; $U_{\Pi 0} = \frac{Bi^*}{2} \left[\sqrt{1 - \frac{4(1+wBi^*)}{(Bi^*)^2}} - 1 \right]$; $z, z_0, R, R_0, b_1, b_2, b_3, b_4, \Phi, \Phi_0$ — теплофизические параметры, найденные при решении задачи.

В качестве примера рассмотрим нагрев сплошного цилиндра в камерной печи, работающей по двухзонному режиму. Исходные данные для расчета температурных полей и времени нагрева цилиндра следующее: $D = 2R = 0,24$ м; марка стали — Ст. 20; начальное распределение температур $t_0 = 20^\circ \text{C}$. Изменение температуры среды по длине печи представлено на рис. 1. Зону нагрева разбиваем на два участка. Переход при расчете от одного участка к другому

определяется временем нагрева, уточненным из практических данных. Результаты расчета приведены на рис. 1.

В результате проведенных исследований сформулирована и решена нелинейная краевая задача теплопроводности в массивных изделиях при нагреве излучением и конвекцией. Использованы прием линеаризации граничного условия в виде $Bi^* = Bi + Sk(1 - \theta_{\Pi}^2)(1 + \theta_{\Pi}^2)$, который способствовал упрощению выполнения математических процедур в ходе решения, метод эквивалентных источников, а также схема теплового пограничного слоя.

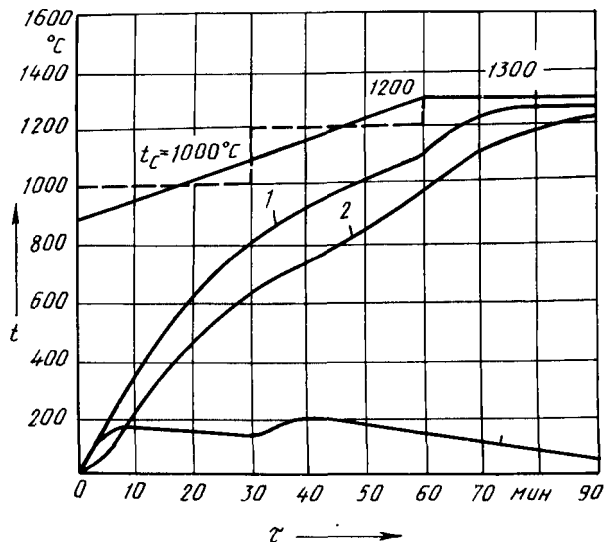


Рис. 1. Изменение температуры цилиндрической заготовки во времени:
1 — изменение температуры поверхности заготовки; 2 — изменение температуры центра заготовки; 3 — время нагрева.

Разработан алгоритм вычислений температур в массивном цилиндре при нагреве его в пламенной печи.

Разработанный метод целесообразно использовать для расчетов массивных изделий при нагреве и термообработке в пламенных печах.

ЛИТЕРАТУРА

1. П о с т о л ь н и к Ю.С. Вопросы нелинейной теории нагрева и охлаждения металла: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Днепропетровск, 1980. — 48 с.
2. Л ы к о в А.В. Теория теплопроводности. — М., 1967. — 559 с.
3. Т и м о ш п о л ь с к и й В.И., Т р у с о в а И.А. К расчету нагрева массивного металла в пламенных печах. — Изв. вузов. Энергетика, 1985, № 1, с. 103–106.