

Г. А. АНИСОВИЧ, В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ,
И. А. ТРУСОВА, С. М. КАБИШОВ, Р. Б. ВАЙС,
Ю. В. ДЬЯЧЕНКО, НАН Беларуси, БГПА,
ООО Торговый Дом "Славянский металл и
технологии", БМЗ

The article gives the results of parametric identification of mathematical models of nonsymmetric heating of metal in continuous pusher furnaces with powdered hearth.

УДК 669.046

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ НАГРЕВЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ МАРОК СТАЛЕЙ В ПЕЧАХ

Наиболее распространенным методом исследования технологии нагрева металла в высокотемпературных промышленных печах является математическое моделирование с последующей численной реализацией на ЭВМ и разработка приближенных аналитических методов решения задачи теплопроводности. Вместе с тем при моделировании процессов теплопереноса перед исследователем встает задача адекватности математической модели реальным теплофизическим процессам внешнего и внутреннего теплообмена с учетом специфики организации производства, технологических и конструктивных особенностей нагревательных печей. Особое значение приобретает решение данной задачи при исследовании и разработке технологических режимов нагрева специальных марок сталей и сплавов. С этой точки зрения наиболее целесообразен комплексный подход к исследованию технологии нагрева металла, включающий в себя разработку математических моделей тепловой работы печей с последующей идентификацией моделей

по результатам промышленных экспериментов и проведением расчетно-теоретического анализа для выбора рациональных температурно-тепловых режимов (например, [1—3]).

В данной работе использован такой комплексный подход при изучении технологии нагрева специальных сталей в условиях методических печей Новосибирского металлургического завода им. Кузьмина (НМЗ) и Белорусского металлургического завода (БМЗ).

В первом случае (при исследовании технологии нагрева в методических печах толкательного типа, функционирующих в условиях НМЗ) в основу математической модели положено традиционное нелинейное уравнение нестационарной теплопроводности с нелинейными несимметричными граничными условиями:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T)\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T)\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x} \right), \quad (1)$$

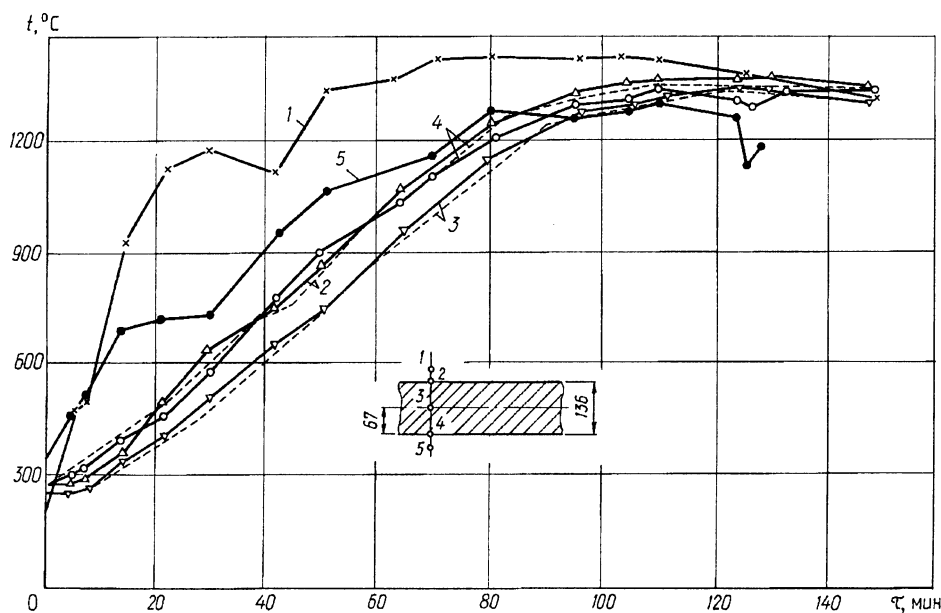


Рис. 1. Результаты сравнения расчетных (---) и экспериментальных (Δ, ●, ○, ▽) термограмм нагрева стали 65X13

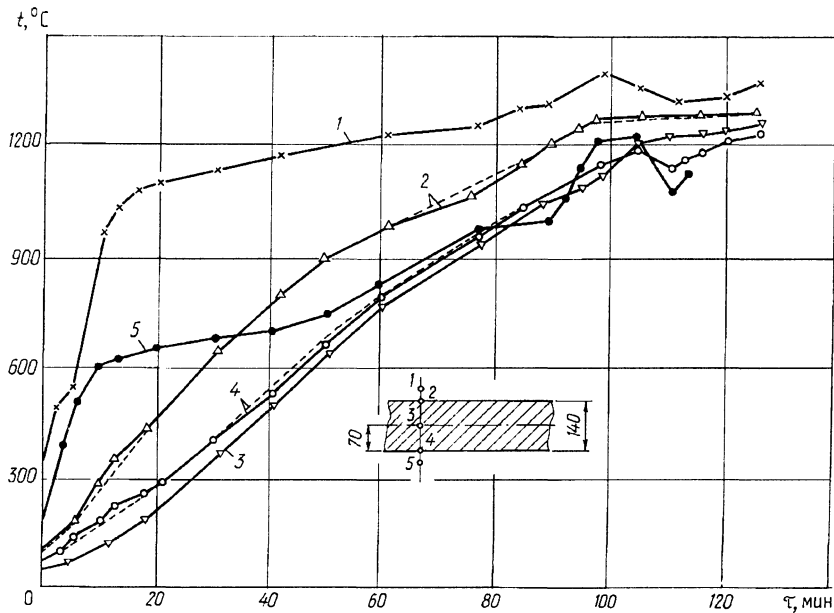


Рис.2. Результаты сравнения расчетных (---) и экспериментальных (Δ, ●, ○, ▽) термограмм нагрева сляба из стали 12X18N10T

$$\lambda(T) \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \sigma_n(\tau) \left((T_c^n(\tau) + 273)^4 - (T(0, \tau) + 273)^4 \right) + \alpha_n(T_c^n(\tau) - T(0, \tau)), \quad (2)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(L, \tau)}{\partial x} = \sigma_v(\tau) \left((T_c^v(\tau) + 273)^4 - (T(L, \tau) + 273)^4 \right) + \alpha_v(T_c^v(\tau) - T(L, \tau)), \quad (3)$$

$$T(x, 0) = T_{\text{нач}}, \quad (4)$$

где индексы “н” и “в” соответствуют нижнему и верхнему нагреву. Остальные обозначения общепринятые в задачах теплопроводности.

Модель (1)—(4) дополнена последовательным зональным расчетом топлива и толщины образовавшейся окалины.

Идентификация приведенной математической модели проводилась с учетом переменности теплофизических свойств материала слябов путем определения коэффициентов теплообмена σ и α между атмосферой печи и поверхностями сляба по длине печи. Рассматривалась средняя скорость прохождения слябов, далее в соответствии с экспериментальным временным графиком строились температурные режимы печи. Такой метод позволил воспроизвести температурные режимы печи во времени в полном соответствии с экспериментом (рис. 1, 2). Очевидно, что расхождения данных расчетов и экспериментов составляют не более 2—3% и имеют место главным образом в начальной стадии нагрева, а также в интервале температур, где происходят фазовые превращения.

С использованием методики зонального расчета топлива определяли суммарный расход топлива на печь и сравнивали с фактическим значением, зафиксированном при проведении экспериментов. Так, при нагреве стали 65X13 расчетная величина составляла 2490 м³/ч, а факти-

ческая — 2442 м³/ч, при нагреве стали 12X18N10T — соответственно 2561 и 2600 м³/ч. Отмеченные обстоятельства свидетельствуют о надежности и корректности комплексной математической модели.

Для условий нагревательных печей станов 850 и 320/150 БМЗ использовали иной прием.

Учитывая конструктивные особенности печей с механизированным подом (шагающий под и шагающие балки) и дискретный характер расположения заготовок на поду, решение сопряженной математической модели процесса нагрева осуществляли в два этапа: на первом этапе дискретную поверхность заготовок заменяли условной плоскостью, на втором уточняли результаты решения с учетом переизлучения между заготовками и верхней и нижней частью печного пространства [4].

Внешний теплообмен описывается формулами

$$\sum_{k=1}^N \left(a_{k_i}^{\Sigma} \bar{T}_k^4 + g_{k_i} \bar{T}_k \right) + g_i^0 + Q_i^V = 0, \quad i \in N_2, \quad (5)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^N \left(a_{k_i}^{\Sigma} \bar{T}_k^4 + g_{k_i} \bar{T}_k \right) + g_i^0, \quad i \in N_1, \quad (6)$$

где N — общее число расчетных зон; N_1, N_2 — соответственно множество номеров зон I и II рода;

$a_{k_i}^{\Sigma}, g_{k_i}, g_i^0, Q_i^V$ — коэффициенты радиационного и конвективного теплообмена, а также величины объемных тепловыделений.

Внутренняя задача теплообмена описывается традиционным уравнением теплопроводности: на первом этапе — одномерным, на втором — двумерным с соответствующими граничными условиями.

При идентификации математической модели сопряженного теплообмена варьировали величинами, входящими в выражение для расчета параметров внешнего теплообмена $a_{k_i}^{\Sigma}$ и g_{k_i} .

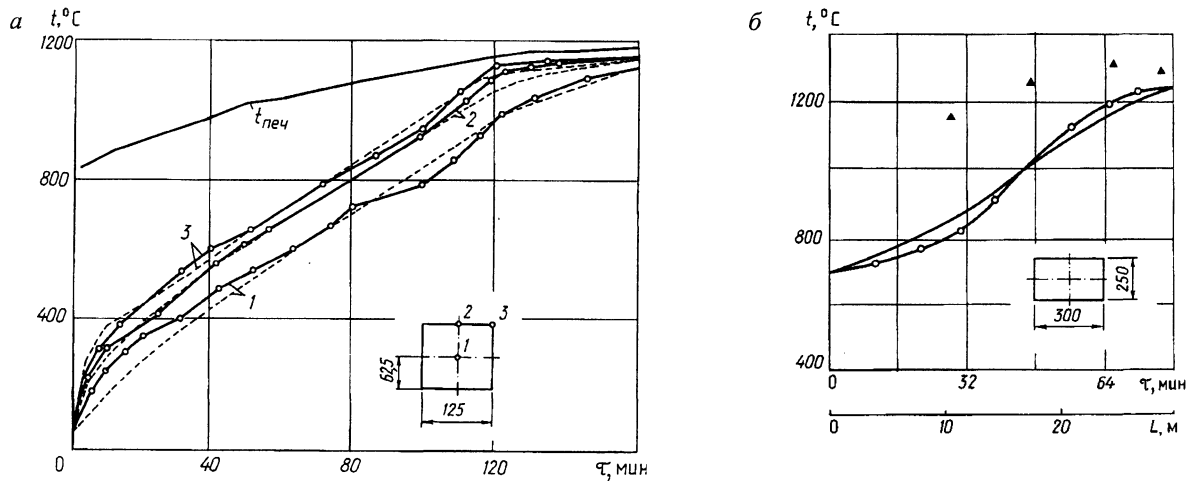


Рис. 3. Динамика нагрева поверхности заготовки высокоуглеродистой стали: а — печь стана 320/150; б — печь стана 850: —○— — экспериментальные данные; — — —, — — — — расчетные данные

Расчетные и экспериментальные данные изменения температурного поля заготовок из высокоуглеродистых марок сталей приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что математическая модель сопряженного теплообмена адекватна исследуемому процессу нагрева.

С использованием приведенных математических моделей разработаны пакеты программ для IBM-совместимых ПЭВМ и переданы заказчикам.

Проведен расчетно-теоретический анализ технологии нагрева сталей в широком диапазоне изменения технологических, геометрических и теплофизических параметров в условиях нагревательных печей НМЗ и БМЗ.

Разработаны и внедрены в производство технологии нагрева специальных сталей и сплавов.

Для методических нагревательных печей стана 810 НМЗ выход годного металла для отдельного сортамента увеличился до 60%, удельный расход топлива снизился на 3,2 кг у. т/т.

Для условий БМЗ (нагревательная печь стана 320/150) при нагреве высокоуглеродистых марок сталей удельный расход условного топлива снизился на 3—5 кг у. т/т в зависимости от производительности прокатного стана.

Литература

1. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Наука і тэхніка, 1995.
2. Постольник Ю. С., Тимошпольский В. И., Сичевой А. П. Анализ технологии нагрева металла в пламенных печах // Изв. вузов. Черная металлургия. 1979. № 2.
3. Тимошпольский В. И. Разработка режимов нагрева стали в методических и кольцевых печах с использованием математических моделей // Сталь. 1999. № 7.
4. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Кабишов С. М. и др. Исследование технологии нагрева непрерывнолитых заготовок высокоуглеродистых сталей в печах с шагающими балками // Сталь. 1995. № 4.