

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:

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

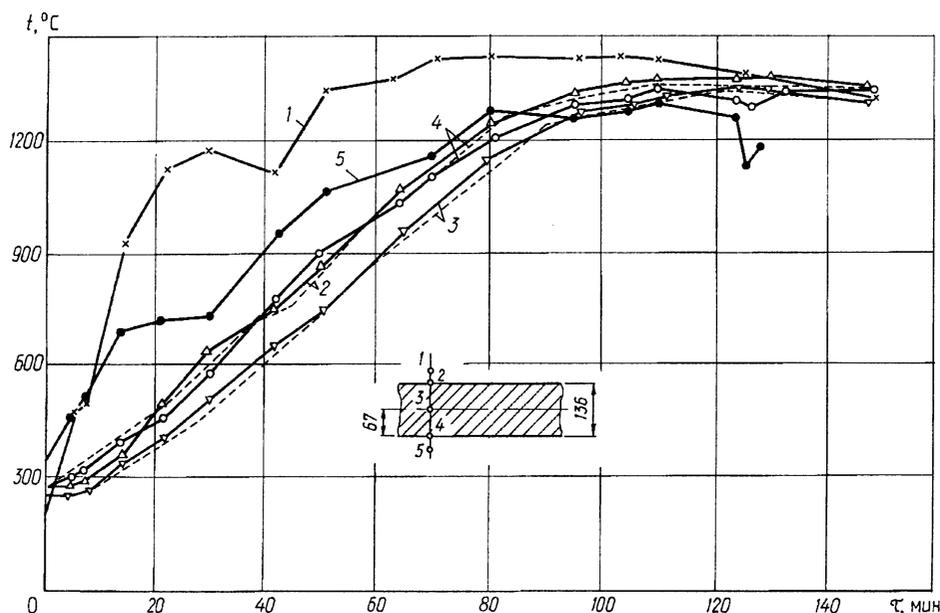


Рис. 1. Результаты сравнения расчетных (---) и экспериментальных (Δ, ●, ○, ▽) термограмм нагрева стали 65X13

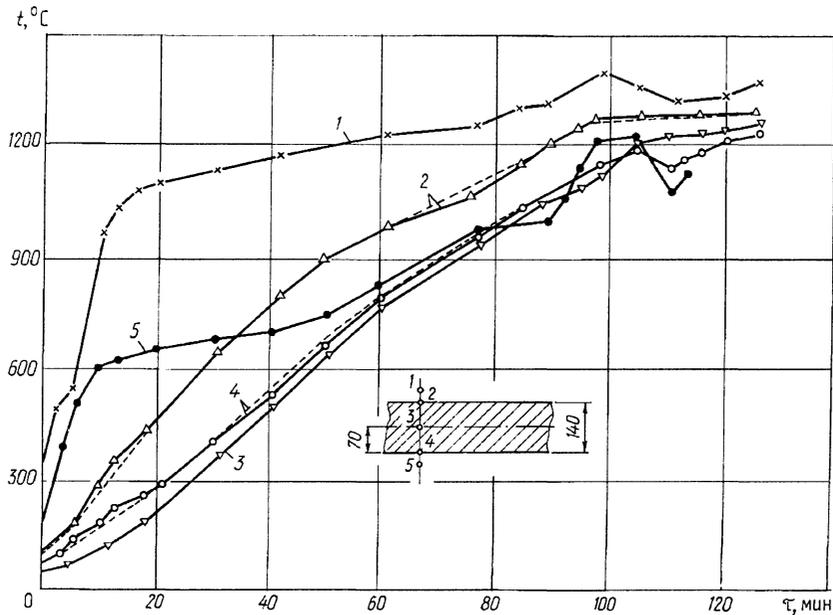


Рис.2. Результаты сравнения расчетных (---) и экспериментальных (Δ, ●, ○, ▽) термограмм нагрева сляба из стали 12X18N10T

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

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

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

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  $\sigma$  и  $\alpha$  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 м<sup>3</sup>/ч, а факти-

ческая — 2442 м<sup>3</sup>/ч, при нагреве стали 12X18N10T — соответственно 2561 и 2600 м<sup>3</sup>/ч. Отмеченные обстоятельства свидетельствуют о надежности и корректности комплексной математической модели.

Для условий нагревательных печей станков 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  $g_{k_i}$ .

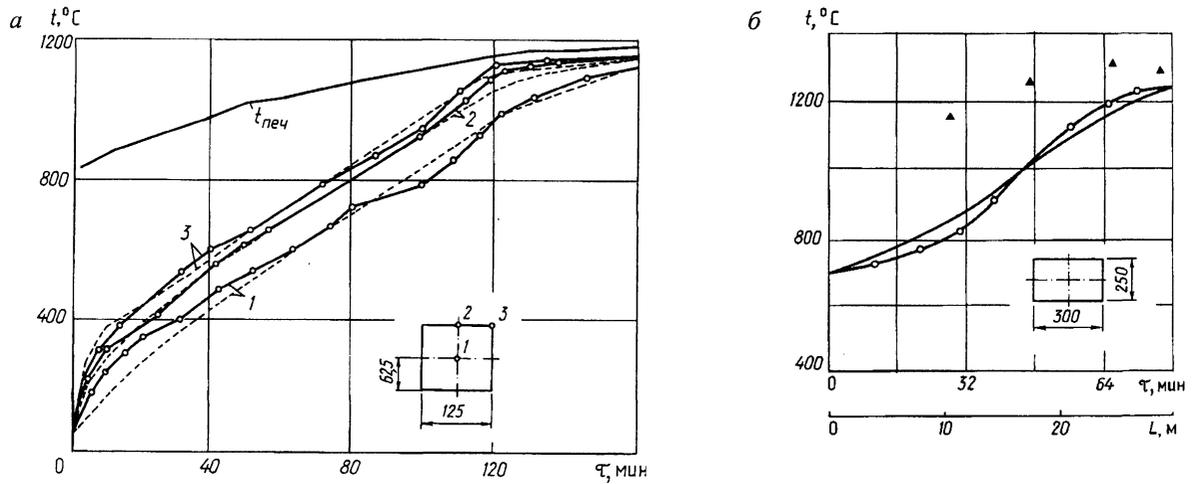


Рис. 3. Динамика нагрева поверхности заготовки высокоуглеродистой стали: а — печь стана 320/150; б — печь стана 850: —○— — экспериментальные данные; — — —, — — — — расчетные данные

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.