

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, докт. техн. наук,
 О. В. ДУБИНА (КГГМК «Криворожсталь»),
 С. М. КОЗЛОВ, канд. техн. наук (БГПА),
 В. В. НЕСВЕТ, канд. техн. наук (ДМК, Украина),
 Р. Б. ВАЙС, канд. техн. наук (БГПА)

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОДИНЫ НА НАГРЕВ СПЛОШНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛИТКА

Нагрев сплошных и полых толстостенных цилиндрических заготовок большого диаметра в кольцевых печах трубо- и осепрокатного производства перед прокаткой или прошивкой — одна из важнейших технологических операций. Термическая массивность подобных слитков приводит к образованию существенного температурного перепада по сечению нагреваемых заготовок, что требует для описания математической модели процесса нагрева использования дифференциального уравнения с частными производными.

Опубликованные ранее работы [1, 2] подтверждают априорный факт, что нагрев сплошных цилиндров в общем случае несимметричен. Кроме того, результаты экспериментальных исследований, проведенных на кольцевых печах осепрокатного стана 250 [3], позволяют сделать вывод, что нагрев заготовок диаметром 0,27 м и длиной 1,75—2 м также несимметричен, однако в этом случае теплообмен с торца цилиндра практически не сказывается на внутреннем теплопоглощении металла.

Температурную задачу процесса нагрева неограниченного цилиндра при несимметричном нагреве одновременно излучением и конвекцией можно описать дифференциальным уравнением с распределенными параметрами [4]:

$$c(T)\rho(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(T) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \quad (1)$$

с граничным

$$\begin{aligned} & \lambda(T) \frac{\partial T(R, \varphi, t)}{\partial r} = \\ & = \sigma(\varphi, T_{\text{печ}}(t))(T_{\text{печ}}^4(t) - T^4(R, \varphi, t)) + \alpha(T_{\text{печ}}(t) - T(R, \varphi, t)) \end{aligned} \quad (2)$$

и начальным условиями

$$T(r, \varphi, 0) = T_0(r, \varphi), \quad (3)$$

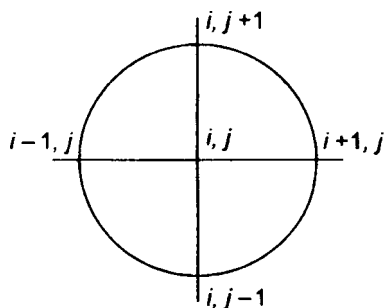
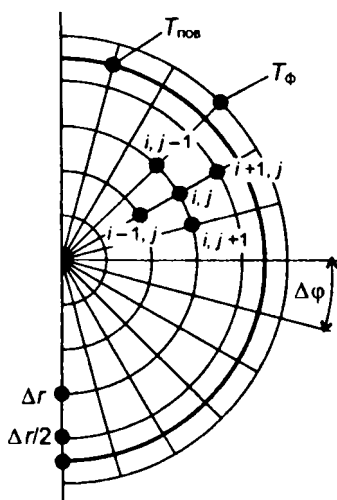


Рис. 1. Сеточная модель для расчета температур по сечению (а) и на оси (б) неограниченного цилиндра

где $T = T(r, \varphi, t)$ — температура металла в точке сечения заготовки, заданной полярными координатами r и φ , в момент времени t ; $c(T)$, $\rho(T)$, $\lambda(T)$ — теплоемкость, плотность и теплопроводность стали соответственно; $T_{\text{печ}}(t)$ — температура греющей среды в момент времени t ; $\sigma(\varphi, T_{\text{печ}}(t))$ — коэффициент теплообмена излучением, изменяющийся по периметру сечения слитка; α — коэффициент теплообмена конвекцией; R — радиус цилиндра; $T_0(r, \varphi)$ — распределение температурного поля по сечению заготовки в начальный момент времени.

Для решения математической модели нагрева (1)–(3), как правило, применяют метод сеток на основе неявной или явной расчетной схемы. При проведении численных экспериментов по прогнозированию изменения температурного поля нагреваемых слитков использована абсолютно устойчивая явная схема, в основных принципах получения которой применяется метод Дюфо-Франкела. Сеточная область представлена на рис. 1, а.

Следуя основной идее метода, частные производные в уравнениях (1) и (2) заменялись конечными разностями:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{F(x+\Delta x) - F(x-\Delta x)}{2\Delta x};$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} = \frac{F(x+\Delta x) - 2F(x) + F(x-\Delta x)}{\Delta x^2}.$$

Полагая $T_{i,j,k} = 0,5(T_{i,j,k+1} + T_{i,j,k-1})$, из дифференциального уравнения (1) можно получить расчетную схему вида

$$\begin{aligned} T_{i,j,k+1} = & \left\{ \left[0,5 - \frac{a_{i,j,k}}{\Delta r^2} \Delta t \left(1 + \frac{1}{r_i^2} \frac{\Delta r^2}{\Delta \varphi^2} \right) \right] T_{i,j,k-1} + \frac{a_{i,j,k}}{\Delta r^2} \Delta t \times \right. \\ & \times \left[\left(1 + \frac{\lambda_{i+1,j,k} - \lambda_{i-1,j,k}}{4\lambda_{i,j,k}} \right) T_{i+1,j,k} + \left(1 - \frac{\lambda_{i+1,j,k} - \lambda_{i-1,j,k}}{4\lambda_{i,j,k}} \right) T_{i-1,j,k} \right] + \frac{a_{i,j,k}}{\Delta r^2} \times \\ & \times \Delta t \frac{1}{r_i^2} \frac{\Delta r^2}{\Delta \varphi^2} \left[\left(1 + \frac{\lambda_{i,j+1,k} - \lambda_{i,j-1,k}}{4\lambda_{i,j,k}} \right) T_{i,j+1,k} + \left(1 - \frac{\lambda_{i,j+1,k} - \lambda_{i,j-1,k}}{4\lambda_{i,j,k}} \right) T_{i,j-1,k} \right] + \\ & \left. + \frac{a_{i,j,k}}{\Delta r^2} \Delta t \frac{1}{2r_i} (T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}) \right\} \left[0,5 + \frac{a_{i,j,k}}{\Delta r^2} \Delta t \left(1 + \frac{1}{r_i^2} \frac{\Delta r^2}{\Delta \varphi^2} \right) \right]^{-1}, \end{aligned}$$

где i, j, k — номера слоев по радиусу, углу и времени; $a = \frac{\lambda(T)}{c(T)\rho(T)}$ — коэффициент температуропроводности.

Данное расчетное уравнение позволяет получить значение температурного поля в узлах цилиндра в момент времени $(k+1)\Delta t$ по известным значениям температур в моменты времени $k\Delta t$ и $(k-1)\Delta t$. В начальный момент времени полагаем $T_{i,j-1} = T_{i,j,0}$.

Для расчета температур осевого слоя цилиндра рассмотрим систему узлов, состоящую из центральной точки и четырех точек, отстоящих от центральной на расстояние Δr в соответствии со схемой, изображенной на рис. 1, б. Запишем

$$\begin{aligned} T_{i,j,k+1} = & \left\{ \left(0,5 - \frac{2a_{i,j,k}}{\Delta r^2} \Delta t \right) T_{i,j,k-1} + \frac{a_{i,j,k}}{\Delta r^2} \Delta t \left[\left(1 + \frac{\lambda_{i+1,j,k} - \lambda_{i-1,j,k}}{4\lambda_{i,j,k}} \right) \times \right. \right. \\ & \times T_{i+1,j,k} + \left(1 - \frac{\lambda_{i+1,j,k} - \lambda_{i-1,j,k}}{4\lambda_{i,j,k}} \right) T_{i-1,j,k} + \left(1 + \frac{\lambda_{i,j+1,k} - \lambda_{i,j-1,k}}{4\lambda_{i,j,k}} \right) T_{i,j+1,k} + \\ & \left. \left. + \left(1 - \frac{\lambda_{i,j+1,k} - \lambda_{i,j-1,k}}{4\lambda_{i,j,k}} \right) T_{i,j-1,k} \right] \right\} \left(0,5 + \frac{2a_{i,j,k}}{\Delta r^2} \Delta t \right)^{-1}. \end{aligned}$$

При проведении расчетов число узлов по координате φ на интервале $[0, 2\pi]$ принималось кратным четырем. Значения $a = a(T)$,

Числовые значения коэффициентов n_i
в зависимости от относительного значения межосевого расстояния

n_i	S/D					
	1,0	1,25	1,5	2,0	4,0	∞
n_0	0,4320	0,4840	0,5370	0,6130	0,7100	0,7380
n_1	0,4222	0,4060	0,3910	0,3600	0,3330	0,3350
n_2	0,1640	0,1230	0,0830	0,0170	-0,0530	-0,0810
n_3	0,0120	0,0600	-0,0050	0,0170	0,0110	0,0140
n_4	-0,0330	-0,0240	-0,0150	-0,0170	-0,042	-0,0082
n_5	-0,0025	-0,0030	-0,0040	-0,033	-0,0015	0,010
n_6	0,0053	0	-0,0050	0,0120	-0,0004	0,0008

$\lambda = \lambda(T)$ соответствуют температурам в узлах сеточной области в начале каждого расчетного интервала времени. Их численные значения определялись по эмпирическим формулам, предложенным В. А. Маковским [5].

Учет граничного условия (2) производился путем введения фиктивного полуслоя у поверхности цилиндра по аналогии с приведенным выше алгоритмом. Температуру фиктивного полуслоя T_ϕ находили с помощью метода последовательных приближений Ньютона.

Величина коэффициента излучения изменялась по периметру сечения заготовки с учетом влияния взаимного расположения заготовок S/D (S — расстояние между осями цилиндров, D — их диаметры) по формуле

$$\sigma(\varphi, T_{\text{печ}}(t)) = \sigma_{\text{max}}(T_{\text{печ}}(t)) \sum_{i=0}^6 n_i \cos i\varphi,$$

где $\sigma_{\text{max}}(T_{\text{печ}}(t))$ — максимальное значение коэффициента теплообмена излучением при известной температуре печи $T_{\text{печ}}(t)$ в момент времени t .

Значение σ_{max} определялось в зависимости от температуры печи по графику, полученному на основании экспериментальных исследований нагрева цилиндрических заготовок в кольцевой печи [4], а коэффициенты n_i — в зависимости от взаимного расположения заготовок по таблице 1.

В продолжение выполненных ранее исследований [4, 6, 7], направленных на изучение и совершенствование технологии нагрева металла в кольцевых печах, приведенную выше математическую

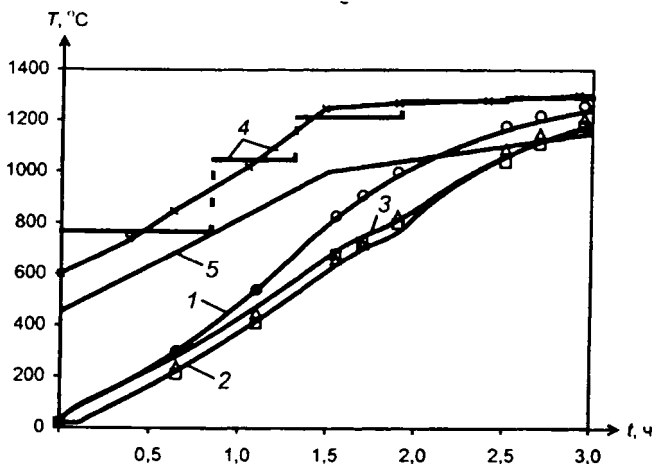


Рис. 2. Изменение температур в характерных точках (1 — верхняя поверхность, 2 — центр, 3 — нижняя поверхность) сечения слитка при заданном температурном режиме печи (4) и известной температуре подины (5): — — численное решение; о о о — эксперимент

модель, ставшую уже классической, модернизировали. При этом предлагается учитывать влияние нагретой подины на распределение температурного поля по сечению цилиндра. Будем считать, что 10 % поверхности слитка находятся в идеальном тепловом контакте с подиной. Тогда математическая модель (1)–(3) для соответствующей граничной области дополняется граничными условиями IV рода:

$$\lambda \frac{\partial T_{\phi}}{\partial x} \Big|_{\Gamma} = \lambda_{ш} \frac{\partial T_{под}}{\partial x} \Big|_{\Gamma}, \quad (4)$$

$$T_{\phi} \Big|_{\Gamma} = T_{под} \Big|_{\Gamma}, \quad (5)$$

где $\lambda_{ш}$ — теплопроводность шамота; $T_{под}$ — температура подины.

В качестве температуры фиктивного слоя приняли среднее значение между температурой, найденной итерационным методом Ньютона, и температурой, полученной из соотношений (4), (5). Это позволяет учитывать теплообмен не только с подиной, но и между соседними точками поверхности нагреваемого слитка.

Адекватность предлагаемой модели после ее параметрической идентификации вполне подтверждается результатами промышленного эксперимента [4].

На рис. 2 представлена динамика процесса нагрева металла во времени в характерных точках сечения цилиндрической заготовки

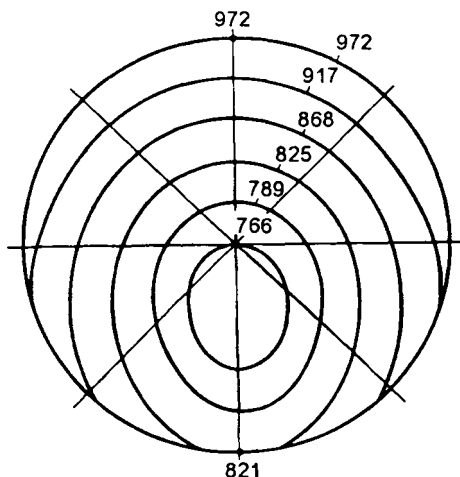


Рис. 3. Расположение расчетных изотерм по сечению заготовки

диаметром 0,27 м при несимметричном нагреве, а также значения температур греющей среды и подины. Там же приведены результаты экспериментальных замеров. Очевидно, среднее расхождение температур в характерных точках сечения заготовки, полученных в ходе эксперимента и по данным численных расчетов, не превышает 5 %, что можно считать вполне удовлетворительным. На рис. 3 показано расположение расчетных изотерм по сечению цилиндрической заготовки в момент наибольшего температурного перепада, где легко увидеть смещение термического центра по отношению к геометрическому.

Модернизированная математическая модель нагрева сплошных и полых цилиндрических заготовок может быть использована для анализа и совершенствования температурно-тепловых режимов при нагреве заготовок в кольцевых печах с деформированной подиной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ситковский И. С., Клейнер М. К., Эммануэль Г. А. Нагрев круглых слитков в кольцевых печах // *Сталь*. — 1971. — № 3. — С. 272—276.
2. Тимошпольский В. И., Сичевой А. П. Режимы нагрева и термообработки при производстве железнодорожных осей // *Сталь*. — 1984. — № 12. — С. 69—71.
3. Гольдфарб Э. М., Тимошпольский В. И., Постольник Ю. С. Усовершенствование режима нагрева осевых заготовок в кольцевой печи // *Сталь*. — 1978. — № 9. — С. 866—868.

4. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Пекарский М. Я. Кольцевые печи: Теория и расчеты. — Мн.: Выш. шк., 1993. — 248 с.

5. Маковский В. А. Эмпирические формулы для выражения температурной зависимости теплофизических свойств стали // Сталь. — 1972. — № 1. — С. 87—89.

6. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Козлов С. М. Влияние кантования на нагрев цилиндрических заготовок с изменяющимися по периметру граничными условиями в кольцевых печах осепрокатного производства // Литье и металлургия. — 1999. — № 4. — С. 35—37.

7. Разработка и внедрение ресурсосберегающих теплотехнологий производства осевых заготовок на Днепровском металлургическом комбинате им. Ф. Э. Дзержинского / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, И. С. Тимошпольский и др. // Литье и металлургия. — 1998. — № 3. — С. 21—24.

УДК 669.187.2

С. Н. ПАДЕРИН, докт. техн. наук (МИСиС),
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, докт. техн. наук (БГПА),
А. Д. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук (БМЗ),
М. Г. ПШОНИК, канд. техн. наук,
Н. Г. МАЛЬКЕВИЧ, канд. техн. наук (БГПА)

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В 100-ТОННОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТАЛЛИЗОВАННЫХ ОКАТЫШЕЙ

В электросталеплавильном производстве к настоящему времени сформировалась концепция технологии высшего уровня, направленная на коренное изменение технологии плавки и конструкции дуговых печей для решения двух основных задач: повышения производительности и уменьшения энергопотребления. Сверхмощная печь используется как высокопроизводительный агрегат для выплавки полупродукта. Использование металлизированных окатышей приводит к работе по специфическим энерготехнологическим режимам.

На Белорусском металлургическом заводе технология выплавки жидкого полупродукта в 100-тонной сверхмощной печи включает непрерывную загрузку металлизированных окатышей на жидкий металл, их плавление, совмещенное с окислительным рафинированием металлической ванны.

Важнейшей технологической задачей является синхронизация процессов непрерывной загрузки окатышей и их плавление с дос-