

В случаях, когда ожидается повышенный балл карбидной сетки, целесообразен повторный отжиг, возможный при более низкой температуре (780 °С), что дает некоторую экономическую выгоду. При проведении повторного отжига возможно снижение карбидной сетки на 0,5 балла.

На основе опубликованных данных по Ижевскому, Златоустовскому заводам, а также «Серп и молот», «Днепроспецсталь» можно сделать следующие выводы по технологии термообработки горячекатаной стали ШХ15СГ в прутках. В основном это нагрев до 790 °С, выдержка 12 ч, охлаждение до 630 °С со скоростью 40 °С/ч, затем охлаждение на воздухе. Увеличение длительности отжига на 8 – 10 ч снижает карбидную сетку на 0,5 балла. Повышение температуры отжига с 790 до 820 °С практически не сказывается на снижении карбидной сетки.

Таким образом, испытания опытной партии подшипников 3626.01 и 3626.02, изготовленных на МПЗ, свидетельствуют о возможности производства шарикоподшипниковой стали ШХ15СГ в условиях БМЗ.

Целесообразно проведение дальнейших исследований, направленных на более глубокую переработку непрерывнолитых заготовок, включая катанку и проволоку различных диаметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Стеблов А. Б., Павлюченков И. А. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах: Учеб. пособие. – Мн.: Выш. шк., 1992. – 316 с.

УДК 669.04:536.244

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук (БНТУ)
Ю. С. ПОСТОЛЬНИК, д-р техн. наук (ДГТУ)*,
С. М. КОЗЛОВ, канд. техн. наук (БНТУ),
Ю. Н. ЗИНЧЕНКО (ДГТУ), **П. Э. РАТНИКОВ** (БНТУ),
В. А. ТРУСОВ (ДМК им. Дзержинского**)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ТЕРМИЧЕСКИ МАССИВНЫХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ПРОТИВОТОЧНОГО ТЕПЛООБМЕНА ИЗЛУЧЕНИЕМ

Нагрев металла в противотоке с печными газами довольно широко распространен в промышленном производстве. Развитие научной мысли в этом направлении берет свое начало с середины XX века. К исследованию этого весьма актуального вопроса неоднократно обращались многие уче-

* Днепродзержинский государственный технический университет.

** Днепровский металлургический комбинат им. Дзержинского (Украина, г. Днепро-дзержинск).

ные-металлурги [1 – 8]. Авторами настоящей работы также предпринимались попытки как получить чисто аналитическое решение [9], так и провести математическое моделирование изучаемого процесса на ЭВМ [10]. Использование численных методов по сравнению с инженерными позволяет существенно увеличить точность расчетов, избежать ряда характерных для приближенных алгоритмов упрощений (линеаризация исходной задачи, отказ от учета термической массивности тел и зависимости теплофизических свойств нагреваемого металла от температуры и др.).

Постановка задачи нагрева металла в противоточной формулировке по сравнению с традиционной задачей теплопроводности имеет ряд значительных преимуществ: представляется возможным учитывать характеристики используемого топлива (удельную теплоту сгорания, теплоемкость продуктов горения и т. д.), прогнозировать распределение температур в различных зонах рабочего пространства печи при варьировании величины расхода топлива.

Рассмотрим задачу симметричного нагрева массивных тел плоской ($m = 0$), цилиндрической ($m = 1$) и сферической ($m = 2$) формы в постановке теоретического противоточного теплообмена:

$$\frac{1}{\rho^m} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho^m \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \right] = \frac{\partial \theta}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \right|_{\rho=1} = \text{Sk} \left[\theta_r^4 - \theta_{ii}^4 \right]; \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial \rho} \right|_{\rho=0} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{d\theta_r}{d\tau} = \text{Sk} \left[\theta_r^4 - \theta_{ii}^4 \right] n_m; \quad (3)$$

$$\theta(\rho, 0) = \theta_0 = \theta'; \quad \theta_r(0) = \theta'', \quad (4)$$

где введены безразмерные величины

$$\theta(\rho, \tau) = \frac{T(r, t)}{T_r''}; \quad \theta_r(\tau) = \frac{T_r(t)}{T_r''}; \quad \rho = \frac{r}{R}; \quad \tau = \text{Fo} = \frac{at}{R^2};$$

$$\text{Sk} = \frac{\sigma_b T_r''^3 R}{\lambda}; \quad n = \frac{Vc}{V_r c_r}; \quad n_m = (1+m)n.$$

Здесь T, T_r – абсолютные температуры металла и газа, К; r – отсчитываемая от центра координата тела, м; $2R$ – характерный размер тела, м; a – температуропроводность металла, м²/с; t – время, с; λ – теплопроводность металла, Вт/(м·К); σ_b – коэффициент теплообмена излучением, Вт/(м²·К⁴);

c и c_r – теплоемкость металла и газа соответственно, Дж/(кг·К); V – объем нагреваемого металла, м³: $V = FR/(1+m)$ (F – тепловоспринимающая поверхность нагреваемого металла, м²); V_r – объем греющих газов, м³; n – отношение водяных чисел; m – коэффициент формы; θ , θ_r , θ_n – соответственно безразмерные температуры металла, газа и поверхности металла; Sk , Fo – критерии Старка и Фурье соответственно. Индексы «'» и «''» обозначают соответствующие значения переменных величин на входе и выходе.

Численное решение задачи (1) – (4) проводилось на ЭВМ по методу конечных разностей с использованием явной разностной схемы. Выполняя замену частных производных их разностными аналогами

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{\Delta x}; \quad \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{\theta_{i+1} - 2\theta_i + \theta_{i-1}}{\Delta x^2},$$

получаем следующие расчетные формулы:

$$\begin{aligned} \theta_{i,j+1} &= \theta_{i,j} + \Delta \tau \left(\frac{m(\theta_{i+1,j} - \theta_{i-1,j})}{2i\Delta \rho^2} + \frac{m(\theta_{i+1,j} - 2\theta_{i,j} + \theta_{i-1,j})}{\Delta \rho^2} \right); \\ \theta_{0,j+1} &= \theta_{0,j} + \frac{\Delta \tau (\theta_{1,j} - \theta_{0,j})}{\Delta \rho^2} (m+1); \\ \theta_{n,j+1} &= \theta_{n-1,j+1} + \Delta \rho Sk [\theta_{r,j+1}^4 - \theta_{p,j+1}^4], \end{aligned} \quad (5)$$

$$\theta_{r,j+1} = \theta_{r,j} + \Delta \tau Sk [\theta_{r,j}^4 - \theta_{n,j}^4] n_m,$$

где i – номер пространственного слоя; j – номер временного интервала.

Уравнение (5) представляет собой трансцендентное уравнение относительно температуры поверхности $\theta_{n,j+1}$ в последующий момент времени. Для его решения использовался метод последовательных приближений Ньютона.

Для оценки адекватности построенной математической модели и реализованной расчетной схемы полученное численное решение сравнивалось с известным аналитическим [3] при следующих исходных данных: $\theta' = 0,5$; $\theta'' = 1$; $n = 0,5$; $m = 0$; $Sk = 0,5$; продолжительность нагрева $Fo = 3$. Сравнение осуществлялось для температур греющих газов, поверхности металла и его осевого слоя, а также средней (среднеобъемной) температуры, определяемой по формулам:

$$\bar{\theta} = \frac{\theta_r - \theta_c}{n}; \theta_c = 1 - n\theta' - \frac{2nm}{3(3+m)}(\theta_n^0 - \theta'),$$

где θ_c – некоторый постоянный условный температурный параметр; m – коэффициент формы; θ_n^0 – температура поверхности в момент окончания инерционного этапа нагрева.

Графическое представление результатов сравнения приведено на рис. 1. В табл. 1 сведена динамика температурного поля по сечению пластины в течение всего периода нагрева.

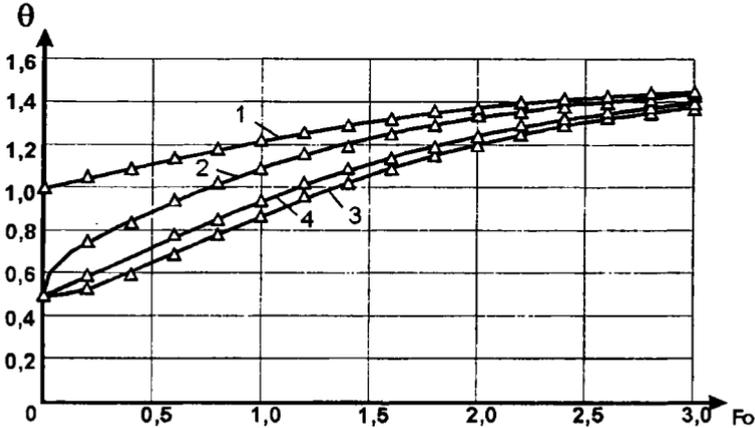


Рис. 1. Изменение температур печи и пластины, нагреваемой в условиях противотока: 1 – температура печи; 2 – температура поверхности; 3 – температура центра; 4 – среднееобъемная температура; Δ – данные работы [3]

На рис. 2 показана температура печи (а), поверхности металла (б) и изменение температурного перепада между поверхностью и центром нагреваемого металла (в) при различных значениях отношения водяных чисел n . При $n < 1$ наблюдаемый процесс имеет явно выраженный сходящийся характер, при $n > 1$ – расходящийся.

Результаты многопараметрических расчетов при варьировании величины критерия Старка показывают, что при $Sk \leq 0,15$ разность температур между поверхностью металла и его осевым слоем, установившаяся в конце инерционного периода нагрева, остается с течением времени практически неизменной (рис. 3), т. е. имеет место картина, аналогичная нагреву термически тонких тел, что хорошо согласуется с критерием, сформулированным в работе [11]. Определив температурный перепад в конце инерционного этапа нагрева, дальнейший расчет можно выполнять с использованием дифференциального уравнения теплопроводности не с распределенными, а с сосредоточенными параметрами.

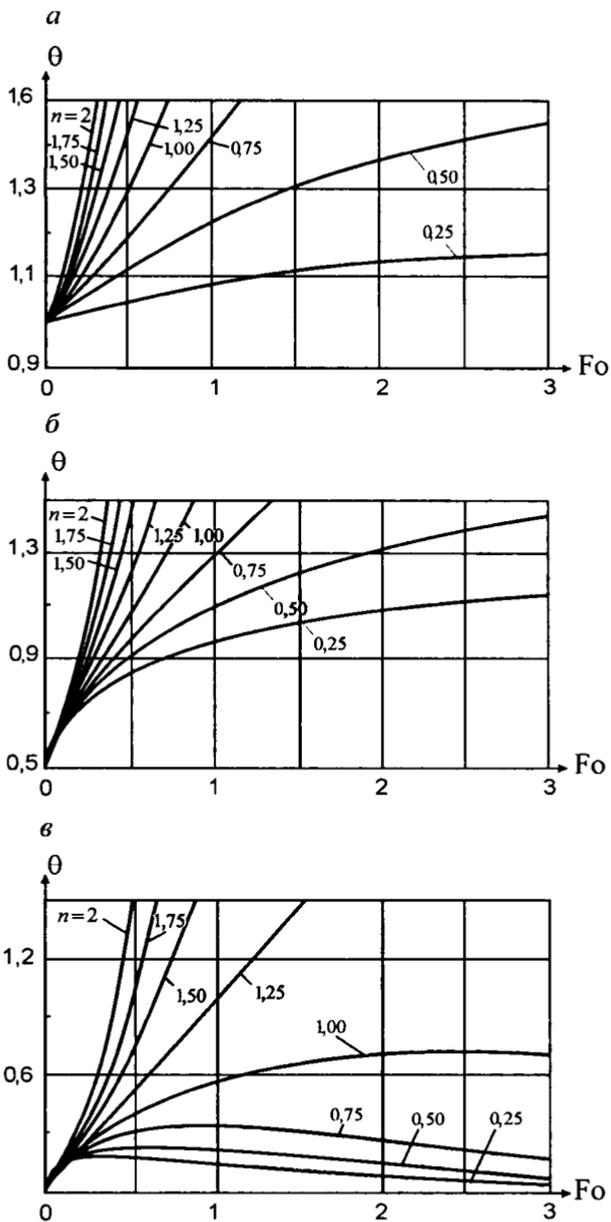


Рис. 2. Тенденция поведения температуры печи (*a*), поверхности пластины (*б*) и температурного перепада между поверхностью и центром нагреваемого металла (*в*) при различных значениях отношения водяных эквивалентов металла и газа n

Анализ результатов, представленных на рис. 1 – 3, позволяет сделать заключение о допустимости применения численного решения предложенной математической модели для исследования процессов нагрева в условиях противоточного теплообмена.

Таблица 1

Динамика температурного поля нагреваемой пластины

x/R	Fo						
	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
0.0	0,500	0,648	0,866	1,055	1,200	1,302	1,371
0.1	0,500	0,653	0,870	1,059	1,202	1,303	1,372
0.2	0,500	0,661	0,879	1,065	1,207	1,307	1,374
0.3	0,500	0,675	0,891	1,075	1,214	1,312	1,378
0.4	0,500	0,692	0,908	1,089	1,224	1,318	1,382
0.5	0,500	0,714	0,928	1,105	1,236	1,326	1,387
0.6	0,500	0,741	0,953	1,124	1,250	1,336	1,394
0.7	0,500	0,772	0,981	1,147	1,266	1,347	1,401
0.8	0,500	0,807	1,013	1,172	1,284	1,359	1,409
0.9	0,500	0,847	1,049	1,200	1,304	1,373	1,418
1.0	0,500	0,892	1,089	1,230	1,325	1,388	1,428

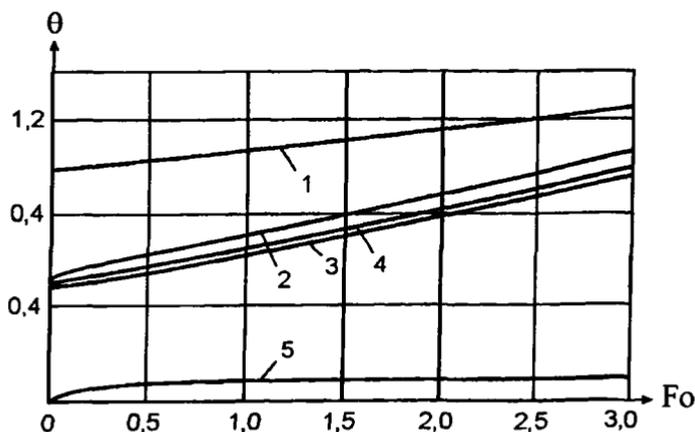


Рис. 3. Динамика температур печи и пластины при $Sk = 0,15$:

1 – температура печи; 2 – температура поверхности; 3 – температура центра; 4 – среднеобъемная температура; 5 – максимальный температурный перепад по сечению пластины

ЛИТЕРАТУРА

1. *Китаев Б. И.* Нагрев кусковых материалов в параллельном токе и противотоке газа или жидкости // Тр. Уральского индустр. ин-та. – Вып. 17. – Свердловск: Metallurgizdat, 1941.
2. *Иванцов Г. П., Любов Б. Я.* Прогрев кусковых материалов в условиях противотока // ДАН СССР. – 1952. – Т. 85. – № 5. – С. 993 – 995.
3. *Кавадеров А. В., Калугин В. Н.* Закономерности нагрева массивного тела излучением в противотоке // Нагрев металла и работа нагревательных печей: Сб. науч. тр. ВНИИМТ. – № 6. – Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – С. 59 – 70.
4. *Гольдфарб Э. М.* Теплотехника металлургических процессов. – М.: Metallurgia, 1967. – 439 с.
5. Тепло- и массообмен в плотном слое / Б. И. Китаев, В. П. Тимофеев, Б. А. Боковиков и др. – М.: Metallurgia, 1972. – 432 с.
6. *Постольник Ю. С.* Приближенные методы исследований в термомеханике. – Киев – Донецк: Вища шк., 1984. – 158 с.
7. *Постольник Ю. С.* К расчету температур и времени нагрева массивных тел при противоточном теплообмене / Изв. вузов. Черн. металлургия. – 1990. – № 6. – С. 84 – 86.
8. Исследование противоточного теплообмена в металлургии: состояние вопроса и проблемы развития / Ю. С. Постольник, В. И. Тимошпольский, А. П. Огурцов и др. // Metallurgia. – Вып. 25. – Мн.: Выш. шк., 2001. – С. 149 – 164.
9. Нагрев термочувствительных материалов в условиях противоточного радиационно-конвективного теплообмена / Ю. С. Постольник, В. И. Тимошпольский, В. В. Филиппов и др. // Литье и металлургия. – 2001. – № 3. – С. 53 – 56.
10. Расчет нагрева термомассивной пластины в условиях теоретического противотока / В. И. Тимошпольский, Ю. С. Постольник, С. М. Козлов и др. // Литье и металлургия. – 2001. – № 1. – С. 63 – 64.
11. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. Б. Стеблов и др. – Мн.: Выш. шк., 1992. – 217 с.