



There is offered the mathematical model for numerical analysis of the processes of scaling, proceeding at heating of the moving ingot.

There are carried out the computer calculations of the ingot heating in the furnaces with stage heating.

А. Н. ЧИЧКО, А. С. БОРОЗДИН, БНТУ

УДК 669.27:519

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ОКАЛИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ ДВИЖУЩИХСЯ СЛИТКОВ

Одна из важнейших задач теории математического моделирования процессов нагрева — численное моделирование процессов образования окалины. Особенно актуальна эта задача при исследовании процессов тепловой обработки слитков в печах с многоступенчатым нагревом. Моделирование динамики изменения окалины в условиях изменяющихся температур среды является актуальной задачей. Однако математический аппарат, используемый в расчетах окалинообразования, в значительной степени феноменологический. В то же время синтез численного моделирования процессов нагрева и феноменологических уравнений роста окалины дает возможность разработать новые методы расчета окалинообразования, что имеет как теоретический, так и практический интерес для металлургии.

Цель данной работы — разработка математической модели и ее компьютерная реализация для описания процесса высокотемпературного окисления заготовки в условиях ступенчатого нагрева в промышленных печах, а также исследование скорости роста окалины для различных областей поверхности слитка.

В основу математической модели роста окалины положено уравнение, являющееся функцией температуры (T_n), коэффициента теплоотдачи (α), толщины растущего слоя окалины (S) [1]:

$$\frac{dS}{dt} = v(S, T_n, \alpha). \quad (1)$$

Эта зависимость описывает многочисленные экспериментальные данные по росту окалины в стальных объектах, находящихся в печах. Учитывая, что температура при нагревании в разных пространственных точках различна как по величине, так и по скорости изменения, для моделирования температурного поля, входящего в уравнение (1), можно использовать дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda(T)}{c(T)\rho(T)} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \quad x, y, z, \tau \in \Omega, \quad (2)$$

где $c(T)$ — функция теплопроводности, Дж/(кг·К), $\rho(T)$ — функция плотности, кг/м³; $\lambda(T)$ — функция теплоемкости, Вт/(м·К); Ω — пространственно-временная область расчета.

Уравнения (1) и (2) представляют собой систему дифференциальных уравнений для моделирования процесса окалинообразования в трехмерном объекте, помещенном в изменяющееся температурное поле. Если объект перемещается внутри температурного неоднородного поля, то для него необходимо задание начальных и граничных условий, зависящих от скорости его движения. В качестве начальных и граничных условий, описывающих взаимодействие между нагревающей средой и поверхностью объекта, перемещающегося в печи с различными тепловыми зонами, можно предложить следующую систему уравнений:

$$T(x, y, z, 0) = T_0,$$

$$T(x, y, z, \tau) = \begin{cases} T_1, 0 \leq \tau < \frac{L_1}{v}, \\ T_2, \frac{L_1}{v} \leq \tau < \frac{L_1 + L_2}{v}, \\ \dots \\ T_n, \sum_{k=1}^{n-1} \frac{L_k}{v} \leq \tau < \sum_{k=1}^n \frac{L_k}{v}, \end{cases} \quad (3)$$

где T_0 — начальная температура заготовки; n — число тепловых зон в рабочем пространстве печи; T_i ($i=1, 2, \dots, n$) — значение температуры в i -й тепловой зоне; °С; L_i ($i=1, 2, \dots, n$) — протяженность i -й тепловой зоны, м; v — скорость перемещения заготовки вдоль рабочего пространства печи.

Расчет системы уравнений (1), (2) при наложении условий (3) проводили по экономичной локально-одномерной схеме со вторым порядком

точности [2]. Согласно целям поставленного исследования, была построена компьютерная модель промышленной печи, состоящей из пяти тепловых зон соответственно с температурами T_1, T_2, T_3, T_4 и T_5 для каждой зоны. Протяженность каждой температурной зоны по $L_1=L_2=L_3=L_4=L_5=L=3$ м. Таким образом, общая длина рабочего пространства моделируемой печи составила 15 м. Пространство печи заполняли воздухом со следующими

теплофизическими характеристиками: $\lambda=0,034$ Вт/(м·К), $c=1009$ Дж/(кг·К), $\rho=1,29$ кг/м³ и температурой, зависящей от конкретной тепловой зоны. В качестве материала для слитка была выбрана сталь марки 40Х с теплофизическими характеристиками, являющимися функциями от температуры слитка. В табл. 1 приведены значения теплоемкости и теплопроводности материала слитка, использованные при моделировании тепловых полей.

Таблица 1. Теплопроводность и теплоемкость для стали 40Х

| | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $T, ^\circ\text{C}$ | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
| $\lambda(T), \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ | 496,0 | 508,0 | 529,0 | 563,0 | 592,0 | 622,0 | 634,0 | 664,0 | 684,0 | 694,0 |
| $c, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ | 41,0 | 40,0 | 38,0 | 36,0 | 34,0 | 33,0 | 31,0 | 30,0 | 27,0 | 26,0 |
| $T, ^\circ\text{C}$ | 1000 | 1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 |
| $\lambda(T), \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ | 788,0 | 880,0 | 972,0 | 1064,0 | 1160,0 | 1120,0 | 1120,0 | 1120,0 | 1120,0 | 1120,0 |
| $c, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ | 25,5 | 25,0 | 24,7 | 24,4 | 24,2 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 |

Геометрические размеры сечения слитка были взяты следующие: 250x300 мм. Начальная температура слитка принималась равной $T_0 = 20$ °С. При численном моделировании процесса нагрева данный слиток двигался вдоль печи с равномерной скоростью $v = 0,004$ м/с. Компьютерные расчеты

проводили при пространственном шаге $h_x = h_y = h_z = h = 0,02$ м и временном шаге $\eta = 68,9$ с. На рис. 1 показаны схема рабочего пространства моделируемой печи (вид сверху), местоположение температурных зон и первоначальное положение слитка.

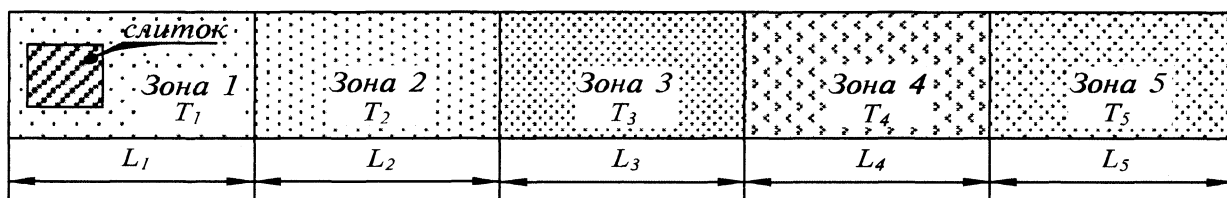


Рис. 1. Схема рабочего пространства печи, расположение температурных зон и слитка

Экспериментальные исследования показали, что при окислении для металлов с переменной валентностью образуется сложная окалина, состоящая из нескольких оксидных слоев. Соединения, наиболее богатые металлом, располагаются ближе всего к поверхности этого металла, а оксиды, содержащие наименьшее количество ме-

талла, — ближе к газовой среде. Так, при термическом окислении железо образует многослойную окалину, состоящую из оксидов $\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Fe}_3\text{O}_4, \text{FeO}$. Процентный состав многослойной окалины является также функцией от температуры, но присутствует явное преобладание FeO в составе окалины [3] (табл. 2).

Таблица 2. Массовые доли оксидов железа для различных температур

| | | | | |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Температура, °С | 700 | 800 | 900 | 950 |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3, \%$ | 1,0 | 0,75 | 0,66 | 0,78 |
| $\text{Fe}_3\text{O}_4, \%$ | 5,0 | 1,8 | 4,3 | 4,4 |
| $\text{FeO}, \%$ | Остальное | Остальное | Остальное | Остальное |

Функция окисления, которая использовалась в расчетах, имеет вид:

$$S(\tau, T) = 4,38\sqrt{\tau} \exp\left(-\frac{9000}{T}\right), \quad (4)$$

где S — толщина образованной окалины, мм; τ — время нахождения объекта в печи, с;

T — температура объекта окисляющейся поверхности, К.

На поверхности слитка были выбраны пять контрольных точек. В процессе моделирования для данных точек вычисленные значения температуры и окалины сохранялись в текстовый файл. На рис. 2 показаны поперечное сечение слитка и расположение выбранных контрольных точек.

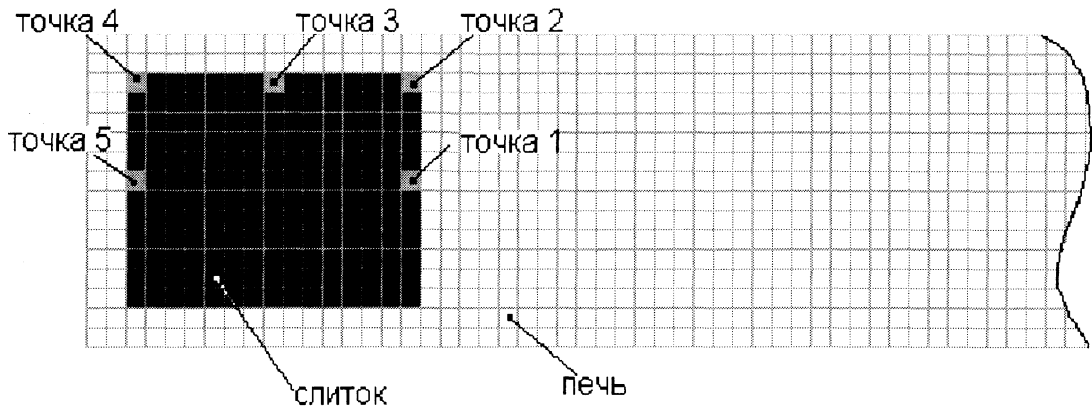


Рис. 2. Поперечное сечение слитка и расположение контрольных точек на поверхности слитка

При моделировании проводили варьирование значениями температур в зонах рабочего пространства печи. В табл. 3 приведены технологические варианты температур, для которых выполняли вычислительные эксперименты.

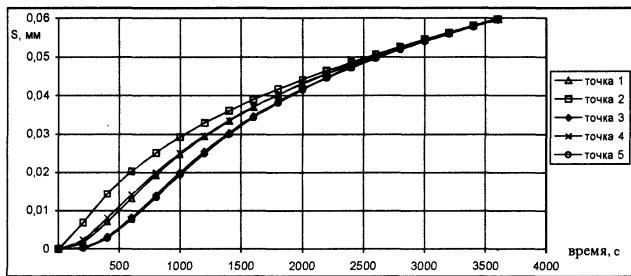
Таблица 3. Расчетные варианты конфигураций рабочего пространства объекта, движущегося в промышленной печи

| $T_1, ^\circ\text{C}$ | $T_2, ^\circ\text{C}$ | $T_3, ^\circ\text{C}$ | $T_4, ^\circ\text{C}$ | $T_5, ^\circ\text{C}$ |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 800 | 800 | 800 | 800 | 800 |
| 150 | 300 | 450 | 600 | 800 |
| 100 | 200 | 350 | 650 | 800 |

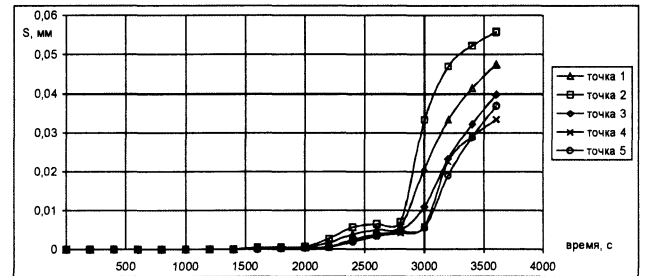
Моделирование проводили для первых 3600 с процесса нагрева. За данный временной промежуток при указанной скорости движения заготовки слиток проходит вдоль всего рабочего пространства печи.

Ниже приведены результаты проведенного моделирования. На рис. 3 показаны временные зависимости, описывающие динамику роста окалины для контрольных точек. Температурно-временные диаграммы для тех же точек представлены на рис. 4.

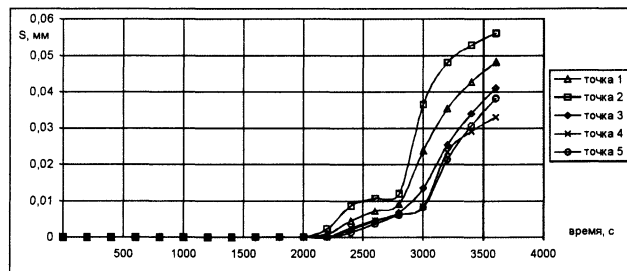
Анализ полученных результатов показывает, что изменение температуры и роста окалины происходит ступенчато практически для всех точек слитка. Причем величина ступенек зависит от



а



б

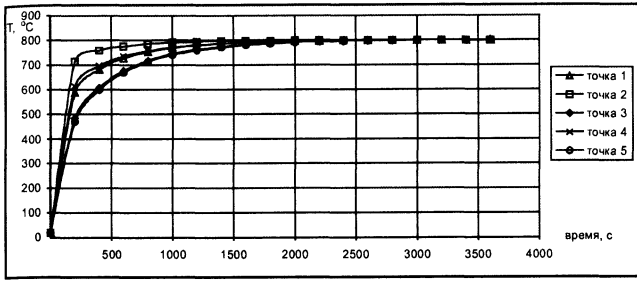


в

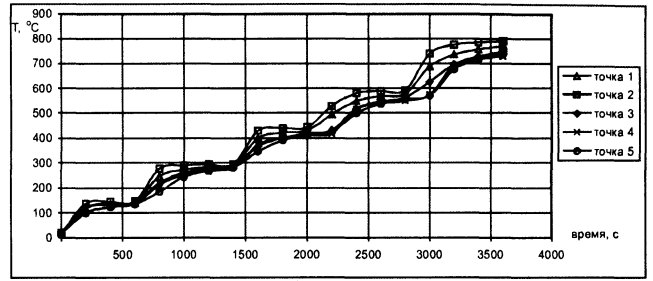
Рис. 3. Зависимости роста окалины от времени для контрольных точек слитка при его движении по температурным зонам для различных технологических вариантов: а - $T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = 800\text{ }^\circ\text{C}$; б - $T_1 = 150\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 300\text{ }^\circ\text{C}$, $T_3 = 450\text{ }^\circ\text{C}$, $T_4 = 600\text{ }^\circ\text{C}$, $T_5 = 800\text{ }^\circ\text{C}$; в - $T_1 = 100\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 200\text{ }^\circ\text{C}$, $T_3 = 350\text{ }^\circ\text{C}$, $T_4 = 650\text{ }^\circ\text{C}$, $T_5 = 800\text{ }^\circ\text{C}$

температуры зоны, в которую входит слиток. При равенстве температур в зонах происходит экспоненциальное изменение температуры без каких-

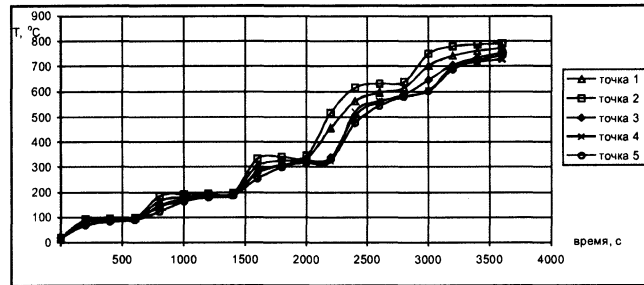
либо скачков. Чем неоднороднее температурное поле печи, тем сложнее изменяется температура в контрольных точках слитка.



а



б



в

Рис. 4. Температурные зависимости для контрольных точек слитка при его движении по температурным зонам для различных технологических вариантов: а - $T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = 800$ °С; б - $T_1 = 150$ °С, $T_2 = 300$ °С, $T_3 = 450$ °С, $T_4 = 600$ °С, $T_5 = 800$ °С; в - $T_1 = 100$ °С, $T_2 = 200$ °С, $T_3 = 350$ °С, $T_4 = 650$ °С, $T_5 = 800$ °С

Таким образом, проведенное исследование позволяет предложить трехмерные компьютерные модели процессов теплообмена и окисления для объектов сложной пространственной конфигурации, движущихся с заданной скоростью в неоднородном температурном поле. Данная работа может служить основой для разработки алгоритмов оптимизации промышленных режимов нагрева на основе численного моделирования процессов нагрева заготовок сложной пространственной конфигурации в промышленных печах.

Выводы

Предложена математическая модель для численного анализа окисления слитков,

движущихся с постоянной скоростью в печах со ступенчатым нагревом и заданным количеством температурных зон.

Представлены результаты компьютерных расчетов температуры и слоя окалины, формирующихся при движении слитка с постоянной скоростью в печах с пятью температурными зонами.

Литература

1. Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. Оптимальное управление нагревом металла. М.: Металлургия, 1972.
2. Чичко А.Н., Бороздин А.С. Численное моделирование процесса нагрева движущегося слитка // Литье и металлургия. 2003. №4. С. 60–63.
3. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1965.