

Зависимость температуры от времени при нагреве цилиндрической заготовки из стали 45 диаметром 100 мм

Расстояние от центра заготовки $x, м$	Время нагрева, с					
	0	0,0103	0,0206	0,0309	0,0412	0,0515
0	1173	1173	1173	1173	1173	1173
0,1	1202	1355	1455	1436	1458	1460
0,3	1262	1381	1421	1444	1461	1464
0,4	1292	1394	1428	1448	1463	1465
0,5	1322	1407	1435	1452	1464	1466
0,6	1352	1420	1443	1456	1466	1468
0,7	1382	1433	1450	1460	1468	1470
0,8	1412	1446	1458	1464	1469	1471
0,9	1442	1459	1465	1468	1471	1472
1,0	1472	1472	1472	1472	1472	1473

$O(h^2 + \tau)$ [4]. Рассматривалась консервативная четырехточечная разностная схема с опережением, построенная интегро-интерполяционным методом. Разностная схема строилась на равномерной прямоугольной сетке, а для решения разностных уравнений использовался алгоритм одномерной прогонки. Результаты вычислений представлены в табл. 1.

Предложен метод расчета температурных полей цилиндрических заготовок с учетом того, что при нагреве их поверхность покрывается окалиной. Уточнение температур по диаметру образца позволяет оптимизировать режим его нагрева. Полученные результаты дают возможность построить номограммы, с помощью которых можно определить температуру в любой точке образца, без экспериментальных замеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Энергетика, 1976. — 510 с. 2. Северденко В.П., Макушок Е.М., Ровин А.Н. Окалина при горячей обработке металлов давлением. — М.: Металлургия, 1977. — 208 с. 3. Темник В.Г., Темник А.В. Зависимость теплофизических свойств углеродистой стали от температуры // Изв. вузов СССР. Энергетика. — 1977. — № 12. — С. 119–121.

УДК 536.021

В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, Э.А. ГУРВИЧ,
канд-ты техн. наук, И.А. ТРУСОВА (БПИ)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СЛИТКА В СОВМЕЩЕННОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЕ В ИЗЛОЖНИЦЕ — НАГРЕВ

Важнейшая задача современной металлургии — создание высокоэффективных, энергосберегающих технологий получения проката повышенного качества. Существенная роль в ее решении отводится совершенствованию технологи-

ческих процессов, предшествующих прокатке, – получению слитков и их нагреву.

В отечественной и зарубежной литературе имеется ряд работ, в которых содержатся результаты экспериментальных и аналитических исследований процесса затвердевания и охлаждения слитков в изложнице [1–5]. Анализ физических явлений, сопутствующих этому процессу, позволяет моделировать его и проводить численные эксперименты с целью оптимизации технологических параметров. Несмотря на широкие возможности численного анализа, большинство исследователей при моделировании процессов формирования слитков не учитывают некоторые явления (деформацию изложницы и слитка, образование и рост газового зазора), которые оказывают существенное влияние на их динамику и приводят к погрешностям в расчетах. В частности, учет кинетики роста газового зазора и зависимости теплофизических свойств материалов изложницы и слитка от температуры позволяет точнее оценить энтальпию слитков в момент выбивки из изложниц и при посадке в нагревательный колодец.

Правильная оценка теплового состояния, особенно при нагреве не полностью затвердевшего слитка, является важнейшим фактором при разработке оптимальных параметров нагрева.

В настоящей работе предлагается математическая модель и численная реализация совмещенного технологического процесса затвердевание слитка → нагрев.

Температурное поле слитка и изложницы описывается дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности:

$$C_i(T)\rho_i(T) \frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_i \frac{\partial T_i(x, \tau)}{\partial x} \right] \quad (i = 1, 2). \quad (1)$$

Индексами 1, 2 обозначены соответственно характеристики слитка и изложницы.

Поставим граничные условия:
на внешней поверхности изложницы

$$\lambda_2(T) \frac{\partial T_2(x, \tau)}{\partial x} = \alpha_k (T_2 - T_{cp}) + \epsilon \sigma (T_2^4 - T_{cp}^4); \quad (2)$$

на поверхности слитка

$$-\lambda_1(T) \frac{\partial T_1}{\partial x} = \begin{cases} -\lambda_2(T) \frac{\partial T_2}{\partial x} & \text{– при идеальном контакте} \\ & \text{с изложницей;} \\ (T_1 - T_{ш}) \frac{\lambda_{ш}}{\delta} + \epsilon^* \sigma (T_1^4 - T_{ш}^4) = & \\ -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} & \text{– при наличии зазора.} \end{cases} \quad (3)$$

Начальные условия в общем случае имеют вид

$$T(x, 0) = \begin{cases} T_{10} & \text{– для слитка;} \\ T_{20} & \text{– для изложницы.} \end{cases} \quad (4)$$

На границе раздела фаз $x = \xi$ имеет место уравнение

$$\lambda_{1T} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=\xi+0} - \lambda_{1ж} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=\xi-0} = -r \rho_1 \frac{\partial \xi}{\partial \tau}. \quad (5)$$

Введя по аналогии с [6] δ -функцию Дирака, запишем уравнение (5) в виде

$$\rho_1 [C_1 + r\delta(T_1 - T_\Phi)] \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}), \quad (6)$$

$$\delta = \begin{cases} 0 & \text{при } T \in (T_\Phi - \Delta, T_\Phi + \Delta); \\ \neq 0 & \text{при } T \in (T_\Phi - \Delta, T_\Phi + \Delta), \end{cases} \quad T_{\Phi+\Delta}$$

где (6) должно удовлетворять условию нормировки $\int_{T_{\Phi-\Delta}}^{T_{\Phi+\Delta}} \delta(T_1 - T_\Phi, \Delta) dT_1 = 1$. Здесь

$$\rho_1 C_1, \lambda_1 = \begin{cases} \rho_{1T}, C_{1T}, \lambda_{1T} & \text{при } T < T_\Phi, \\ \rho_{1ж}, C_{1ж}, \lambda_{1ж} & \text{при } T > T_\Phi; \end{cases}$$

T_Φ — температура фазового перехода.

В выражениях (1)...(6) ρ , λ , C — соответственно плотность, теплопроводность и теплоемкость; r — скрытая теплота кристаллизации; δ — газовый зазор ($\delta = \delta(\tau)$); $T_{ш}$ — температура внутренней загрязненной поверхности изложницы; $\epsilon^* \sigma$ — приведенный коэффициент излучения между слитком и внутренней поверхностью изложницы; $\epsilon \sigma$ — приведенный коэффициент излучения между внешней поверхностью изложницы и окружающей средой; α_k — конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи; T_{cp} — температура среды; λ_v — коэффициент теплопроводности воздуха.

Сглаживая в уравнении (6) функции ρ , C , λ в интервале $(T_\Phi - \Delta, T_\Phi + \Delta)$, получаем выражение

$$\tilde{\rho}_1(T_1) \tilde{C}_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} [\tilde{\lambda}_1(T_1) \frac{\partial T_1}{\partial x}],$$

по форме совпадающее с исходным уравнением (1).

Теплофизические свойства слитка и изложницы описывались экспериментальными выражениями [6, 7] с учетом конкретной марки стали. Скрытая теплота кристаллизации учитывалась путем введения эффективной теплоемкости в интервале температур $(T_{лик}, T_{сол})$:

$$C_{эф} = \frac{C_{ж} + C_{т}}{2} + \frac{r}{T_{лик} - T_{сол}},$$

где $T_{сол}$, $T_{лик}$ — температура соответственно солидуса и ликвидуса.

Используя результаты работ [1–5], начало образования газового зазора соответствует моменту формирования корки слитка, способной удержать гидростатический напор жидкой фазы, объем которой примерно равен (в зависимости от высоты напора) 10...30 % от объема затвердевающего слитка.

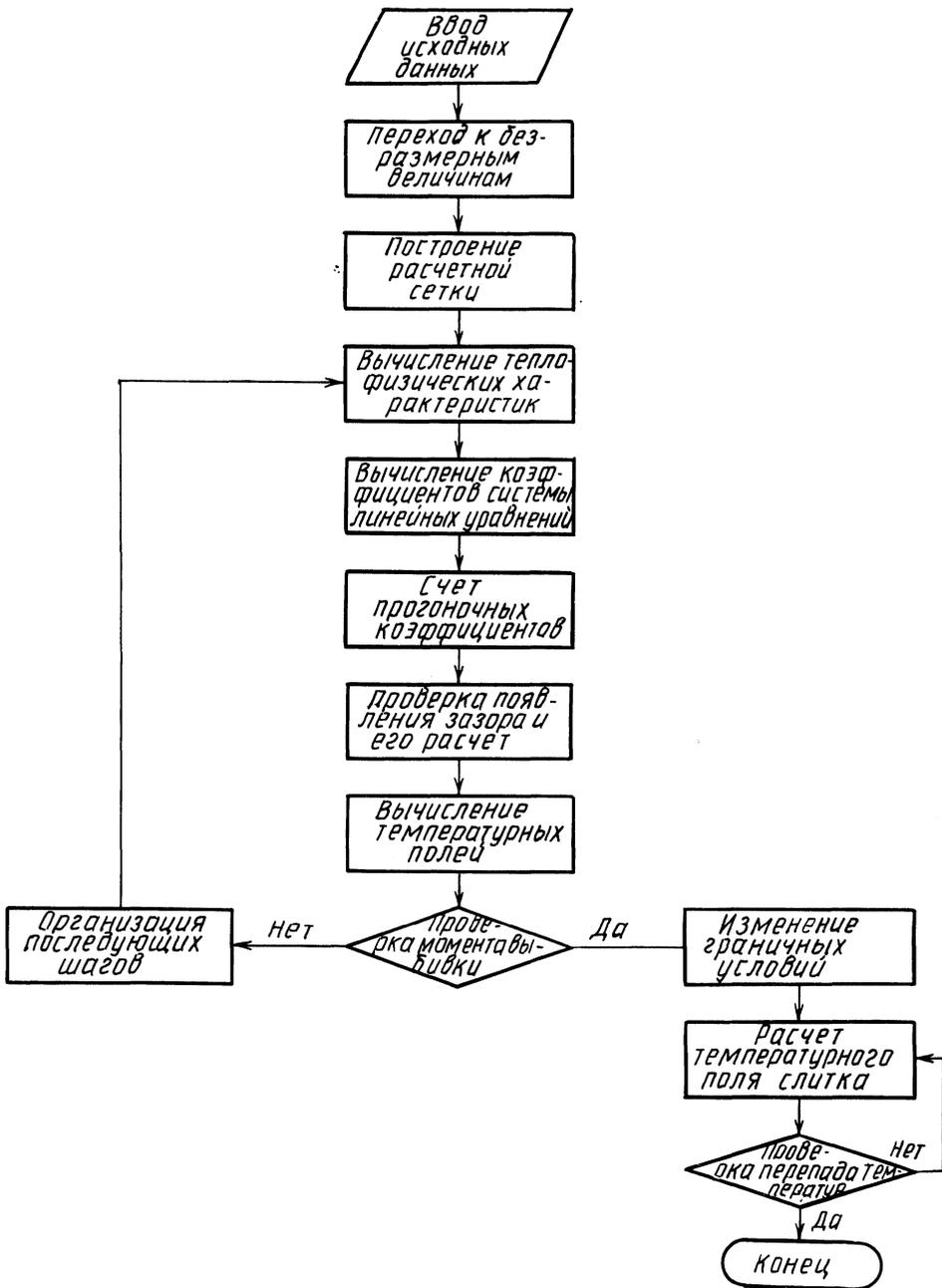


Рис. 1. Блок-схема для расчета процессов затвердевания, охлаждения и нагрева слитка.

Зазор между слитком и изложницей в различные моменты времени определялся как сумма термических расширений – сжатий внутренней поверхности изложницы и корки слитка.

После стрипперования и выбивки слитка из изложницы задача его последующего нагрева также описывается исходным уравнением (1). Условие на границе слиток – среда при конвективно-радиационном теплообмене имеет вид

$$-\lambda_1(T) \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} = \alpha_{\text{к}}^{\text{печ}} (T_{\text{печ}} - T_1) + \sigma_{\text{пр}}^{\text{печ}} (T_{\text{печ}}^4 - T_1^4), \quad (7)$$

где $T_{\text{печ}}$ – температура печи; $\alpha_{\text{к}}^{\text{печ}}$ – коэффициент теплообмена конвекцией; $\sigma_{\text{пр}}^{\text{печ}}$ – приведенный коэффициент теплообмена излучением в печи.

Начальное распределение температур в момент посады слитка в колодец соответствует конечному в момент его выбивки из изложницы.

В качестве математического аппарата при решении системы уравнений (1)...(5) использовали метод конечных разностей по неявной схеме Кранка–Никольсона. Решение полученных линейных алгебраических уравнений осуществляли методом прогонки.

В соответствии с разработанным алгоритмом выполнен расчет затвердевания и нагрева слитка при следующих исходных данных: $R = 0,35$ м; толщина изложницы – 0,16 м; сталь 20, $T_{\text{лик}} = 1512$ °С; $T_{\text{сол}} = 1487$ °С; $r = 290 \times 10^3$ Дж/кг. В данном расчете принималось, что в момент стрипперования слиток полностью затвердевший.

На рис. 1 приведена блок-схема расчета процесса затвердевания, охлаждения и нагрева слитка.

Расчет осуществлялся на ЭЦВМ СМ-1600.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р а д д л Р.У. Затвердевание отливок. – М.: Машгиз, 1960. – 391 с.
2. С а м о й л о в и ч Ю.А. Формирование слитка. – М.: Металлургия, 1977. – 159 с.
3. Ш м р г а Л. Затвердевание и кристаллизация стальных слитков. – М.: Металлургия, 1985. – 248 с.
4. К о з д о б а Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: Наука, 1975. – 227 с.
5. Г о л ь д ф а р б Э.М. Теплотехника металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1967. – 220 с.
6. Е с ь м а н Р.И., Ж м а к и н Н.П., Ш у б Л.И. Расчеты процессов литья. – Минск: Выш. шк., 1977. – 261 с.
7. М а к о в с к и й В.А. Эмпирические формулы для выражения температурной зависимости теплофизических свойств стали // Сталь. – 1972. – № 1. – С. 87–89.

УДК 536.02:621.24:669.046

В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, канд. техн. наук,
В.А. ГУГЛЯ, Т.Ю. ГУГЛЯ, Н.Л. МАНДЕЛЬ (БПИ)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУР, НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОМ НАГРЕВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЛИТКОВ И ЗАГОТОВОК

Вопросы математического моделирования тепловых процессов в массивных цилиндрических слитках и заготовках, предназначенных для горячего деформирования на прошивном или прокатном станах, освещены во многих литературных источниках [1–4].