

УДК 519.8

АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ПРОКАТНЫХ СТАНАХ

Оспанова Т.Т., Шарипбаев А.А., Ниязова Р.С.

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, e-mail: enu@enu.kz

Настоящая статья посвящена исследованию численного моделирования распределения температурного поля в многоклеточных станах для линии непрерывного литья и прокатки металлической катанки. В работе использован наиболее простой в использовании, безусловно устойчивый, экономичный разностный метод, метод разделения переменных многомерной задачи на цепочку одномерных задач, метод суммарной аппроксимации, локально-одномерные схемы. Построен алгоритм численного моделирования распределения температурного поля по клетям прокатного стана. Решение трехмерной задачи распределения температурного поля позволяет на основе экспериментальных данных находить температуру по всей полосе металлической катанки в клетях прокатного стана. Расчет распределения температурного поля в очаге деформации металлической катанки выполнен по неявной схеме. Расчеты приведены на графиках. В них дан анализ погрешности ошибок.

Ключевые слова: прокатка, клеть, температурное поле, очаг деформации, локально-одномерные схемы

ALGORITHM OF NUMERICAL MODELLING OF DISTRIBUTION OF TEMPERATURE FIELD IN ROLLING MILL

Ospanova T.T., Sharipbaev A.A., Niyazova R.S.

Eurasian National University named after L.N. Gumilyev, Astana, e-mail: enu@enu.kz

This article is dedicated to the study of numerical simulation of temperature field distribution in rolling mill with many cages for continuous casting and rolling stripe of metal wire. In work the simplest is used in use, certainly a steady, economic difference method, a method of division of variables of a multidimensional task into a chain of one-dimensional tasks, a method of total approximation, the locally one-dimensional scheme. The algorithm of numerical modeling of distribution of a temperature field on cages of the rolling mill is constructed. Solutions of the three-dimensional temperature field distribution tasks based on experimental data allows finding the temperature across the strip of metal rod in a rolling mill stands. Calculation of the distribution of temperature field in hearth of deformation of a metal rod was realized on implicit scheme. The calculations are shown in the graphs. It provides an analysis of the error of errors.

Keywords: rolling, cage, temperature field, hearth of deformation, the locally one-dimensional scheme

В условиях обработки металлов давлением среди таких факторов, влияющих на пластичность, как состав и структура деформируемого металла, характер напряженного состояния при деформации, скорость деформации и др., – является температура деформации.

Вопросами моделирования температурных полей, описывающими температурные процессы, происходящие в очаге деформации и технологическом потоке стана, занимались многие ученые. Для создания данного алгоритма была использована модель [1], где для практических расчетов температуры в многоклеточных станах используется упрощенная модель, которая имеет вид

$$U_i = U_{i-1} - \Delta U_u - \Delta U_k - \Delta U_b + \Delta U_d \quad (1)$$

где U_i – температура на выходе из i -й клетки; U_{i-1} – температура на выходе из предыдущей клетки или температура начального нагрева заготовки в нагревательном устройстве; ΔU_u – теплопередача излучением в окружающую среду; ΔU_k – конвективная теплопередача; ΔU_b – контактный теплообмен с рабочи-

ми валками; ΔU_d – разогрев металла за счет энергии пластической деформации.

В работе [2] эта модель реализована с помощью метода конечных элементов.

При численном решении задач распределения температурного поля по клетям закрытого прокатного стана для линии непрерывного литья и прокатки металлической катанки одним из наиболее употребительным методом является метод сеток.

Простота и универсальность характерны для разностных методов решения краевых задач математической физики в регулярных расчетных областях, а использование нерегулярных сеток сближает метод конечных разностей с методом конечных элементов.

В работе был использован экономичный разностный метод для решения многомерных уравнений в частных производных [3], метод суммарной аппроксимации, который позволяет получить абсолютно устойчивые сходящиеся локально-одномерные схемы для уравнений параболического типа.

Цель исследования

Рассмотрим задачу для уравнения теплопроводности в виде [2]:

$$c\rho \frac{\partial U}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} U) + \tau_s H, \quad (2)$$

где c – удельная теплоемкость металла; ρ – массовая плотность металла; λ – коэффициент теплопроводности; τ_s – сопротивление металла пластической деформации сдвига; H – интенсивность скоростей деформации сдвига, со следующими граничными условиями:

1. На входе в очаг деформации температура металла известна.

2. На свободной поверхности имеет место теплопередача излучением в окружающую среду, которая описывается формулой Стефана – Больцмана.

3. На контактной поверхности имеет место теплообмен между деформируемым металлом и поверхностью валков, описываемый выражением

$$\lambda \frac{\partial U}{\partial n} = \alpha_s (U - U_b), \quad (3)$$

где α_s – коэффициент теплопередачи на контактной поверхности; U_b – температура валков.

4. На остальных поверхностях, ограничивающих 1/4 часть очага деформации, тепловой поток равен нулю.

По теории в большинстве процессов обработки металла давлением форма заготовки отличается от формы готового изделия, определяемой формой инструмента. Чем ближе элемент находится к углу сечения, тем меньшее удлинение он получит. Поэтому стороны сечения получают выпуклую форму. Квадратное сечение будет приближаться к круговому, а прямоугольное – сначала к эллипсу, а затем все равно к кругу. Так как черновые калибры предназначены для постепенного формирования прокатываемого профиля, а также к черновым относят калибры простой формы (прямоугольный, ромб, овал, круг, квадрат), для эксперимента при выборе формы калибров клетей было взято прямоугольное сечение.

Разностное уравнение

Рассмотрим трехмерное параболическое уравнение второго порядка [3]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \sum_{\alpha=1}^3 L_{\alpha} U + f(x, t); \quad (4)$$

$$\frac{U^{j+\frac{\alpha}{3}} - U^{j+\frac{\alpha-1}{3}}}{\tau} = \Lambda_{\alpha} \left(\sigma U^{j+\frac{\alpha}{3}} + (1-\sigma) U^{j+\frac{\alpha-1}{3}} \right) + \Phi_{\alpha}^{j+\frac{\alpha}{3}}; \quad \alpha = 1, 2, 3, \quad x \in \omega_h, \quad (10)$$

где σ – произвольное число. При $\sigma = 1$ получим чисто неявную локально-одномерную схему, а при $\sigma = 0$ – явную ЛОС.

$$L_{\alpha} U = \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left(k_{\alpha}(x, t) \frac{\partial U}{\partial x_{\alpha}} \right); \quad (5)$$

$$k_{\alpha}(x, t) \geq c_1 > 0; \quad c_1 = \text{const}, \quad (6)$$

где $x = (x_1, x_2, x_3)$ – точка 3-мерного пространства с координатами x_1, x_2, x_3 . Пусть G – произвольная 3-мерная область с границей Γ , $\bar{G} = G + \Gamma$,

$$\bar{Q}_T = \bar{G} \times [0 \leq t \leq T]; \quad Q_T = G \times (0 < t \leq T].$$

Требуется найти непрерывное в цилиндре $\bar{Q}_T$ решение уравнения (6), удовлетворяющее краевому условию

$$U = \mu(x, t) \quad \text{при } x \in \Gamma, \quad 0 \leq t \leq T \quad (7)$$

и начальному условию

$$U(x, 0) = U_0(x), \quad \text{при } x \in \bar{G}. \quad (8)$$

Как обычно, предполагается, что эта задача имеет единственное решение $U = U(x, t)$, обладающее всеми требуемыми по ходу изложения производными.

При построении локально-одномерной схемы формально заменим трехмерное уравнение цепочкой одномерных уравнений, т.е. аппроксимируем с шагом $\frac{\tau}{3}$ последовательно операторы

$$\Re_{\alpha} U = \frac{1}{3} \frac{\partial U}{\partial t} - (L_{\alpha} U + f_{\alpha}), \quad \alpha = 1, 2, 3, \quad (9)$$

где f_{α} удовлетворяет условию $\sum_{\alpha=1}^3 f_{\alpha} = f$.

Для аппроксимации $L_{\alpha} U + f_{\alpha}$ на пространственной сетке ω_h воспользуемся однородным разностным оператором второго порядка аппроксимации $\Lambda_{\alpha} u + \Phi_{\alpha}$. Граничные условия и правая часть Φ_{α} берутся в произвольные моменты времени:

$$\Phi_{\alpha}^{j+\frac{\alpha}{3}} = f_{\alpha}(x, t_{j+\frac{\alpha}{3}});$$

$$\mu^{j+\frac{\alpha}{3}} = \mu(x, t_{j+\frac{\alpha}{3}}), \quad \alpha = 1, 2, 3.$$

Аппроксимируя каждое уравнение теплопроводности номера α на интервале $t_{j+(a-1)/3} < t \leq t_{j+a/3}$ двухслойной схемой с весами, получим цепочку p одномерных схем, которая называется ЛОС:

Рассмотрим чисто неявную ЛОС:

$$\frac{y^{j+\frac{\alpha}{3}} - y^{j+\frac{\alpha-1}{3}}}{\tau} = \Lambda_{\alpha} y^{j+\frac{\alpha}{3}} + \Phi_{\alpha}^{j+\frac{\alpha}{3}}; \quad \alpha = 1, 2, 3, \quad x \in \omega_h. \quad (11)$$

Краевое условие:

$$y^{j+\frac{\alpha}{3}} = \mu^{j+\frac{\alpha}{3}} \quad \text{при } x \in \gamma_{h,\alpha}, \quad j = 0, 1, \dots, j_0; \quad \alpha = 1, 2, 3. \quad (12)$$

Начальное условие:

$$y(x, 0) = u_0(x). \quad (13)$$

Остановимся более подробно на (11):

$$\begin{aligned} \frac{y^{j+\frac{1}{3}} - y^j}{\tau} &= \Lambda_1 \left(y^{j+\frac{1}{3}} \right) + f_1^{j+\frac{1}{3}}; & \frac{y^{j+\frac{2}{3}} - y^{j+\frac{1}{3}}}{\tau} &= \Lambda_2 \left(y^{j+\frac{2}{3}} \right) + f_2^{j+\frac{2}{3}}; \\ \frac{y^{j+1} - y^{j+\frac{2}{3}}}{\tau} &= \Lambda_3 \left(y^{j+1} \right) + f_3^{j+1}, & j &= \overline{1, m-1}. \end{aligned} \quad (14)$$

Краевые условия:

$$y^{j+\frac{\alpha}{3}} \Big|_{x_{\alpha}=0} = \mu \left(x, t_{j+\frac{\alpha}{3}} \right) \Big|_{x_{\alpha}=0}; \quad y^{j+\frac{\alpha}{3}} \Big|_{x_{\alpha}=l_{\alpha}} = \mu \left(x, t_{j+\frac{\alpha}{3}} \right) \Big|_{x_{\alpha}=l_{\alpha}}, \quad \alpha = 1, 2, 3. \quad (15)$$

Начальное условие:

$$y^0 = U_0(x). \quad (16)$$

Рассмотрим каждое из трех уравнений (14) отдельно. Первое из уравнений (14) записываем в виде

$$\begin{aligned} (y_1)_{i_1}^{j+1} - \tau \left(\frac{(k_1)_{i_1+1}^{j+1} \cdot (y_1)_{i_1+1}^{j+1} - ((k_1)_{i_1+1}^{j+1} + (k_1)_{i_1}^{j+1}) \cdot (y_1)_{i_1}^{j+1} + (k_1)_{i_1}^{j+1} \cdot (y_1)_{i_1-1}^{j+1}}{h_1^2} \right) &= \Phi_1^j; \\ \Phi_1^j &= (y_3)^j + \tau \cdot f_1^j, \end{aligned} \quad (17)$$

где $j = \overline{0, m-1}$, $i_1 = \overline{1, n_1-1}$, $i_2 = \overline{0, n_2}$, $i_3 = \overline{0, n_3}$, $f_1^j = f \left(x, t_j + \frac{\tau}{2} \right)$, $j = \overline{1, m}$.

Выражение (17) перепишем в виде

$$\left(1 + \frac{\tau}{h_1^2} ((k_1)_{i_1+1}^{j+1} + (k_1)_{i_1}^{j+1}) \right) \cdot (y_1)_{i_1}^{j+1} - \frac{\tau}{h_1^2} (k_1)_{i_1+1}^{j+1} \cdot (y_1)_{i_1+1}^{j+1} - \frac{\tau}{h_1^2} (k_1)_{i_1}^{j+1} \cdot (y_1)_{i_1-1}^{j+1} = \Phi_1^j. \quad (18)$$

Обозначая через

$$A_{i_1} = \frac{\tau}{h_1^2} (k_1)_{i_1}^{j+1}; \quad C_{i_1} = 1 + (A_{i_1+1} + A_{i_1}); \quad F_{i_1} = \Phi_1^j,$$

получим

$$A_{i_1} \cdot (y_1)_{i_1-1}^{j+1} - C_{i_1} \cdot (y_1)_{i_1}^{j+1} + A_{i_1+1} \cdot (y_1)_{i_1+1}^{j+1} = -F_{i_1}, \quad i_1 = \overline{1, n_1-1}, \quad i_2 = \overline{1, n_2-1}, \quad i_3 = \overline{1, n_3-1}. \quad (19)$$

Граничные условия в общем виде:

$$(y_1)_0^{j+1} = \chi_1 \cdot (y_1)_1^{j+1} + \mu_{11}^{j+1}; \quad (y_1)_{n_1}^{j+1} = \chi_2 \cdot (y_1)_{n_1-1}^{j+1} + \mu_{12}^{j+1}, \quad (20)$$

здесь $\chi_1 = 0$, $\chi_2 = 0$ – граничные условия 1-го рода, $\mu_{11}^{j+1} = y^0$; $\mu_{21}^{j+1} = U_i$, где U_i – температура на выходе из i -й клетки в (1).

Далее подставляя известные значения y^0 , вычисляем F_1 , затем методом прогонки решаем задачу (19) во всех узлах сетки ω_h :

$$\alpha_{i+1} = \frac{A_{i+1}}{C_i - A_i \cdot \alpha_i}; \quad \alpha_1 = \chi_1; \quad \beta_{i+1} = \frac{A_{i+1} \cdot \beta_i + F_i}{C_i - A_i \cdot \alpha_i}; \quad \beta_1 = \mu_{11}^0; \quad (y_1)_{n_1}^{j+1} = \frac{\mu_{12}^{j+1} + \chi_2 \cdot \beta_{n_1}}{1 - \chi_2 \cdot \alpha_{n_1}};$$

$$(y_1)_{i_1}^{j+1} = \alpha_{i+1} \cdot (y_1)_{i+1}^{j+1} + \beta_{i+1}, \quad i_1 = \overline{n_1 - 1, 0}, \quad i_2 = \overline{1, n_2 - 1}, \quad i_3 = \overline{1, n_3 - 1}. \quad (21)$$

Второе из уравнений (14) записываем в виде

$$(y_2)_{i_1}^{j+1} - \tau \left(\frac{(k_2)_{i_2+1}^{j+1} \cdot (y_2)_{i_2+1}^{j+1} - ((k_2)_{i_2+1}^{j+1} + (k_2)_{i_2}^{j+1}) \cdot (y_2)_{i_2}^{j+1} + (k_2)_{i_2}^{j+1} \cdot (y_2)_{i_2-1}^{j+1}}{h_2^2} \right) = \varphi_2^j;$$

$$\varphi_2^j = (y_1)^{j+1} + \tau \cdot f_2^j, \quad (22)$$

где $j = \overline{0, m-1}$, $i_1 = \overline{1, n_1 - 1}$, $i_2 = \overline{0, n_2}$, $i_3 = \overline{0, n_3}$, $f_2^j = f\left(x, t_j + \frac{\tau}{2}\right)$, $j = \overline{1, m}$.

Выражение (22) перепишем в виде

$$\left(1 + \frac{\tau}{h_2^2} ((k_2)_{i_2+1}^{j+1} + (k_2)_{i_2}^{j+1}) \right) \cdot (y_2)_{i_2}^{j+1} - \frac{\tau}{h_2^2} (k_2)_{i_2+1}^{j+1} \cdot (y_2)_{i_2+1}^{j+1} - \frac{\tau}{h_2^2} (k_2)_{i_2}^{j+1} \cdot (y_2)_{i_2-1}^{j+1} = \varphi_2^j. \quad (23)$$

Обозначая через

$$A_{i_2} = \frac{\tau}{h_2^2} (k_2)_{i_2}^{j+1}; \quad C_{i_2} = 1 + (A_{i_2+1} + A_{i_2}); \quad F_{i_2} = \varphi_2^j$$

получим

$$A_{i_2} \cdot (y_2)_{i_2-1}^{j+1} - C_{i_2} \cdot (y_2)_{i_2}^{j+1} + A_{i_2+1} \cdot (y_2)_{i_2+1}^{j+1} = -F_{i_2}; \quad i_1 = \overline{1, n_1 - 1}, \quad i_2 = \overline{1, n_2 - 1}, \quad i_3 = \overline{1, n_3 - 1}. \quad (24)$$

Граничные условия в общем виде:

$$(y_2)_0^{j+1} = \chi_1 \cdot (y_2)_1^{j+1} + \mu_{21}^{j+1}; \quad (y_2)_{n_2}^{j+1} = \chi_2 \cdot (y_2)_{n_2-1}^{j+1} + \mu_{22}^{j+1}, \quad (25)$$

где $\chi_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \alpha_\beta \cdot h_2}$; $\chi_2 = \frac{\lambda}{\lambda + \alpha_\beta \cdot h_2}$ – граничные условия 3-го рода.

Далее подставляя известные значения y_1^{j+1} , вычисляем F_2 , затем методом прогонки решаем задачу (24) во всех узлах сетки ω_h :

$$\alpha_{i_2+1} = \frac{A_{i_2+1}}{C_{i_2} - A_{i_2} \cdot \alpha_{i_2}}; \quad \alpha_1 = \chi_1; \quad \beta_{i_2+1} = \frac{A_{i_2+1} \cdot \beta_{i_2} + F_{i_2}}{C_{i_2} - A_{i_2} \cdot \alpha_{i_2}}; \quad \beta_1 = \mu_{21}^{j+1}; \quad (y_2)_{n_2}^{j+1} = \frac{\mu_{22}^{j+1} + \chi_2 \cdot \beta_{n_2}}{1 - \chi_2 \cdot \alpha_{n_2}};$$

$$(y_2)_{i_2}^{j+1} = \alpha_{i_2+1} \cdot (y_2)_{i_2+1}^{j+1} + \beta_{i_2+1}, \quad i_1 = \overline{n_1 - 1, 0}, \quad i_2 = \overline{1, n_2 - 1}, \quad i_3 = \overline{1, n_3 - 1}. \quad (26)$$

Третье из уравнений (14) записываем в виде

$$(y_3)_{i_3}^{j+1} - \tau \left(\frac{(k_3)_{i_3+1}^{j+1} \cdot (y_3)_{i_3+1}^{j+1} - ((k_3)_{i_3+1}^{j+1} + (k_3)_{i_3}^{j+1}) \cdot (y_3)_{i_3}^{j+1} + (k_3)_{i_3}^{j+1} \cdot (y_3)_{i_3-1}^{j+1}}{h_3^2} \right) = \varphi_3^j;$$

$$\varphi_3^j = (y_2)^{j+1} + \tau \cdot f_3^j, \quad (27)$$

где $j = \overline{0, m-1}$, $i_1 = \overline{1, n_1 - 1}$, $i_2 = \overline{0, n_2}$, $i_3 = \overline{0, n_3}$, $f_3^j = f\left(x, t_j + \frac{\tau}{2}\right)$, $j = \overline{1, m}$.

Выражение (27) перепишем в виде

$$\left(1 + \frac{\tau}{h_3^2} ((k_3)_{i_3+1}^{j+1} + (k_3)_{i_3}^{j+1}) \right) \cdot (y_3)_{i_3}^{j+1} - \frac{\tau}{h_3^2} (k_3)_{i_3+1}^{j+1} \cdot (y_3)_{i_3+1}^{j+1} - \frac{\tau}{h_3^2} (k_3)_{i_3}^{j+1} \cdot (y_3)_{i_3-1}^{j+1} = \varphi_3^j. \quad (28)$$

Обозначая через

$$A_{i_3} = \frac{\tau}{h_3^2} (k_3)_{i_3}^{j+1}; \quad C_{i_3} = 1 + (A_{i_3+1} + A_{i_3}); \quad F_{i_3} = \varphi_3^j$$

получим

$$A_{i_3} \cdot (y_3)_{i_3-1}^{j+1} - C_{i_3} \cdot (y_3)_{i_3}^{j+1} + A_{i_3+1} \cdot (y_3)_{i_3+1}^{j+1} = -F_{i_3}, \quad i_1 = \overline{1, n_1 - 1}, \quad i_2 = \overline{1, n_2 - 1}, \quad i_3 = \overline{1, n_3 - 1}. \quad (29)$$

Граничные условия в общем виде:

$$(y_3)_0^{j+1} = \chi_1 \cdot (y_3)_1^{j+1} + \mu_{31}^{j+1}; \quad (y_3)_{n_3}^{j+1} = \chi_2 \cdot (y_3)_{n_3-1}^{j+1} + \mu_{32}^{j+1}, \quad (30)$$

где $\chi_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \alpha_\beta \cdot h_3}$; $\chi_2 = \frac{\lambda}{\lambda + \alpha_\beta \cdot h_3}$ – граничные условия 3-го рода.

Далее подставляя известные значения y_2^{j+1} вычисляем F_3 , затем методом прогонки решаем задачу (29) во всех узлах сетки ω_h :

$$\alpha_{i_3+1} = \frac{A_{i_3+1}}{C_{i_3} - A_{i_3} \cdot \alpha_{i_3}}; \quad \alpha_1 = \chi_1; \quad \beta_{i_3+1} = \frac{A_{i_3+1} \cdot \beta_{i_3} + F_{i_3}}{C_{i_3} - A_{i_3} \cdot \alpha_{i_3}}; \quad \beta_1 = \mu_{31}^0; \quad (y_3)_{n_3}^{j+1} = \frac{\mu_{32}^{j+1} + \chi_2 \cdot \beta_{n_3}}{1 - \chi_2 \cdot \alpha_{n_3}};$$

$$(y_3)_{i_3}^{j+1} = \alpha_{i_3+1} \cdot (y_3)_{i_3+1}^{j+1} + \beta_{i_3+1}, \quad i_1 = \overline{n_1 - 1, 0}, \quad i_2 = \overline{1, n_2 - 1}, \quad i_3 = \overline{1, n_3 - 1}. \quad (31)$$

Решением является $(y_3)_{i_3}^{j+1}$.

Результаты численных расчетов.

Для тестирования предложенного алгоритма численно решена задача (6) в параллелепипеде и были получены относительные погрешности вычислений ε_{ij} в соответствующей норме [4]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\max |y^j - y^{j-1}|}{\max |y^0|}, \quad i = \overline{1, 11}, \quad j = 1, 2, \dots, j_0,$$

где j – номер итерации; i – номера клеток.

Результаты вычислений относительной погрешности ε_{ij} представлены на рис. 1. При реализации вычислительного процесса каждое последующее приближение к решению точнее предыдущего, т.е. погрешность ε_{ij} с каждой итерацией уменьшается. Итак, итерационный процесс сходится.

Разработанный алгоритм решения задачи температурных режимов учитывает изменения температуры непосредственно в прокатной клетке и межклетевом промежутке в линии прокатного стана. Алгоритм может применяться для расчета распределения температуры различных прокатываемых материалов на любом типе сортового прокатного стана.

Программа, реализующая алгоритм решения задачи распределения температурного поля металлической катанки по клетям прокатного стана, написана на языке Fortran Pover Station 4.0 [5]. Для расчета в качестве исходных данных были использованы литературные данные.

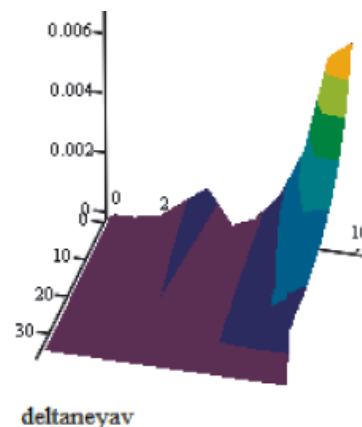


Рис. 1. Результаты вычисления относительной погрешности

В результате расчета было получено: трехмерное поле температур. Приведены результаты исследований температурного поля металлической катанки из сплава ВТ6.

Первоначально нагретая до температуры 950°C заготовка подается в первую черновую клетку, после прокатки в клетку поверхность полосы охлаждается до температур, находящихся в диапазоне 904–949°C. На рис. 2 показано поперечное сечение раската после пятой клетки, где температура поверхности раската, контактирующей с валком, за счет теплопередачи понижается до 880°C, в результате большей пластической деформации углов заготовки и большего деформационного разогрева видно меньшее падение температуры – до 915°C. Боковые стороны, контактирующие только с окружающей средой, охлаждаются до температуры 938°C.

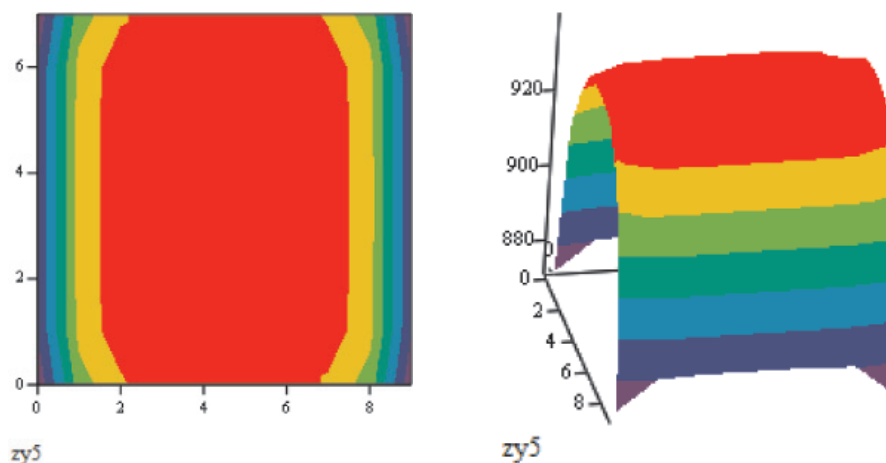


Рис. 2. Поперечное сечение раската после пятой клетки

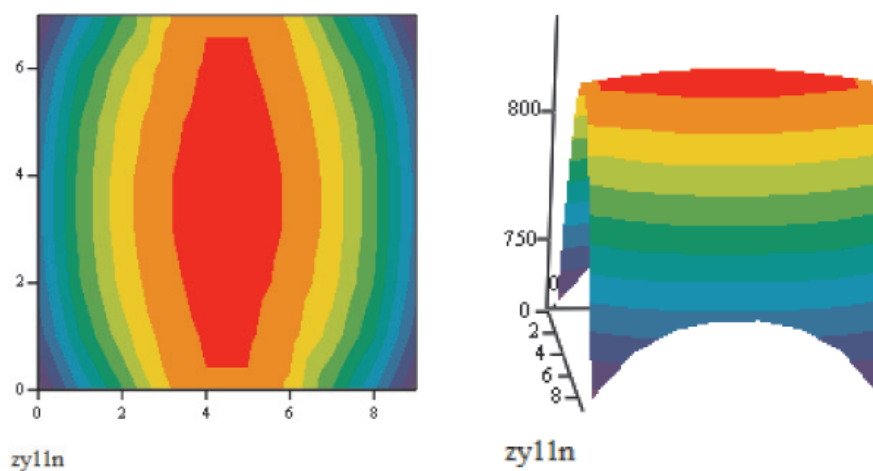


Рис. 3. Поперечное сечение раската после одиннадцатой клетки

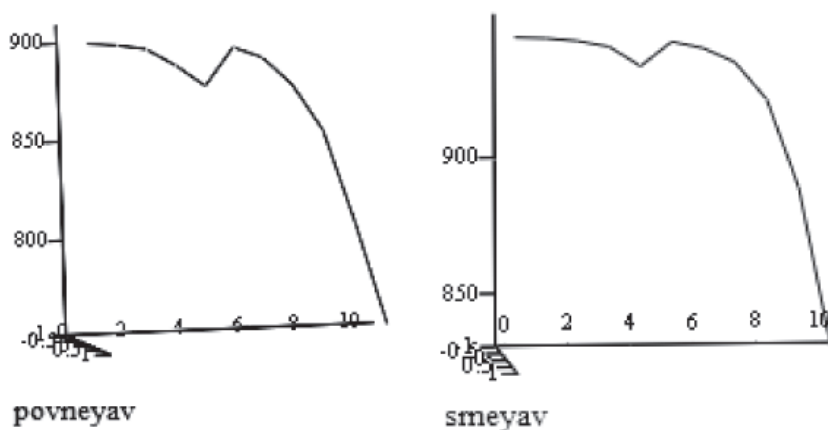


Рис. 4. Графики изменения температуры полосы по проходам, полученные в результате расчета с помощью неявной ЛОС (соответственно температура поверхности и центральной части раската)

Теоретически примем, что после пяти проходов в клетки полосу режут на мерные длины, остужают, а затем снова нагревают до температуры 950°C. Далее полосу про-

катывают в группе клеток за 6 проходов, т.е. с 6 по 11 клетки. Результаты поперечного сечения раската после 11 клетки показаны на рис. 3.

По теории обработки металлов давлением для получения требуемой однородной структуры необходимо добиться равномерной температуры по сечению катанки. Как видно на рис. 3, это условие выполняется, хотя осуществить это условие практически невозможно.

Полученные в результате расчета по неявной локально-одномерной схеме значения температуры раската по различным участкам прохода представлены на рис. 4.

Как показывают исследования, структуры центра и поверхности катанки отличаются, что вызвано перепадом температуры около 50 °С и сохраняется условие нагрева полосы до 950 °С на входе в 1-ую и 6-ую клетки, т.е. графики изменения температуры точно описывают процесс деформации металлической катанки.

Выводы

Созданный алгоритм решения температурной задачи позволяет получить трехмерное температурное поле полосы в многоклетевом прокатном стане, проводить эксперименты, меняя те или иные факторы, влияющие на прочность и пластичность деформируемого металла, в том числе форму калибровки, не прибегая к дорогостоящим натурным экспериментам.

Проверка точности и сравнительный анализ расчета температурных полей проката дает возможность использования приведенного алгоритма локально-одномерных схем при сортовой прокатке.

Список литературы

1. Дубинский Ф.С., Соседкова М.А. Методы проектирования температурных режимов горячей сортовой прокатки: учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 18 с.
2. Соседкова М.А., Дубинский Ф.С., Дукмасов В.Г., Выдрин А.В. Моделирование температурных процессов с целью совершенствования технологии сортовой прокатки // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2010. – Вып. 15. – № 34. – С. 71–75.
3. Самарский А.А. Теория разностных схем. – 3-е изд. испр. – М: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – С. 477–494.
4. Рындин Е.А. Методы решения задач математической физики: учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2003 г. – 119 с.
5. Рыжиков Ю.И. Программирование на Фортране PowerStation для инженеров. – СПб.: КОРОНА принт, 1999. – 160 с.

References

1. Dubinskij F.S., Sosedkova M.A. Metody proektirovanija temperaturnyh rezhimov gorjachej sortovoj prokatki: uchebnoe posobie. Cheljabinsk: Izd-vo JuUrGU, 2007. 18 p.
2. Sosedkova M.A., Dubinskij F.S., Dukmasov V.G., Vydrin A.V. Modelirovanie temperaturnyh processov s celju sovershenstvovanija tehnologii sortovoj prokatki // Vestnik JuUrGU. Serija «Metallurgija». 2010. Vyp. 15. no. 34. pp. 71–75.
3. Samarskij A.A. Teorija raznostnyh shem. 3-e izd. ispr. M: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1989. pp. 477–494.
4. Ryndin E.A. Metody reshenija zadach matematicheskoy fiziki: uchebnoe posobie. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2003 g. 119 p.
5. Ryzhikov Ju.I. Programirovanie na Fortrane PowerStation dlja inzhenerov. SPb.: KORONA print, 1999. 160 p.

Рецензенты:

Казиев Г.З., д.т.н., профессор, менеджер лаборатории больших данных, АО «Национальные информационные технологии», г. Астана;

Шарипов Б.Ж., д.п.н., профессор, главный эксперт, АО «Национальный инфокоммуникационный холдинг “Зерде”», г. Астана.