

Степень снижения давления на валки можно определить по выражению (22). Расчетные степени снижения давления на валки показаны на рис. 2. Из рис. 2 видно, что чем больше соотношение  $v_r/v_B$ , тем больше степень снижения давления на валки.

При прокатке в валках с колеблющимся бандажом обеспечивается значительное снижение давления металла на валки. При улучшении условия контактного трения металла с валком за счет частичного разрыва контакта, то эффект снижения давления металла на валки еще увеличивается.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Северденко В.П., Степаненко А.В., Хренов О.В. Прокатка с механическими колебаниями валков // Докл. АН БССР. – 1971. – Т. XV, № 10. – С. 900–903.
2. Николаев В.А. Давление и момент при прокатке полосы с вибрационным нагружением // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1971. – № 6. – С. 102–105.
3. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.

УДК 563.12:669.046

В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, И.А. ТРУСОВА,  
Э.А. ГУРВИЧ, В.Б. КОВАЛЕВСКИЙ, В.А. ХЛЕБЦЕВИЧ

### РАСЧЕТ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НАГРЕВЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СЛИТКОВ И ЗАГОТОВОК ПЕРЕД ПРОКАТКОЙ

Решение вопросов интенсификации процессов производства проката требует тщательного изучения сопутствующих тепловых и термомеханических явлений. Почти полное отсутствие в отечественной и зарубежной литературе соответствующих экспериментальных данных, обусловленное известными методическими и организационными трудностями проведения качественного эксперимента, привело к поиску новых методов оценки этих явлений. В последнее время наибольшее распространение, в частности в инженерной практике, получил метод математического моделирования.

В работе предлагается математическая модель термоупругопластичности при радиационно-конвективном нагреве сплошного неограниченного цилиндра с учетом зависимости теплофизических и термомеханических свойств материала от температуры. Реализация модели позволяет проследить динамику изменения полей температур и термических напряжений в массивных цилиндрических слитках и заготовках и оценить их состояние перед прокаткой и прошивкой.

Считаем материал нагреваемого тела идеальным упругопластическим, предел текучести – линейной функцией температуры  $\sigma_T = \sigma_T^0 (1 - KT)$ . В качестве условия пластичности принимаем условие текучести Сен-Венана  $\sigma_T = \sigma_r - \sigma_\theta$ .

Зона пластических деформаций ограничена радиусами  $R$  и переменным  $r_0$ , а в зоне  $0 \leq r \leq r_0$  имеют место упругие напряжения (рис. 1).

Соотношения для напряжений базировались на решении температурной задачи, полученной ранее [1] с применением схемы теплового пограничного

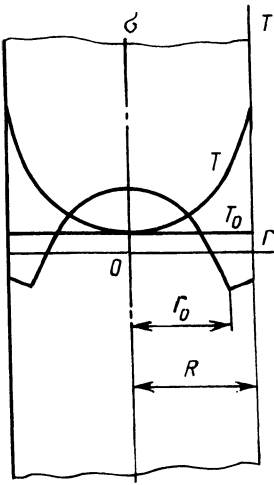


Рис. 1. Расчетная схема упруго-пластических напряжений при нагреве цилиндра

слоя [2]. В соответствии с этим температурные функции, описывающие тепловое состояние массивного цилиндра в любой момент времени, будут иметь вид:

инерционный период

$$\theta(\rho, \tau) = \theta_{\pi}^0 - \frac{\text{Sk}(1 - U^4) + \text{Bi}(1 - U)}{2(1 + \epsilon_{\lambda} U)} (1 - \rho^2),$$

где  $\rho = r/R$  – безразмерная текущая координата;  $\theta_{\pi}^0 = T_{\pi}^0/T_c$  – безразмерная температура поверхности тела; Sk, Bi – критерии Старка и Био;

$$U = \frac{\theta_0(1 + \epsilon_{\lambda} \theta_0) + (\text{Sk} + \text{Bi})/2}{1 + \epsilon_{\lambda} \theta_0}; \quad \theta_0 = T_0/T_c -$$

безразмерная начальная температура;  $\epsilon_{\lambda}$  – параметр, отражающий зависимость теплопроводности от температуры;

регулярный период

$$\theta(\rho, \tau) = \theta_{\pi} - \frac{\text{Sk}(1 - \theta_{\pi}^4) + \text{Bi}(1 - \theta_{\pi})}{2(1 + \epsilon_{\lambda} \theta_{\pi})} (1 - \rho^2).$$

По аналогии с [3] запишем выражения для напряжений с учетом переменности термомеханических свойств материала:

в зоне упругих деформаций

$$\bar{\sigma}_r = C \left\{ 1 + \epsilon_E [\theta_{\pi} - A(1 - \rho^2)] \right\} \left[ \frac{\epsilon_{\alpha} A \theta_{\pi} - \epsilon_{\alpha} A^2 + A}{4} (\rho_0^2 - \rho^2) + \frac{\epsilon_{\alpha} A^2}{12} (\rho_0^3 - \rho^3) + \ln |\rho_0| (-DA - 1 + D\theta_{\pi}) - \frac{DA(1 - \rho_0^2)}{2} \right]; \quad (1)$$

$$\bar{\sigma}_{\theta} = C \left\{ 1 + \epsilon_E [\theta_{\pi} - A(1 - \rho^2)] \right\} \left[ \frac{\epsilon_{\alpha} A \theta_{\pi} - \epsilon_{\alpha} A^2 + A}{4} (\rho_0^2 - 3\rho^2) + \frac{\epsilon_{\alpha} A^2}{12} (\rho_0^3 - \rho^3) - \frac{\epsilon_{\alpha} A^2}{2} \rho^4 + \ln |\rho_0| (-DA - 1 + D\theta_{\pi}) - \frac{DA(1 - \rho_0^2)}{2} \right]; \quad (2)$$

в зоне пластических деформаций

$$\bar{\sigma}_r = \ln |\rho| (-DA - 1 + D\theta_{\pi}) - \frac{DA(1 - \rho^2)}{2}; \quad (3)$$

$$\bar{\sigma}_\theta = \ln|\rho|(-DA - 1 + D\theta_{\text{п}}) - (1 - D\theta_{\text{п}}) - \frac{3DA(1 - \rho^2)}{2}. \quad (4)$$

Граница пластической зоны определяется из условия неразрывности тангенциальных и радиальных напряжений в точке сопряжения упругой и пластической зон, т. е. в точке  $\rho_0$ :

$$C \left\{ 1 + \epsilon_E [\theta_{\text{п}} - A(1 - \rho_0^2)] \left[ - \frac{\epsilon_\alpha A \theta_{\text{п}} - \epsilon_\alpha A^2 + A}{2} \rho_0^2 + \frac{\epsilon_\alpha A^2}{6} \rho_0^3 - \frac{\epsilon_\alpha A^2}{2} \rho_0^4 \right] - \left\{ 1 - D[\theta_{\text{п}} - A(1 - \rho_0^2)] \right\} \right\}, \quad (5)$$

где  $C = \frac{\alpha_0 T_0 E_0}{\sigma_T^0 (1 - \mu)}$ ;  $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_T^0}$ ;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E_0$ ,  $\alpha_0$  – модуль

упругости и коэффициент линейного расширения при начальной температуре металла;  $\epsilon_E$ ,  $\epsilon_\alpha$  – параметры, учитывающие зависимость модуля упругости и коэффициента линейного расширения материала от температуры;

$$A = \begin{cases} \frac{Sk(1 - U^4) + Bi(1 - U)}{2(1 + \epsilon_\lambda U)} & \leftarrow \text{на инерционном этапе;} \\ \frac{Sk(1 - \theta_{\text{п}}^4) + Bi(1 - \theta_{\text{п}})}{2(1 + \epsilon_\lambda \theta_{\text{п}})} & \leftarrow \text{на регулярном этапе;} \end{cases}$$

$D$  – коэффициент, учитывающий зависимость предела текучести от температуры.

Соотношения (1) ... (5) несут полную информацию о динамике температурных напряжений в процессе нагрева заготовок перед последующей пластической деформацией.

В соответствии с приведенными выражениями был просчитан вариант нагрева цилиндра  $D = 2R = 0,23$  м из стали 45 перед прокаткой с учетом возникающих термонапряжений. Теплофизические и термомеханические свойства аппроксимировали линейными зависимостями [4]. Результаты расчетов представлены графиками. Максимальные растягивающие термические напряжения (рис. 2) возникают в центре цилиндра и представляют опасность для сплошности материала до  $\rho = 0,55 \dots 0,65$ . В дальнейшем, несмотря на увеличение перепада температур (до  $\Delta t = 220$  °C), напряжения уменьшаются в 1,5...2 раза и появляется возможность ведения форсированных режимов нагрева.

При изменении радиальных и тангенциальных напряжений по сечению цилиндра в различные моменты времени (рис. 3) максимальные (по абсолютному значению) напряжения возникают на поверхности цилиндра к концу инерционного этапа, затем они резко уменьшаются.

Предложенный алгоритм использован при разработке технологии нагрева осевых заготовок диаметрами 0,23 и 0,27 м из стали ОСВ перед прокаткой на

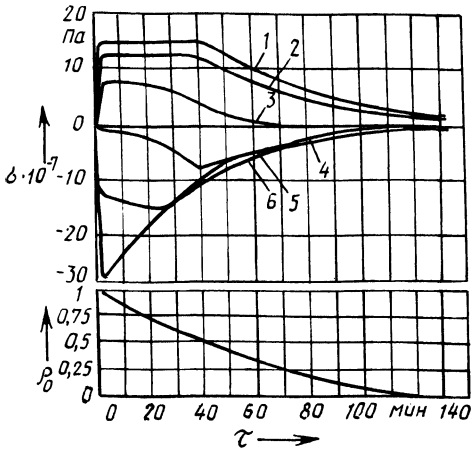


Рис. 2. Изменение термонапряжений в различных точках сечения цилиндра и границы пластической зоны  $\rho_0$  во времени:

1 -  $\rho = 0$ ; 2 -  $\rho = 0,2$ ; 3 -  $\rho = 0,4$ ;  
4 -  $\rho = 0,6$ ; 5 -  $\rho = 0,8$ ; 6 -  $\rho = 1,0$

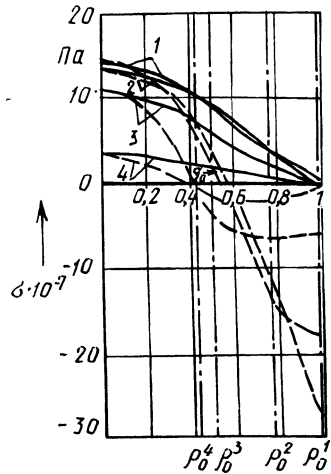


Рис. 3. Изменение радиальных (—) и тангенциальных (---) напряжений по сечению цилиндра в моменты времени:

1 -  $\tau_1 = 4$  мин; 2 -  $\tau_2 = 30$  мин;  
3 -  $\tau_3 = 60$  мин; 4 -  $\tau_4 = 120$  мин

винтовом стане 250 Днепровского металлургического комбината, предназначенном для изготовления и промышленного выпуска вагонных и локомотивных осей. В результате при промышленном опробовании режимов тепловой обработки увеличилась производительность нагревательной печи на 10 %, удельный расход топлива снизился на 5...7 %, абсолютное значение окалинообразования уменьшилось на 0,18 %, улучшились физико-механические характеристики готовой продукции и микроструктура черновой заготовки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошпольский В.И. Инженерный способ расчета массивных тел в условиях лучистого теплообмена // Изв. вузов. Черн. металлургия. - 1986. - № 7. - С. 124-127.
2. Гольдфарб Э.М. Теплотехника металлургических процессов. - М.: Металлургия. - 1967. - 440 с.
3. Бурцев А.И., Губа В.М., Постольник Ю.С. Уруго-пластические напряжения при лучистом нагреве цилиндра // Изв. вузов. Черн. металлургия. - 1976. - № 1. - С. 106-110.
4. Неймарк Б.Е. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. - М.; Л.: Энергия. - 1967. - 386 с.