

А.В. СТЕПАНЕНКО, д-р техн. наук,  
 В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, канд.техн.наук,  
 И.А. ТРУСОВА, В.А. ХЛЕБЦЕВИЧ (БПИ),  
 Е.А. МИЛЬМАН, канд.техн.наук (ДМК)

**ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ В ПРОЦЕССЕ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ  
 ЗАГОТОВОК ИЗ ОСЕВОЙ СТАЛИ**

При получении сплошных и полых вагонных осей методом поперечно-винтовой прокатки особого внимания заслуживают вопросы прогнозирования напряженного состояния цилиндрических заготовок. Наряду с математическими моделями напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе пластической деформации несомненный интерес представляет моделирование предварительного теплового нагружения, т.е. анализ термоупругопластичности черновых осей при нагреве и термической обработке под последующую прокатку или прошивку.

В данной работе приведены новые математические зависимости для вычисления термических напряжений при нагреве (охлаждении) заготовок вагонных осей. Полученные соотношения базировались на решении температурной задачи методом эквивалентных источников [1].

Ввиду непродолжительности инерционного этапа (диаметр обрабатываемых заготовок не превышает 0,3 м) рассматривался упорядоченный период нагрева (прогрев заготовки по всему сечению). Таким образом, можно использовать идею метода мгновенного регулярного процесса [2]. Расчетная схема возникновения упругих и пластических термических напряжений приведена на рис. 1.

Ценность предлагаемых расчетных зависимостей – в учете термофизических и физико-механических нелинейностей в исходной краевой задаче. При решении задачи термоупругости использован метод возмущений.

При нагреве осевых заготовок температурная функция имеет вид [3]

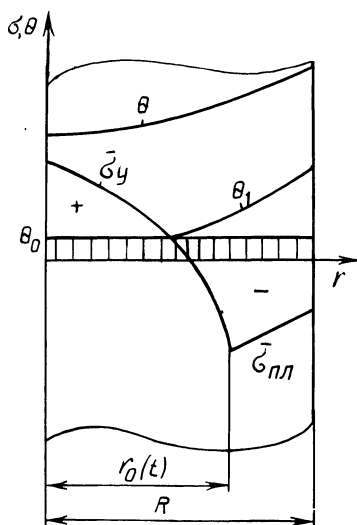


Рис. 1. Схема температурных полей и упругопластических напряжений при тепловой обработке заготовок из осевой стали.

$$\theta(\rho, \tau) = \frac{1}{\epsilon_\lambda} \left[ \sqrt{\kappa(\theta_n) + W(\theta_n)\rho^2} - 1 \right]. \quad (1)$$

Время, соответствующее данному значению  $\theta(\rho, \tau)$ , определяется из трансцендентного уравнения:

$$\sum_{i=1}^4 a_i [\varphi_i(\theta_n) + \varphi_i(\theta_n^0)] = 2(\text{Sk} + \text{Bi})(\tau - \tau_0), \quad (2)$$

где

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} [\text{arth} \theta_n(\tau) + \text{arctg} \theta_n(\tau)];$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{2} [\text{arth} \theta_n(\tau) - \text{arctg} \theta_n(\tau)];$$

$$\varphi_3 = \frac{1}{4} \ln \frac{1 + \theta_n^2(\tau)}{1 - \theta_n^2(\tau)}; \quad \varphi_4 = -\frac{1}{4} \ln [1 - \theta_n^4(\tau)];$$

$$a_1 = 1 - \frac{\epsilon_c - \epsilon_\lambda}{3(1 - \epsilon_\lambda^4)} (4\epsilon_\lambda^2 \text{Sk} - \text{Bi}); \quad a_2 = -\frac{4(\epsilon_c - \epsilon_\lambda)\text{Sk} + (1 - \epsilon_c\epsilon_\lambda^3)\text{Bi}}{3(1 - \epsilon_\lambda^4)};$$

$$a_3 = \epsilon_c - \frac{4\epsilon_\lambda(\epsilon_c - \epsilon_\lambda)\text{Sk} - (\epsilon_c - \epsilon_\lambda^3)\text{Bi}}{3(1 - \epsilon_\lambda^4)};$$

$$a_4 = \frac{4(1 - \epsilon_c\epsilon_\lambda^3)\text{Sk} - \epsilon_\lambda(1 - \epsilon_c\epsilon_\lambda)\text{Bi}}{3(1 - \epsilon_\lambda^4)}$$

Упругие напряжения по сечению осевой заготовки:  
радиальные

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_r^{\text{упр}} = & \frac{C}{\epsilon_\lambda} \left\{ 1 + \frac{\epsilon_E}{\epsilon_\lambda} [U(\rho) - 1] \right\} \left\{ \frac{\epsilon_a}{4\epsilon_a} W(\theta_n)(\rho_0^2 - \rho^2) + \right. \\ & + \frac{1 - \epsilon_a/\epsilon_\lambda}{3W(\theta_n)} \left\{ \frac{1}{\rho_0^2} [U^3(\rho_0) - U^3(0)] - \frac{1}{\rho^2} [U^3(\rho) - \right. \\ & \left. \left. - U^3(0)] \right\} \right\} + \left( 1 + \frac{D}{\epsilon_\lambda} \right) \ln \rho - \frac{D}{\epsilon_\lambda} \left\{ U(1) - U(\rho) + \frac{\sqrt{\kappa(\theta_n)}}{2} [J(1) - \right. \\ & \left. \left. - J(\rho)] \right\}; \quad (3) \end{aligned}$$

тангенциальные

$$\bar{\sigma}_\theta^{\text{упр}} = \frac{C}{\epsilon_\lambda} \left[ 1 + \frac{\epsilon_E}{\epsilon_\lambda} (U(\rho) - 1) \right] \left\{ \frac{\epsilon_a}{4\epsilon_a} W(\theta_n)(\rho_0^2 - 3\rho^2) + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1 - \epsilon_a / \epsilon_\lambda}{3W(\theta_n)} \left\{ \frac{1}{\rho_0^2} [U^3(\rho_0) - U^3(0)] + \frac{1}{\rho^2} [U^3(\rho) - U^3(0)] - \right. \\
& \left. - 3W(\theta_n)U(\rho) \right\} + \left(1 + \frac{D}{\epsilon_\lambda}\right) \ln \rho - \frac{D}{\epsilon_\lambda} \left\{ U(1) - U(\rho) + \right. \\
& \left. + \frac{\sqrt{\kappa(\theta_n)}}{2} [J(1) - J(\rho)] \right\}. \quad (4)
\end{aligned}$$

Пластические напряжения:  
радиальные

$$\begin{aligned}
\bar{\sigma}_r^{np} = & \left(1 + \frac{D}{\epsilon_\lambda}\right) \ln \rho - \frac{D}{\epsilon_\lambda} \left\{ U(1) - U(\rho) + \frac{\sqrt{\kappa(\theta_n)}}{2} [J(1) - \right. \\
& \left. - J(\rho)] \right\}; \quad (5)
\end{aligned}$$

тангенциальные

$$\begin{aligned}
\bar{\sigma}_\theta^{np} = & \left(1 + \frac{D}{\epsilon_\lambda}\right) (\ln \rho - 1) - \frac{D}{\epsilon_\lambda} \left\{ U(1) - 2U(\rho) + \right. \\
& \left. + \frac{\sqrt{\kappa(\theta_n)}}{2} [J(1) - J(\rho)] \right\}. \quad (6)
\end{aligned}$$

Граница пластической зоны определяется из условия неразрывности тангенциальных напряжений в точке сопряжения упругой и пластических зон:

$$\begin{aligned}
& \frac{C}{\epsilon_\lambda} \left\{ 1 + \frac{\epsilon_E}{\epsilon_\lambda} [U(\rho_0) - 1] \right\} \left\{ - \frac{\epsilon_a}{2\epsilon_\lambda} W(\theta_n) \rho_0^2 + \right. \\
& \left. + \frac{1 - \epsilon_a / \epsilon_\lambda}{3W(\theta_n)} \left[ \frac{2}{\rho_0^2} U^3(\rho_0) - 1 \right] - U^3(0) - 3W(\theta_n)U(\rho_0) \right\} = \\
& = - \left\{ 1 - \frac{D}{\epsilon_\lambda} [U(\rho_0) - 1] \right\}. \quad (7)
\end{aligned}$$

В выражениях (1)...(7) приняты следующие обозначения:  $\theta(\rho, \tau) = T(r, t) / T_c$  – безразмерная температура;  $T(r, t)$  – текущая температура;  $T_c$  – температура среды;  $\rho = r/R$  – безразмерная координата;  $r$  – текущая координата;  $R$  – радиус заготовки;  $\epsilon_\lambda, \epsilon_c$  – теплофизические константы;  $\epsilon_a, \epsilon_E, D$  – термомеханические константы;  $\theta_n$  – температура поверхности;  $Sk = \sigma_B T_c^3 R / \lambda$ ,  $Vi = \alpha R / \lambda$  – числа Старка и Био;

$$U(0) = \sqrt{\kappa(\theta_n)}; \quad U_1 = \sqrt{\kappa(\theta_n) + W(\theta_n)};$$

$$U(\rho) = \sqrt{\kappa(\theta_n) + W(\theta_n)\rho^2}; \quad U(\rho_0) = \sqrt{\kappa(\theta_n) + W(\theta_n)\rho_0^2};$$

$$J(1) = \begin{cases} \ln \left[ \frac{\sqrt{\kappa(\theta_n)} - U(1)}{\sqrt{\kappa(\theta_n)} + U(1)} \right]; \\ \ln \left[ \frac{U(1) - \sqrt{\kappa(\theta_n)}}{U(1) + \sqrt{\kappa(\theta_n)}} \right]; \end{cases} \quad J(\rho) = \begin{cases} \ln \left[ \frac{\sqrt{\kappa(\theta_n)} - U(\rho)}{\sqrt{\kappa(\theta_n)} + U(\rho)} \right]; \epsilon_\lambda > 0; \\ \ln \left[ \frac{U(\rho) - \sqrt{\kappa(\theta_n)}}{U(\rho) + \sqrt{\kappa(\theta_n)}} \right]; \epsilon_\lambda < 0. \end{cases}$$

Таким образом, получена полная картина термонапряженного состояния осевой заготовки перед пластической деформацией. По известным соотношениям между компонентами тензора напряжений и тензора деформаций [4] можно получить информацию о деформированном состоянии вагонных осей.

С использованием алгоритма (1) ... (7) были выполнены расчеты термоупругопластичности осевых сталей для заготовок диаметром 0,23 м и длиной 2 м из стали ОСВ при следующих значениях входящих в выражения величин:  $S_k = 0,365$ ;  $V_i = 0,142$ ;  $\epsilon_\lambda = -0,597$ ;  $\epsilon_c = 0,513$ ;  $\epsilon_E = -0,749$ ;  $\epsilon_a = 1,216$ ;  $\epsilon_k = 0$ .

Доказано, что при тепловой обработке деталей из осевой стали необходимо учитывать пластические деформации. При наличии упругой и пластической зон по сечению цилиндра  $|\bar{\sigma}^{np}|$  и  $|\bar{\sigma}^{пл}|$  имеют место абсолютные значения одного порядка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. П о с т о л ь н и к Ю.С. Температурный расчет пластинки и цилиндра, нагреваемых одновременно излучением и конвекцией // ИФЖ. — 1969. — Т. XVI. — № 6. — С. 1082—1086.
2. Г о л ь д ф а р б Э.М. Теплотехника металлургических процессов. — М., 1967. — 467 с.
3. П о с т о л ь н и к Ю.С., Т и м о ш о л ь с к и й В.И., С и ч е в о й А.П. Анализ технологии нагрева металла в пламенных печах // Изв. вузов. Черн. металлургия. — 1979. — № 2. — С. 110—113.
4. К а ч а н о в Л.М. Основы теории пластичности. — М., 1956. — 323 с.

УДК 621.983

И.Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ, канд.техн.наук (БПИ),  
В.И. ЗАДОРЖНЫЙ,  
В.С. ШЛЯХОВОЙ, канд.техн.наук

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРУЖИНЫ И ОСТАТОЧНОЙ КРИВИЗНЫ ПЛАСТИЧЕСКИ ИЗОГНУТОЙ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ

Традиционная технология изготовления одновитковых манометрических пружин (трубок Бурдона) предусматривает профилирование поперечного сечения исходной трубчатой заготовки и последующий изгиб полученной трубки до заданной кривизны. Если профилирование принципиальных затруднений не вызывает, то пластический изгиб тонкостенной оболочки связан с потерей ус-