

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

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

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 ПРУЖИЕНИЯ 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-

тойчивости и с искажением формы ее поперечного сечения. Использование для повышения устойчивости деформируемой оболочки различного рода наполнителей приводит к трудоемким вспомогательным операциям.

Способ формообразования манометрической пружины из круглой трубы, совмещающий обе указанные операции пластического деформирования, при известных условиях позволяет изготавливать подобные детали без наполнителя, однако имеет существенные технологические ограничения.

Прогрессивная технология изготовления вышеуказанных деталей [1] предполагает разделение формообразующих операций и выполнение их в определенной последовательности. При этом на первом этапе осуществляется пластический изгиб трубчатой заготовки (без наполнителя) до заданного радиуса кривизны. Для получения требуемого радиуса с достаточно высокой точностью необходимо определять упругое пружинение после снятия внешней нагрузки.

Известное решение, основанное на использовании теоремы о разгрузке А.А. Ильюшина и линейно-степенного закона упрочнения, дает следующее выражение для определения фиктивной величины (кривизны) κ'_0 , на которую уменьшается созданная в активной стадии деформирования кривизна κ_0 нейтральной линии пластически изогнутого элемента вследствие пружинения материала при разгрузке [2]:

$$\kappa'_0 = \kappa_0 \frac{I_{\text{упр}}}{I} + \kappa_0^n \frac{K_n I_{\text{пл}}}{EI}.$$

В нашем случае κ_0 представляет собой кривизну гибочного шаблона, которая определяется как сумма конечной и фиктивной кривизны изготавливаемой детали.

Конечная кривизна

$$\kappa_k = \kappa_0 \left[1 - \left(\frac{I_{\text{упр}}}{I} + \kappa_0^{n-1} \frac{K_n I_{\text{пл}}}{EI} \right) \right],$$

где $I_{\text{упр}} = \int_{F_{\text{упр}}} y^2 dF$ — момент инерции упругодеформированной зоны сечения относительно нейтральной оси; $I_{\text{пл}} = \int_{F_{\text{пл}}} y^{n+1} dF$ — приведенный момент

инерции пластически деформированных зон поперечного сечения относительно нейтральной оси; $I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$ — собственный момент инерции поперечного сечения трубчатой заготовки; E — модуль нормальной упругости; K_n —

приведенный модуль пластичности, $K_n = b_i^n / a_i K$; K и n — константы кривой упрочнения, выражаемые через основные механические характеристики, известные по стандартным испытаниям металла на растяжение; $K = \sigma_B / \epsilon_B^n$; $n =$

$\lg \frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}} / \lg \frac{\epsilon_B}{\epsilon_{0,2}}$; a_i, b_i — коэффициенты, определяющие влияние напряженно-деформированного состояния на модуль пластичности материала.

Для трубчатой заготовки круглого сечения

$$I_{\text{упр}} = 2 \int_0^{y_p} b(y) y^2 dy; \quad I_{\text{пл}} = 2 \int_{y_p}^{r_H} b(y) y^{n+1} dy,$$

где y_p — ордината границы зон упругой и пластической деформации по высоте сечения, определяемая из выражения

$$y_p = \pm \epsilon_p / \kappa_0 = \pm \rho_0 \epsilon_p,$$

которое можно записать в виде

$$\frac{y_p}{d_0/2} = \pm \frac{\rho_0}{d_0/2} \epsilon_p,$$

где d_0 — диаметр трубчатой заготовки.

При изготовлении манометрических пружин указанным выше способом

$\frac{\rho_0}{d_0/2}$ составляет 6...12,5.

С достаточной степенью точности можно считать, что все поперечное сечение по высоте трубчатой заготовки деформируется пластически, т.е. $2y_p/d_0 = 0$. Ошибка при этом допущении не будет превышать 7%.

Таким образом, момент инерции упругодеформированной зоны сечения относительно нейтральной оси становится равным нулю ($I_{\text{упр}} = 0$), а выражение приведенного момента инерции пластически деформированных зон поперечного сечения относительно нейтральной оси после ряда преобразований [2] примет вид

$$I_{\text{пл}} = 4 \int_{y_p}^{r_H} \sqrt{r_H^2 - y^2} y^{n+1} dy - 4 \int_{y_p}^{r_B} \sqrt{r_B^2 - y^2} y^{n+1} dy =$$

$$= c_n (r_H^{n+3} - r_B^{n+3}),$$

где $c_n = \frac{4}{n+2} - \frac{2}{n+4} - \frac{1}{2(n+6)} - \frac{1}{4(n+b)}$; $r_H = \frac{d_0}{2}$; $r_B = \frac{d_0}{2} - s$; s — толщина трубчатой заготовки.

В нашем случае при $I_{\text{упр}} = 0$ конечная кривизна изогнутой трубчатой заготовки

$$\kappa_k = \kappa_0 \left(1 - \kappa_0^{n+1} \frac{K_n I_{\text{пл}}}{EI} \right) = \kappa_0 \left[1 - \kappa_0^{n+1} \frac{K_n c_n}{EI} (r_H^{n+3} - r_B^{n+3}) \right].$$

Коэффициенты a_i и b_i определяются через соотношения компонент напряжения и деформации для конкретного напряженно-деформированного состояния материала:

$$a_i = \sqrt{1 - a_2 + a_2^2 - a_2 a_3 - a_3 + a_3^2};$$

$$b_i = \frac{2}{3} \sqrt{1 - b_2 + b_2^2 - b_2 b_3 - b_3 + b_3^2},$$

где a_2, a_3, b_2, b_3 — коэффициенты пропорциональности: $a_2 = \sigma_2/\sigma_1, a_3 = \sigma_3/\sigma_1, b_2 = \epsilon_2/\epsilon_1, b_3 = \epsilon_3/\epsilon_1$, определяемые с учетом $\sigma_1 = \sigma_l; \sigma_2 = \sigma_s; \sigma_3 = \sigma_\theta, \epsilon_1 = \epsilon_l; \epsilon_2 = \epsilon_s; \epsilon_3 = \epsilon_\theta$; индексы l, s, θ соответствуют координатам в цилиндрическом направлении, по толщине стенки и в окружном направлении трубчатой заготовки.

Изгиб трубчатых заготовок при изготовлении манометрических пружин без наполнителя осуществляется методом навивки, при этом зона деформации оказывается жестко зафиксированной между ручьями гибочного шаблона и прижимного ролика. Это позволяет осуществлять изгиб заготовки без искажения ее поперечного сечения.

Установлено, что $\epsilon_l = -\epsilon_s$ и, следовательно, $\epsilon_\theta = 0$. Данное соотношение компонентов деформации при пластическом изгибе труб может быть выполнено только при соотношениях компонентов напряжения $\sigma_\theta = 0,5\sigma_l, \sigma_s = 0$, что позволяет достаточно просто определить коэффициенты a_l и b_l , используя вышеприведенные выражения, и оценить конечную кривизну пластически изогнутой трубчатой заготовки.

Расчет выполнен применительно к решению конкретной технологической задачи изготовления манометрических пружин манометров МТП1-4, выпускаемых Казанским ПО "Теплоконтроль". Основные механические характеристики сплава 156 (ТУ 48-21-363-79) трубчатых заготовок, а также константы кривой упрочнения приведены в табл. 1. Наряду с мягким состоянием материала исследовано полутвердое, при котором появляется возможность существенно повысить устойчивость изгибаемой тонкостенной трубчатой заготовки при условии сохранения материалом необходимой пластичности.

Конечные значения кривизны нейтральной оси изогнутых трубчатых заготовок вычислены для различных пружин манометров МТП1-4 при давлениях от 0,1 до 2,5 МПа. Результаты расчетов приведены в табл. 2 (в числителе — для мягкого состояния материала, в знаменателе — для твердого; $d_0 = 8$ мм).

Полученные результаты на рис. 1 представлены в виде зависимостей радиуса гибочного шаблона от конечного радиуса изгиба детали при разных состояниях материала трубчатых заготовок. Анализ показал, что влияние изменения толщины трубчатых заготовок на конечную кривизну детали не существенно.

Табл. 1. Механические характеристики сплава 156 (латунь ЛАНКМц)

Состояние материала	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	E , МПа	ϵ_B , %	$\epsilon_{0,2}$, %	n	K , МПа
Мягкое	400...500	220...250	(1,2...1,3)10 ⁵	40...60	0,4	0,134	490
Полутвердое	550...650	330...370		10...20	0,6	0,164	820

Табл. 2. Конечная кривизна нейтральной оси изогнутых трубчатых заготовок κ_k

Толщина трубчатой заготовки, мм	Кривизна гибочного шаблона κ_0 , 1/мм				
	0,02	0,022	0,025	0,0286	0,033
0,2	$\frac{0,01892}{0,01834}$	$\frac{0,0209}{0,02031}$	$\frac{0,0239}{0,02328}$	$\frac{0,02746}{0,02683}$	$\frac{0,03183}{0,03119}$
	0,3	$\frac{0,0189}{0,01832}$	$\frac{0,02088}{0,02029}$	$\frac{0,02387}{0,02326}$	$\frac{0,02744}{0,02681}$
0,4		$\frac{0,01888}{0,0183}$	$\frac{0,02087}{0,02027}$	$\frac{0,02385}{0,02324}$	$\frac{0,02743}{0,02679}$

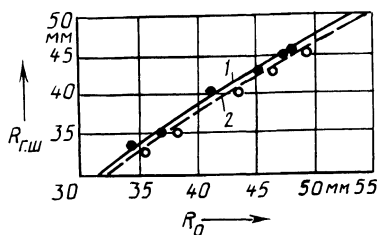


Рис. 1. Зависимость радиуса гибочного шаблона от конечного радиуса изгиба при разных состояниях материала трубчатых заготовок: 1 — мягкое; 2 — твердое (точками нанесены данные эксперимента)

Расчетные и фактические данные совпадают. Максимальная погрешность расчетных значений не превышает 10 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Изготовление тонкостенных оболочек двойной кривизны путем разделения формообразующих операций // И.Г. Добровольский, В.И. Задорожный, Г.Е. Зверьков, В.С. Шляховой // Высокопроизводительные металлосберегающие процессы обработки металлов: Тезисы докл. республ. научн.-техн. конф. — Кишинев, 1984. — С. 123—125. 2. Лысов М.Н. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. — М., 1966. — 262 с.