

УДК 621.774

АНАЛИЗ БЕЗОПРАВОЧНОГО ВОЛОЧЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ С ПРОТИВОНАТЯЖЕНИЕМ

© 2003 В. Р. Каргин, Е. В. Шокова, Б. В. Каргин

Самарский государственный аэрокосмический университет

Проведено теоретическое исследование процесса безправочного волочения тонкостенных труб с противонатяжением. Приведена полная система уравнений, позволяющая найти с помощью ЭВМ поля напряжений и деформаций, необходимые для рационального выбора параметров волочения и инструмента.

К основным выходным параметрам безправочного волочения тонкостенных труб относят толщину стенки готовой трубы, усилие волочения, определяющее предельные возможности процесса, контактное напряжение, влияющее на стойкость инструмента и усилие противонатяжения, направление которого противоположно направлению волочения [1-3]. Научно обоснованный расчет указанных параметров – сложная и до конца не решенная задача, которую можно решить только на основе комплексного учета всех геометрических, технологических и конструктивных параметров процесса, в том числе анизотропии механических свойств заготовки и реального профиля канала волокна, состоящей из конического и калибрующего участков, плавно соединенных между собой радиусным участком.

Для решения поставленной задачи сделаны следующие допущения: деформация тонкостенной трубы принимается как осесимметричная и безмоментная; напряженное состояние плоское, меридиональное σ_l и окружное σ_θ – главные напряжения; заготовка считается трансверсально изотропной, механические свойства в поперечном сечении одинаковы, но отличны от свойств в продольном направлении; упрочнение материала изотропное и определяется в виде квадратичного полинома; на поверхности контакта трубной заготовки с волоком действуют касательные напряжения, определяемые по закону Кулона. Напряженно-деформированное состояние трубы на коническом участке волокна описывается следующей системой уравнений:

$$de_l = \frac{dl}{l}; \quad de_\theta = \frac{dR}{R}; \quad de_r = \frac{dt}{t}; \quad (1)$$

$$de_l + de_\theta + de_r = 0; \quad (2)$$

$$d\bar{e}_i = \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2}} \sqrt{de_\theta^2 + de_r^2 + 2\mu de_\theta de_r}; \quad (3)$$

$$\sigma_i = a_0 + a_1 \ln \lambda + a_2 \ln(\lambda)^2; \quad (4)$$

$$\sigma_l = -\frac{\mu}{1-\mu^2} \frac{\sigma_i}{d\bar{e}_i} \left[\left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) de_\theta + \frac{de_r}{\mu} \right]; \quad (5)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\mu}{1-\mu^2} \frac{\sigma_i}{d\bar{e}_i} \left[\left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) de_\theta - de_r \right]; \quad (6)$$

$$p = \frac{\sigma_\theta t \cos \alpha}{R}; \quad (7)$$

$$\frac{d}{dR} (\sigma_l R t) + \sigma_\theta t + \frac{fpR}{\sin \alpha} = 0, \quad (8)$$

где l, R, t – текущие значения длины, радиуса и толщины пластически деформируемой заготовки; $de_l, de_\theta, de_r, d\bar{e}_i$ – бесконечно малые приращения деформаций и интенсивность приращения деформаций; σ_i – интенсивность напряжений; a_0, a_1, a_2 – коэффициенты аппроксимации кривой упрочнения; λ – коэффициент вытяжки; μ – коэффициент анизотропии; α – угол конусности канала

ла волокни; p - контактное напряжение; f - коэффициент внешнего трения.

Радиусный участок волокни представлен в виде набора конических колец с углами

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{R_k - R_i}{R_p} + 1\right), \quad (9)$$

где R_k - конечный радиус трубы; R_p - радиус кривизны радиусного участка.

Такой подход пригоден для исследования канала волокни любой формы. На калибрующем участке волокни принимали, что тонкостенная труба деформируется упруго, а контактные напряжения изменяются по его длине по линейному закону. Дифференциальное уравнение равновесия имеет вид

$$\frac{d\sigma_i}{dl} = \frac{f}{t} p. \quad (10)$$

Таким образом, получена замкнутая система уравнений для определения одиннадцати неизвестных $R, l, t, e_l, e_\theta, e_r, \bar{e}_i, \sigma_i, \sigma_l, \sigma_\theta, p$. Для конического участка система включает в себя уравнения (1)...(8), для радиусного - (1)...(9). Для калибрующего участка используется уравнение (10). Решение системы (1)...(8) в представленной последовательности сводится к решению дифференциального уравнения равновесия (8) относительно независимой переменной R .

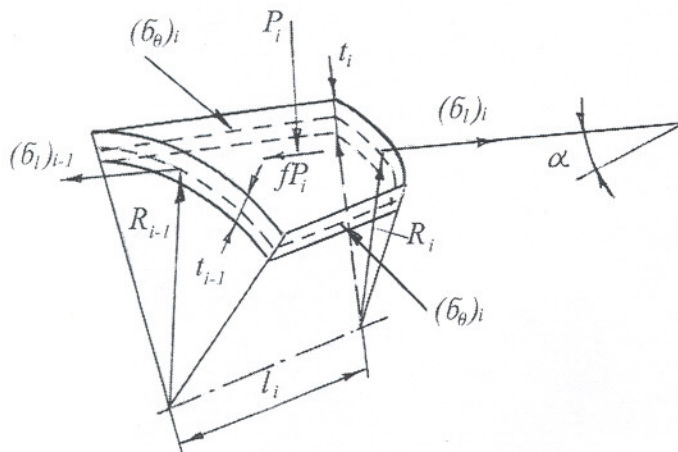


Рис. 1. Напряженное состояние i -го кольцевого элемента тонкостенной трубы

Параметры напряженно-деформированного состояния определялись в конечном числе точек при разбиении трубной заготовки на узкие кольцевые элементы (рис. 1). Деформация в пределах элемента принималась монотонной. Процесс вычислений начинался с краевого элемента, где напряжения и деформации считались известными и равными $\sigma_l = \sigma_{l_{np}}, \sigma_\theta = p = 0, e_l = e_\theta = e_r = 0$, где $\sigma_{l_{np}}$ - напряжение противонапряжения. Напряженно-деформированное состояние в других кольцевых элементах определялось от элемента к элементу при решении системы приведенных уравнений (1)...(10), записанных в конечно-разностном виде. Уравнения (8), (10) для i -го элемента после интегрирования по методу трапеций [4] имеют вид

$$(\sigma_l R t)_i - (\sigma_l R t)_{i-1} = \frac{R_i + R_{i-1}}{2} \left[\left(\sigma_\theta t + \frac{f p R}{\sin \alpha} \right)_i + \left(\sigma_\theta t + \frac{f p R}{\sin \alpha} \right)_{i-1} \right]; \quad (11)$$

$$(\sigma_l)_i - (\sigma_l)_{i-1} = \frac{l_i + l_{i-1}}{2} f \left[\left(\frac{p}{t} \right)_i + \left(\frac{p}{t} \right)_{i-1} \right]. \quad (12)$$

Из анализа априорной информации задавалось начальное приближенное значение радиуса R i -го элемента:

$$R_i = R_0 - l_i \sin \alpha.$$

Точное значение радиуса, определяющего геометрию i -го элемента, находилось методом дихотомии [4]. Конечные деформации e_l, e_θ, e_r i -го элемента определялись суммированием приращений деформаций

$$(e_l)_i = (e_l)_{i-1} + \Delta(e_l)_i;$$

$$(e_\theta)_i = (e_\theta)_{i-1} + \Delta(e_\theta)_i;$$

$$(e_r)_i = (e_r)_{i-1} + \Delta(e_r)_i;$$

$$(\bar{e}_i)_i = (\bar{e}_i)_{i-1} + \Delta(\bar{e}_i)_i.$$

На выходе из канала волокни рассчитывалось усилие волочения

$$P_s = \sigma_{lk} \pi (2R_k - t_k) t_k,$$

где σ_{ik} – напряжение волочения на выходе из волоки, t_k – конечная толщина стенки трубы.

При расчете напряженно-деформированного состояния в качестве базового варианта моделирования был принят процесс безоправочного волочения отожженной медной трубы МЗ с исходными данными: $\sigma_i = 75 + 1468 \ln \lambda - 1880(\ln \lambda)^2$, диаметр заготовки $D_0 = 18$ мм, исходная толщина стенки $t_0 = 1,0$ мм, угол конусности конического участка $\alpha = 0,21$ рад, радиусный переход $R_p = 80$ мм, длина калибрующего участка $l_{\text{кал}} = 8$ мм, коэффициент трения $f = 0,12$. Коэффициент анизотропии трубной заготовки находился экспериментально по методике [5].

На рис. 2 представлены расчетные и экспериментальные данные, полученные при волочении труб указанных выше размеров на установке ЦДМУ-30. В качестве смазки использовалось масло «Индустриальное 20». В экспериментах напряжения замерялись с точностью ± 2 МПа, а толщина стенки трубы на выходе из волоки с точностью $\pm 0,01$ мм.

Анализ показывает, что на точность расчетов значительное влияние оказывает ани-

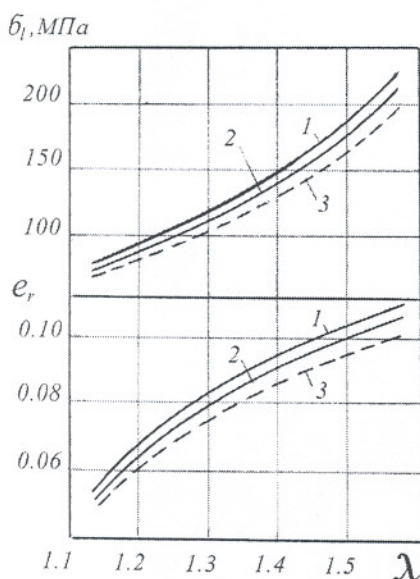


Рис. 2. Экспериментальная проверка теоретической модели: 1- $\mu = 0,5$, 2- $\mu = 0,53$, 3- эксперимент

зотропия механических свойств. Экспериментальные и расчетные значения параметров напряженно-деформированного состояния без учета анизотропии ($\mu = 0,5$) отличаются друг от друга при коэффициенте вытяжки $\lambda = 1,5$ по напряжениям на 13 %, по деформациям на 11 %. С учетом анизотропии трубной заготовки отклонения составляют 7 и 5 % соответственно.

На рис. 3 и 4 представлены расчетные параметры напряженно-деформированного состояния по длине рабочего канала волоки в зависимости от противонатяжения при волочении алюминиевой трубы из сплава Д16 со следующими данными: диаметр заготовки $D_0 = 18$ мм, исходная толщина стенки $t_0 = 1,5$ мм, коэффициент вытяжки $\lambda = 1,32$, $\sigma_i = 163 + 374 \ln \lambda - 542(\ln \lambda)^2$, угол конусности $\alpha = 0,21$ рад, радиусный переход $R_p = 1$ мм, длина калибрующего участка 8 мм, коэффициент трения $f = 0,1$.

Из сопоставления кривых на рис. 3 видно, что противонатяжение заметно увеличивает значения меридиональных деформаций e_l . Длина готовой трубы при волочении с противонатяжением получается большей, чем при волочении без противонатяжения. Противонатяжение в начале очага пластической деформации существенно уменьшает утолщение стенки трубы по сравнению с обычным волочением, а затем к выходу из очага деформации способствует утонению стенки трубы. Изменение толщины стенки трубы в зависимости от величины противонатяжения составляет значительную величину – до 15 % от исходной толщины стенки. Регулируя величину противонатяжения на входе в волоку, возможно изменять утолщение стенки трубы и на выходе из волоки получать толщину стенки, равную толщине исходной заготовки.

Из сопоставления кривых на рис. 4 видно, что противонатяжение резко снижает давление металла на стенки волоки, соответственно уменьшает внешнее трение при волочении, и вследствие этого повышается стойкость волоки. Это связано с тем, что при

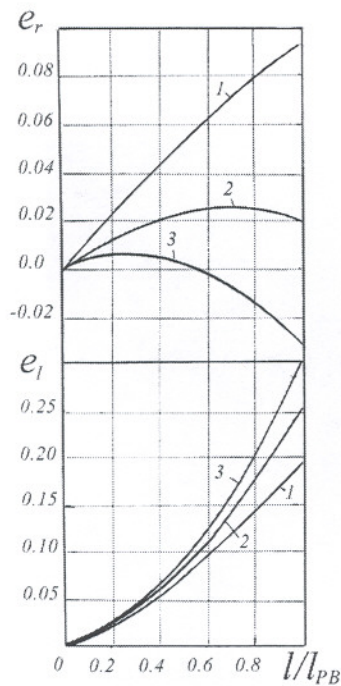


Рис. 3. Характер распределения параметров деформированного состояния по длине рабочего канала волокна в зависимости от противонапряжения
 1- $\sigma_{l_{np}} = 0$, 2- $\sigma_{l_{np}} = 70$ МПа, 3- $\sigma_{l_{np}} = 100$ МПа

приложении к протягиваемой трубе двух противоположно направленных растягивающих сил в ней еще до входа в волокно возникают упругие деформации. Поэтому для осуществления пластической деформации металла трубы в канале волокна необходимо приложить небольшое давление волокна. При обычном волочении экстремум контактного давления наблюдается на выходе трубы из канала волокна, при противонапряжении $\sigma_{l_{np}} = 100$ МПа экстремум смещается к входу в рабочий канал волокна. Меридиональное напряжение по длине канала волокна возрастает на величину напряжения противонапряжения.

Таким образом, предложенная математическая модель позволяет установить общие закономерности формирования напряженно-

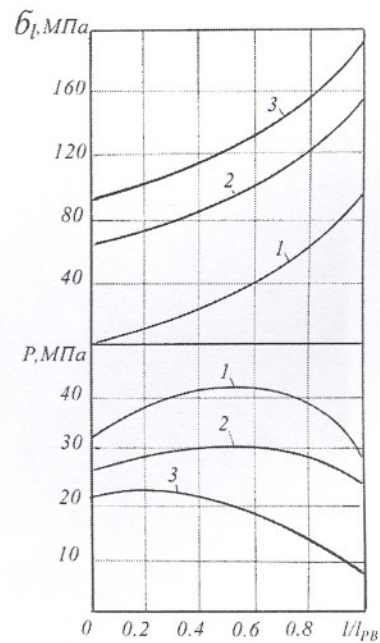


Рис. 4. Характер распределения параметров напряженного состояния по длине рабочего канала волокна в зависимости от противонапряжения
 1- $\sigma_{l_{np}} = 0$, 2- $\sigma_{l_{np}} = 70$ МПа, 3- $\sigma_{l_{np}} = 100$ МПа

деформированного состояния волочения тонкостенных труб с противонапряжением.

Результаты проведенных исследований использовались при разработке технологии производства труб повышенной точности для автомобилестроения, профильных труб и труб малых размеров.

Список литературы

1. Перлин И. Л., Ерманок М. З. Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
2. Савин Г. А. Волочение труб. М.: Металлургия, 1993. – 336 с.
3. Ерманок М. З., Ватрушин Л. С. Волочение легких сплавов. М.: ВИЛС, 1996. – 216 с.
4. Бахвалов Н. С. Численные методы. М.: Наука, 1975. – 122 с.
5. Гречников Ф. В. Деформирование анизотропных материалов. М.: 1998. – 488 с.

ANALYSIS OF NON-BAR BACK PULL DRAWING FOR THIN-WALLED TUBES

© 2003 V. R. Kargin, E. V. Shokova, B. V. Kargin

Samara State Aerospace University

Theoretical study of a non-bar back pull drawing process for thin-walled tubes has been carried out. A complete set of equations is given permitting the determination of both stress and deformation fields required for the proper selection of drawing parameter and the tool to be used.