

УДК 539.374; 621.983

Условие потери устойчивости в виде гофров при обжиге трубной заготовки из анизотропного материала

К.С. Ремнев, С.С. Яковлев

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», 300012, Тула, Российская Федерация, пр-т Ленина, 92.

Buckling of an anisotropic round billet subject to external overpressure

K.S. Remnev, S.S. Yakovlev

Tula State University, Lenina ave., 92, 300012, Tula, Russian Federation.

 e-mail: mpf-tula@rambler.ru

i Круговые конические оболочки, используемые в конструкции реактивных двигателей, летательных аппаратов, резервуаров и т. п., формируются при обжиге трубных заготовок в матрице конического профиля. Задачи устойчивости конических оболочек значительно труднее, чем прямоугольных пластин, цилиндрических оболочек, так как структура исходных уравнений более сложная. В предлагаемой работе для исследования потери устойчивости конической оболочки используется энергетический метод. Материал трубной заготовки принимается анизотропным, обладающий цилиндрической анизотропией механических свойств. Разработан критерий потери устойчивости в виде образования гофров при обжиге трубной заготовки из анизотропного материала. Установлено влияние технологических параметров и анизотропии механических свойств материала заготовки на условия устойчивого протекания операции обжига трубных заготовок. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета анизотропии механических свойств исходной трубной заготовки.

Ключевые слова: анизотропия материала, гофрообразование, обжим, матрица конического профиля, энергетический метод, устойчивость, трубная заготовка.

i Circular conical shells used in jet engines, aircraft, tanks, etc. are formed by swaging round billets in conical dies. Buckling problems for conical shells are much more challenging than those for rectangular plates and cylindrical shells because the structure of governing equations is more complicated. In this paper, the buckling failure of a conical shell is analyzed using the energy method. The round billet material is considered to be cylindrically anisotropic. A criterion for buckling (corrugation) of an anisotropic tube under external overpressure is developed. The influence of the technological parameters and anisotropic mechanical properties of the billet material on the stability of swaging round billets is established. The obtained results show that anisotropy in mechanical properties of the original round billet should be taken into account.

Keywords: anisotropic material, corrugation, swaging, conical die, energy method, stability, round billet.

Круговые конические оболочки используются в конструкциях реактивных двигателей, летательных аппаратов, резервуаров и т. п. Они формируются при обжиге трубных заготовок в матрице конического профиля (рис. 1). Под действием продольной внешней силы заготовка перемещается относительно матрицы и по мере продвижения в ее рабочую полость принимает форму конической оболочки [1–3].

При исследовании потери устойчивости в виде гофров операции обжига трубной заготовки принималось, что реализуется плоское напряженное состояние, при котором меридиональные и широтные напряжения являются сжимающими. При определенной величине продольных наружных напряжений на детали появляются поперечные или продольные волны. Вид потери устойчивости заготовки зависит в основном от относительной толщины стенки s/D заготовки, ее материала, условий закрепления заготовки в штампе и формы рабочей полости матрицы для обжига. Поперечные круговые волны возникают при обжиге относительно толстостенных заготовок, у которых $s/D = 0,03 \dots 0,035$. Продольные волны, направленные вдоль образующей, появляются при обжиге относительно тонкостенных заготовок, у которых $s/D < 0,02$. При $s/D = 0,02 \dots 0,03$ возможна потеря устойчивости заготовки как в виде круговых, так и в виде продольных волн. Вероятность появления продольных волн возрастает не только с уменьшением отношения s/D , но и со снижением сил трения [2–5].

Прокат, подвергаемый процессам пластического деформирования, как правило, обладает анизотропией механических свойств, которая может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивое протекание технологических процессов обработки металлов давлением [6–11].

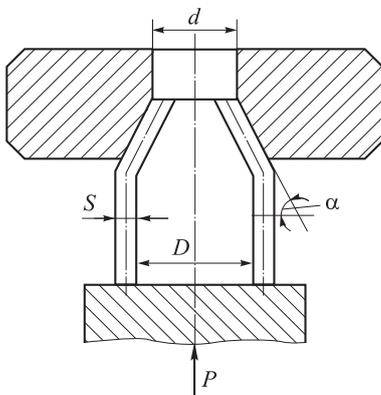


Рис. 1. Схема обжига трубчатых заготовок в конической матрице

Цель работы — разработка критерия потери устойчивости в виде гофров при обжиге трубной заготовки и определение с помощью этого критерия влияния технологических параметров и анизотропии механических свойств материала заготовки на величину предельного коэффициента обжига.

Решение задач устойчивости конических оболочек значительно труднее, чем прямоугольных пластин и цилиндрических оболочек, так как структура исходных уравнений является более сложной. В связи с этим, прежде чем привести основные соотношения конических оболочек, изложим некоторые необходимые сведения из теории поверхностей [12–14].

Элементы теории поверхностей. Рассмотрим участок поверхности (рис. 2) и выберем на нем сетку ортогональных криволинейных линий [12]:

линии U — каждая из них соответствует определенному значению некоторого параметра ξ : $\xi = \xi_0, \xi = \xi_1, \xi = \xi_2$ и т. д.;

линии V — каждая из которых соответствует некоторому значению параметра η : $\eta = \eta_0, \eta = \eta_1, \eta = \eta_2$ и т. д.

Принимаем условие, что через любую точку поверхности проходит одна и только одна линия каждого семейства.

Семейства линий U и V называются координатными линиями. Конкретный смысл параметров ξ и η может быть различным. Например, на участке цилиндрической поверхности (рис. 3)

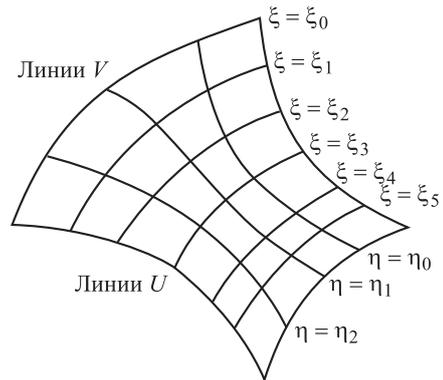


Рис. 2. Сетка координатных линий на поверхности

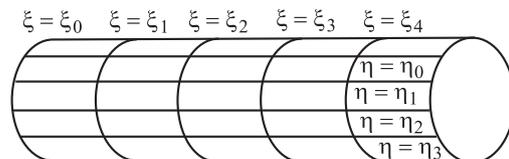


Рис. 3. Координатные линии на цилиндрической поверхности

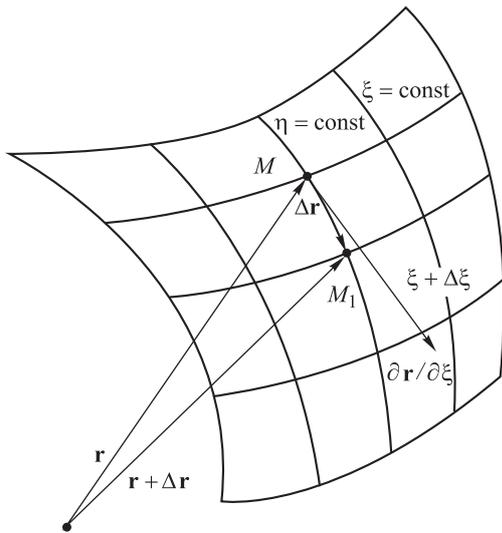


Рис. 4. Радиус-вектор точки поверхности как функция криволинейных координат

линии U совпадают с образующими, а линии V лежат в поперечном сечении. В качестве параметров ξ и η можно выбрать длины отрезков, отложенных вдоль линий.

На участке сферической поверхности в качестве параметров ξ и η удобно выбрать угол широты и угол долготы.

Если обозначить \mathbf{r} радиус-вектор точки поверхности относительно произвольного начала O , то \mathbf{r} будет однозначной векторной функцией криволинейных координат ξ и η (рис. 4):

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(\xi, \eta). \tag{1}$$

Направления векторов $\partial \mathbf{r} / \partial \xi$ и $\partial \mathbf{r} / \partial \eta$ совпадают с направлением касательных к линиям ξ и η соответственно в точке M . Плоскость, проведенная через векторы $\partial \mathbf{r} / \partial \xi$ и $\partial \mathbf{r} / \partial \eta$, является плоскостью, касательной к поверхности в точке M . Линия, перпендикулярная к плоскости, представляет собой нормаль к поверхности; направление нормали определяется векторным произведением векторов

$$\mathbf{N} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \eta}. \tag{2}$$

Единичный вектор нормали

$$\mathbf{n} = \frac{\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \eta}}{\left| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \eta} \right|}. \tag{3}$$

Если координатные линии составляют угол α , то

$$\cos \alpha = \frac{\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \eta}}{\left| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi} \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \eta} \right|} = \frac{a_{12}}{\sqrt{a_{11} a_{22}}}, \tag{4}$$

где a_{11}, a_{12}, a_{22} — коэффициенты первой квадратичной формы,

$$a_{11} = \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi} \right)^2; \quad a_{12} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \eta}; \quad a_{22} = \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \eta} \right)^2. \tag{5}$$

В первом приближении бесконечно малый участок поверхности можно заменить бесконечно малым участком касательной плоскости. Воспользуемся этим чтобы определить дифференциал ds дуги, проходящей через точку M (рис. 5).

Будем под $d\mathbf{r}$ понимать дифференциал радиус-вектора \mathbf{r} перемещения из точки M по касательной к данной дуге. Значение ds^2 можно вычислить по формуле $ds^2 = d\mathbf{r} d\mathbf{r} = dr^2$.

Полный дифференциал $d\mathbf{r}$ определяется уравнением

$$d\mathbf{r} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \xi} d\xi + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \eta} d\eta, \tag{6}$$

отсюда

$$ds^2 = a_{11} d\xi^2 + 2a_{12} d\xi d\eta + a_{22} d\eta^2. \tag{7}$$

Выражение (7) называется первая квадратичная форма поверхности. Коэффициенты a_{11}, a_{12}, a_{22} зависят от криволинейных координат точки M . Для данной точки поверхности эти коэффициенты определяются однозначно. Зная первую квадратичную форму поверхности, можно найти угол между любыми линиями, проходящими через эту точку (угол между касательными к этим линиям). Интегрируя выражение для ds вдоль некоторой кривой, можно

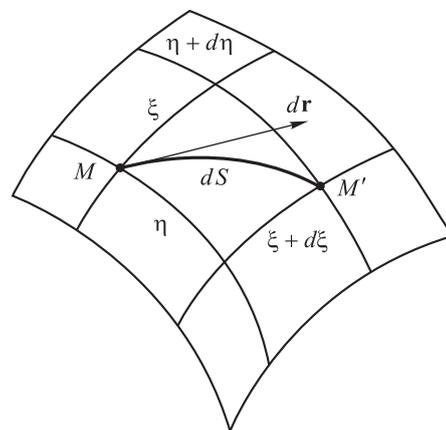


Рис. 5. К исследованию поверхности вблизи точки M

вычислить полную длину дуги кривой. Для ортогональной координатной сетки по (5) имеем

$$J_1 = ds^2 = a_{11}d\xi^2 + a_{22}d\eta^2. \quad (8)$$

Если радиус-вектор \mathbf{r} выразить через декартовы координаты x, y, z , то по (5) получим:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \left(\frac{\partial x}{\partial \xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \xi}\right)^2; \\ a_{12} &= \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \frac{\partial z}{\partial \xi} \frac{\partial z}{\partial \eta}; \\ a_{22} &= \left(\frac{\partial x}{\partial \eta}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \eta}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \eta}\right)^2. \end{aligned} \quad (9)$$

В основе теории изгиба тонких оболочек лежит гипотеза прямых нормалей, по которой точки, принадлежащие нормали к срединной поверхности до деформации, остаются и после деформации лежащими на прямой, нормальной к срединной поверхности. Эта гипотеза по существу сводится к предположению, что сдвиги в нормальных сечениях малы по сравнению с углами поворота нормалей и ими можно пренебречь. Отнесем срединную поверхность к линиям кривизны, которые ортогональны ξ и η , отсюда следует

$$a_{11} = A_1^2, \quad a_{22} = A_2^2, \quad a_{12} = 0.$$

Величины A_1 и A_2 эквивалентны коэффициентам Ламе: $A_1 = H_1, \quad A_2 = H_2$. Совместим линии ξ с нормалью к срединной поверхности и положим $H_3 = 1$.

Если принять, $\xi = z$ (расстояние от срединной поверхности $-h/2 \leq z \leq h/2$, где h — толщина оболочки) и $z \ll R_1, \quad z \ll R_2$ (R_1 и R_2 — радиусы кривизны линий ξ и η), то можно показать, что деформации ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma$ — линейные и сдвиговая) в срединной поверхности будут определяться по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{A_1} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \eta} v - \frac{w}{R_1}; \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{A_2} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial \xi} u - \frac{w}{R_2}; \\ \gamma &= \frac{A_1}{A_2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u}{A_1} \right) + \frac{A_2}{A_1} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{v}{A_2} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь u, v, w — перемещения точек срединной поверхности по осям ξ, η, ζ .

В плоскости, отстоящей от срединной на расстоянии z , имеем

$$\begin{aligned} \varepsilon_1^z &= \varepsilon_1 + z\chi_1; \\ \varepsilon_2^z &= \varepsilon_2 + z\chi_2; \\ \gamma^z &= \gamma + 2z\chi_3, \end{aligned} \quad (11)$$

где χ_1, χ_2 — изменения кривизны; χ_3 — изменение кручения срединной поверхности, которые рассчитываются по формулам

$$\begin{aligned} \chi_1 &= -\frac{1}{A_1} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{u}{R_1} + \frac{1}{A_1} \frac{\partial w}{\partial \xi} \right) - \\ &\quad - \frac{1}{A_1 A_2} \left(\frac{v}{R_2} + \frac{1}{A_2} \frac{\partial w}{\partial \eta} \right) \frac{\partial A_1}{\partial \eta}; \\ \chi_2 &= -\frac{1}{A_2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{v}{R_2} + \frac{1}{A_2} \frac{\partial w}{\partial \eta} \right) - \\ &\quad - \frac{1}{A_1 A_2} \left(\frac{u}{R_1} + \frac{1}{A_1} \frac{\partial w}{\partial \xi} \right) \frac{\partial A_2}{\partial \xi}; \\ \chi_3 &= -\frac{1}{2} \left[\frac{A_2}{A_1} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{v}{A_2 R_2} + \frac{1}{A_2^2} \frac{\partial w}{\partial \eta} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{A_1}{A_2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{u}{A_1 R_1} + \frac{1}{A_1^2} \frac{\partial w}{\partial \xi} \right) \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

Во многих задачах можно упростить выражение (12) для параметров изменения кривизны и кручения, считая перемещения «в массиве» материала u, v малыми по сравнению с прогибом w . Тогда

$$\begin{aligned} \chi_1 &= -\frac{1}{A_1} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{A_1} \frac{\partial w}{\partial \xi} \right) - \frac{1}{A_1 A_2^2} \frac{\partial w}{\partial \eta} \frac{\partial A_1}{\partial \eta}; \\ \chi_2 &= -\frac{1}{A_2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{1}{A_2} \frac{\partial w}{\partial \eta} \right) - \frac{1}{A_1^2 A_2} \frac{\partial w}{\partial \xi} \frac{\partial A_2}{\partial \xi}; \\ \chi_3 &= -\frac{1}{2} \left[\frac{A_2}{A_1} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{A_2^2} \frac{\partial w}{\partial \eta} \right) + \frac{A_1}{A_2} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{1}{A_1^2} \frac{\partial w}{\partial \xi} \right) \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Элементы теории конических оболочек.

Примем, что материал трубной заготовки анизотропный, обладающий цилиндрической анизотропией [13].

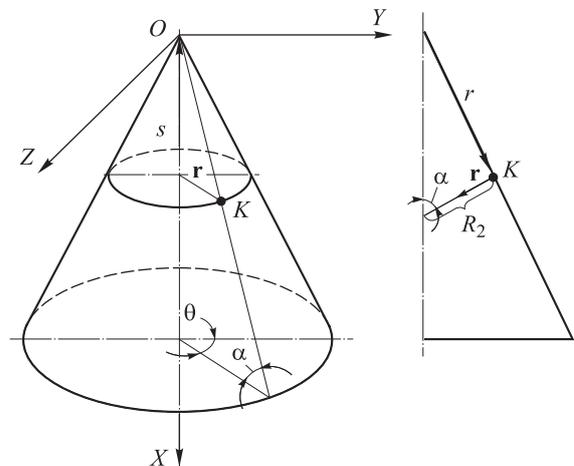


Рис. 6. Система координат при рассмотрении конических оболочек

Приведем основные уравнения линейной теории конических оболочек. Определим коэффициенты первой квадратичной формы недеформированной срединной поверхности оболочки. Расположим оси координат так, как показано на рис. 6.

Пусть начало координат совпадает с вершиной конуса. Определим положение точки K срединной поверхности радиус-вектором \mathbf{r} , проведенным из вершины конуса O , и углом θ между осевой плоскостью, проходящей через рассматриваемую точку, и некоторой неподвижной осевой плоскостью. Длину вектора \mathbf{r} обозначим s , а угол наклона образующей к основанию — α . Проекция \mathbf{r} на оси координат

$$\begin{aligned} x &= s \sin \alpha; \\ y &= s \cos \alpha \cos \theta; \\ z &= s \cos \alpha \sin \theta. \end{aligned} \quad (14)$$

Будем рассматривать величины s и θ как криволинейные координаты на срединной поверхности $\xi = s$, $\eta = \theta$. Коэффициенты первой квадратичной формы $a_{11} = A_1^2$, $a_{22} = A_2^2$ определяются по формулам (9)

$$A_1 = 1; \quad A_2 = s \cos \alpha. \quad (15)$$

Вычислим деформации срединной поверхности и параметры изменения кривизны, учитывая, что радиусы кривизны срединной поверхности

$$R_1 = \infty; \quad R_2 = s / \operatorname{tg} \alpha. \quad (16)$$

Удлинения и сдвиги в срединной поверхности по формулам (10) с учетом (15) и (16) определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{\partial u}{\partial s}; \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{s \cos \alpha} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{s} - \frac{w \operatorname{tg} \alpha}{s}; \\ \gamma &= \frac{1}{s \cos \alpha} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial s} - \frac{v}{s}. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь u , v и w — смещения точек срединной поверхности соответственно в направлении образующей, вдоль параллельного круга (по окружности, получившейся при пересечении срединной поверхности с плоскостью, перпендикулярной к оси оболочки) и по внутренней нормали к поверхности.

Изменение кривизны и кручения рассчитываются по формулам (12)

$$\begin{aligned} \chi_1 &= -\frac{\partial^2 w}{\partial s^2}; \\ \chi_2 &= -\frac{1}{s^2 \cos^2 \alpha} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{s^2 \cos \alpha} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{1}{s} \frac{\partial w}{\partial s}; \\ \chi_3 &= -\frac{1}{2} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{s} \frac{\partial v}{\partial s} - \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{s^2} v + \frac{2}{s \cos \alpha} \frac{\partial^2 w}{\partial s \partial \theta} - \frac{2}{s^2 \cos \alpha} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

В упрощенном варианте решения в выражениях χ_2 и χ_3 будем пренебрегать членами, зависящими от перемещения v . Тогда

$$\begin{aligned} \chi_1 &= -\frac{\partial^2 w}{\partial s^2}; \\ \chi_2 &= -\frac{1}{s^2 \cos^2 \alpha} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \frac{1}{s} \frac{\partial w}{\partial s}; \\ \chi_3 &= -\frac{1}{s \cos \alpha} \frac{\partial^2 w}{\partial s \partial \theta} + \frac{1}{s^2 \cos \alpha} \frac{\partial w}{\partial \theta}. \end{aligned} \quad (19)$$

Энергетическое условие потери устойчивости конической оболочки. Для исследования потери устойчивости конической оболочки используем энергетический метод. В соответствии с этим методом [1–3] принимается, что работа внутренних сил изгиба и кручения оболочки приравнивается к работе внешних сил на контуре элемента при потере устойчивости оболочки

$$A_1 = A_2. \quad (20)$$

Уравнение работы внутренних сил при выпучивании поверхности конической оболочки может быть получено из известного уравнения устойчивости прямоугольной пластины путем перехода от прямоугольной системы координат к конической и использования выражений, описывающих изменение кривизны срединной поверхности в меридиональном χ_1 и широтном направлениях χ_2 и изменение кривизны кручения срединной поверхности χ_3 .

Для анизотропного материала с цилиндрической анизотропией уравнение (20) с использованием уравнения из работ [12–14] принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2} E_p J \iint \left[\frac{1}{\beta g} (C_{22} \chi_1^2 - 2C_{12} \chi_1 \chi_2 + C_{11} \chi_2^2) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{4}{\beta C_{33}} \chi_3^2 - (1-n) \frac{\chi^2}{\sigma_i^2} \right] \cos \alpha s ds d\theta, \end{aligned} \quad (21)$$

где

$$C_{11} = 1 + \frac{1}{R_x}; \quad C_{12} = -1; \quad C_{22} = 1 + \frac{1}{R_\theta};$$

$$C_{33} = \frac{2}{R_{s\theta}}; \quad \beta = \frac{3}{2(1 + 1/R_x + 1/R_\theta)}; \quad (22)$$

$\chi = \sigma_s \chi_1 + \sigma_\theta \chi_2 + 2\tau_{s\theta} \chi_3$; $g = c_{11}c_{22} - c_{12}^2$; σ_s , σ_θ , $\tau_{s\theta}$ — нормальные и касательные напряжения соответственно.

Параметры изменения кривизны χ_1 , χ_2 и кручения определяются по формулам (19); E_p — модуль пластичности, $E_p = \sigma_i / \varepsilon_i$; σ_i — кривая упрочнения, $\sigma_i = C\varepsilon_i^n$; J — момент инерции площади поперечного сечения шириной, равной единице, $J = t^3/12$; t — толщина оболочки; σ_i и ε_i — интенсивности напряжений и деформаций соответственно.

Работа внешних сил на контуре элемента при потере устойчивости оболочки рассчитывается по формуле [13]

$$A_2 = -\frac{t_0}{2} \iint \left[\sigma_s \left(\frac{\partial w}{\partial s} \right)^2 + \sigma_\theta \left(\frac{1}{s \cos \alpha} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 + 2\tau_{s\theta} \frac{\partial w}{\partial s} \frac{1}{s \cos \alpha} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right] \cos \alpha \, ds \, d\theta. \quad (23)$$

Учитывая сказанное выше, уравнение критического состояния элемента конической оболочки принимает вид

$$\frac{1}{2} E_p J \iint \left[\frac{1}{\beta g} (C_{22} \chi_1 - 2C_{12} \chi_1 \chi_2 + C_{11} \chi_2^2) + \frac{4}{\beta C_{33}} \chi_3^2 - (1-n) \frac{\chi^2}{\sigma_i^2} \right] \cos \alpha \, ds \, d\theta + \frac{t_0}{2} \iint \left[\sigma_s \left(\frac{\partial w}{\partial s} \right)^2 + \sigma_\theta \left(\frac{1}{s \cos \alpha} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 + 2\tau_{s\theta} \frac{\partial w}{\partial s} \frac{1}{s \cos \alpha} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right] \cos \alpha \, ds \, d\theta = 0. \quad (24)$$

Для определения критических режимов деформирования в соответствии с ожидаемой формой потери устойчивости (осесимметричной с образованием поперечных круговых волн σ_{skp} или осесимметричной с образованием продольных волн $\sigma_{\theta kp}$, направленных вдоль образующей оболочки) уравнение формы прогиба нужно задавать в виде

$$w = f_1(s) \text{ или } w = f_2(s) f_3(\theta) \quad (25)$$

и минимизировать уравнения по входящим геометрическим параметрам, обеспечивающим $\sigma_s < \sigma_{skp}$ и $\sigma_\theta < \sigma_{\theta kp}$.

Приведенные выше соотношения позволяют оценить влияние технологических параметров и анизотропии механических свойств материала заготовки на условия устойчивого протекания операции обжима трубных заготовок в пластической области без образования складок.

Влияние технологических параметров на условия устойчивого протекания операции обжима трубных заготовок. Расчеты выполнены для стали 08кп и алюминиевого сплава АМг6 со следующими механическими характеристиками: сталь 08кп — $C = 868$ МПа; $n = 0,22$; $R_p = 0,817$; $R_\theta = 0,783$; алюминиевый сплав АМг6 — $C = 470$ МПа; $n = 0,14$; $R_p = 0,67$; $R_\theta = 0,54$ [11]. Функция прогиба задана в виде

$$w = w_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi r}{\rho_0} \right) \left(1 - \cos \frac{2\pi r}{\rho_k} \right) \cos(m\theta),$$

где m — число продольных волн ($m = 5$).

Зависимость изменения предельного коэффициента обжима $K_{об.пр}$ от числа продольных волн m при обжиме трубной заготовки приведены на рис. 7.

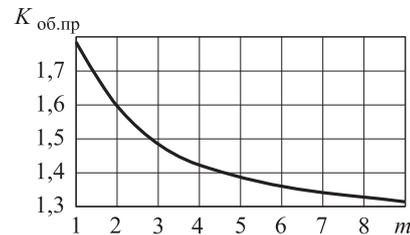


Рис. 7. Зависимость изменения $K_{об.пр}$ от m при $\alpha = 20^\circ$; $\mu = 0,05$; $r_0 = 50$ мм; $t_0 = 1$ мм

Из анализа приведенной на рис. 7 зависимости установлено, что с увеличением числа продольных волн m от 1 до 9 значение предельного коэффициента обжима $K_{об.пр}$ для трубной заготовки из стали 08кп уменьшается на 63 %.

Анализ результатов расчета показывает, что угол конусности матрицы α не влияет на величину предельного коэффициента обжима $K_{об.пр}$ при изменении $\alpha = 10...45^\circ$.

Влияние анизотропии механических свойств материала заготовки на значение предельного коэффициента обжима. Оценим влияние коэффициентов нормальной анизотропии механических свойств R , а также коэффициентов цилиндрической анизотропии механических свойств R_p и R_θ на значение предельного коэффициента обжима $K_{об.пр}$.

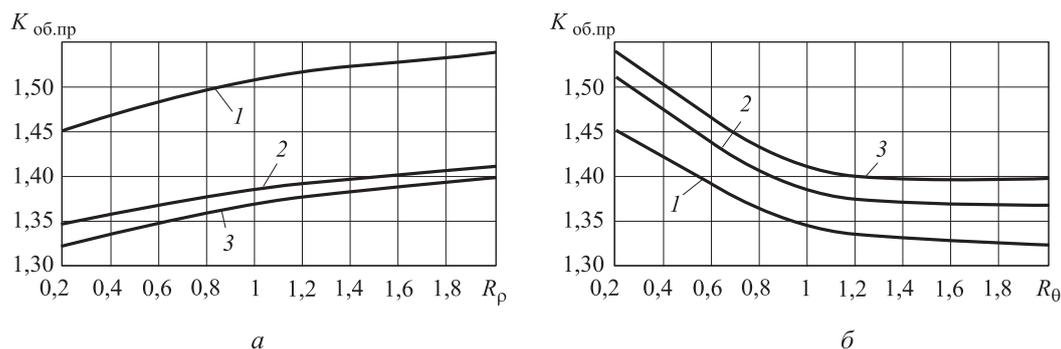


Рис. 8. Зависимости изменения $K_{об.пр}$ от R_p (а) и R_θ (б):
 1 — $R_\theta, R_p = 0,2$; 2 — $R_\theta, R_p = 1$; 3 — $R_\theta, R_p = 2$

Зависимости значения $K_{об.пр}$ от коэффициентов цилиндрической анизотропии механических свойств R_p и R_θ приведены на рис. 8. Расчеты выполнены при $C = 869$ МПа; $n = 0,22$; $r_0 = 50$ мм; $t_0 = 1$ мм; $\mu = 0,05$; $\alpha = 20^\circ$.

Таким образом, при оценке условий устойчивого протекания процессов обжима трубных заготовок необходимо учитывать анизотропию механических свойств исходной трубной заготовки.

Анализ графических зависимостей, представленных на рис. 8, показывает, что с увеличением коэффициентов цилиндрической анизотропии R_p и уменьшением R_θ предельный коэффициент обжима $K_{об.пр}$ увеличивается.

Выводы

1. С увеличением D_0/s_0 ($D_0 = 2r_0$) значения предельного коэффициента обжима $K_{об.пр}$ резко уменьшаются ($\alpha = 20^\circ$; $r_0 = 50$ мм; $t_0 = 1$ мм; $\mu = 0,05$). Рост значения D_0/s_0 с 25 до 250 сопровождается уменьшением предельного коэффициента обжима $K_{об.пр}$ на 30 % при прочих равных условиях деформирования, как для алюминиевого сплава АМг6, так и стали 08 кп.

2. С увеличением коэффициента трения μ предельный коэффициент обжима $K_{об.пр}$ незначительно уменьшается (линейно), причем в

диапазоне изменения $\mu = 0,02 \dots 0,2$ значение предельного коэффициента обжима $K_{об.пр}$ для стали 08кп выше чем для алюминиевого сплава АМг6 при одинаковом значении коэффициента трения μ .

3. Большие значения предельного коэффициента обжима $K_{об.пр}$ достигаются за счет меньших значений показателя деформационного упрочнения n .

4. С увеличением коэффициента нормальной анизотропии R происходит незначительный рост предельного коэффициента обжима $K_{об.пр}$ (до 10 %).

5. С ростом коэффициента цилиндрической анизотропии R_p предельный коэффициент обжима $K_{об.пр}$ увеличивается, причем для коэффициента цилиндрической анизотропии $R_\theta = 0,2$ при изменении $R_p = 0,2 - 2$ характерен наибольший предельный коэффициент обжима $K_{об.пр}$.

6. С увеличением коэффициента цилиндрической анизотропии R_θ предельный коэффициент обжима $K_{об.пр}$ уменьшается. При одинаковых значениях коэффициента цилиндрической анизотропии R_θ меньшему значению коэффициента цилиндрической анизотропии R_p соответствует меньшее значение предельного коэффициента обжима $K_{об.пр}$.

Литература

- [1] Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. *Технология холодной штамповки*. Москва, Машиностроение, 1989. 304 с.
- [2] Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. *Технология и автоматизация листовой штамповки*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 480 с.
- [3] Яковлев С.С., ред. *Ковка и штамповка: Справочник*. В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка. Москва, Машиностроение, 2010. 732 с.
- [4] Романовский В.П. *Справочник по холодной штамповке*. Ленинград, Машиностроение, 1979. 520 с.
- [5] Шофман Л.А. *Теория и расчеты процессов холодной штамповки*. Москва, Машиностроение, 1964. 365 с.
- [6] Яковлев С.П., Кухарь В.Д. *Штамповка анизотропных заготовок*. Москва, Машиностроение, 1986. 136 с.

- [7] Адамеску Р.А., Гельд П.В., Митюшков Е.А. *Анизотропия физических свойств металлов*. Москва, Metallurgia, 1985. 136 с.
- [8] Микляев П.Г., Фридман Я.Б. *Анизотропия механических свойств металлов*. Москва, Metallurgia, 1986. 224 с.
- [9] Гречников Ф.В. *Деформирование анизотропных материалов*. Москва, Машиностроение, 1998. 446 с.
- [10] Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А. *Обработка давлением анизотропных материалов*. Кишинев, Квант, 1997. 331 с.
- [11] Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Трегубов В.И. *Теория и технология штамповки анизотропных материалов*. Москва, Машиностроение, 2012. 400 с.
- [12] Вольмир А.С. *Устойчивость деформируемых систем*. Москва, Наука, 1967. 984 с.
- [13] Головлев В.Д. *Расчеты процессов листовой штамповки*. Москва, Машиностроение, 1974. 136 с.
- [14] Мошнин Е.Н. *Технология штамповки крупногабаритных деталей*. Москва, Машиностроение, 1973. 238 с.

References

- [1] Averkiev Iu.A., Averkiev A.Iu. *Tekhnologiya kholodnoi shtampovki* [Cold stamping technology]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1989. 304 p.
- [2] Popov E.A., Kovalev V.G., Shubin I.N. *Tekhnologiya i avtomatizatsiya listovoi shtampovki* [Technology and automation stamping]. Moscow, Bauman Press, 2000. 480 p.
- [3] *Kovka i shtampovka: Spravochnik: V 4 t. T. 4 Listovaya shtampovka* [Forging and Stamping: Reference: In 4 vol. Vol. 4. Stamping]. Ed. Iakovlev S.S. Moscow, Mashinostroenie publ., 2010. 732 p.
- [4] Romanovskii V.P. *Spravochnik po kholodnoi shtampovke* [Handbook of cold forming]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1979. 520 p.
- [5] Shofman L.A. *Teoriya i raschety protsessov kholodnoi shtampovki* [Theory and calculations cold forming processes]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1964. 365 p.
- [6] Iakovlev S.P., Kukhar' V.D. *Shtampovka anizotropnykh zagotovok* [Stamping blanks anisotropic]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1986. 136 p.
- [7] Adamesku R.A., Gel'd P.V., Mitiushkov E.A. *Anizotropiya fizicheskikh svoystv metallov* [Anisotropy of physical properties of metals]. Moscow, Metallurgiya publ., 1985. 136 p.
- [8] Mikliaev P.G., Fridman Ia.B. *Anizotropiya mekhanicheskikh svoystv metallov* [Anisotropy of mechanical properties of metals]. Moscow, Metallurgiya publ., 1986. 224 p.
- [9] Grechnikov F.V. *Deformirovanie anizotropnykh materialov* [Deformation of anisotropic materials]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1998. 446 p.
- [10] Iakovlev S.P., Iakovlev S.S., Andreichenko V.A. *Obrabotka davleniem anizotropnykh materialov* [Forming anisotropic materials]. Kishinev, Kvant publ., 1997. 331 p.
- [11] Iakovlev S.S., Kukhar' V.D., Tregubov V.I. *Teoriya i tekhnologiya shtampovki anizotropnykh materialov* [Theory and technology of forming anisotropic materials]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2012. 400 p.
- [12] Vol'mir A.S. *Ustoichivost' deformiruemykh sistem* [Stability of Deformable Systems]. Moscow, Nauka publ., 1967. 984 p.
- [13] Golovlev V.D. *Raschety protsessov listovoi shtampovki* [Calculations stamping processes]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1974. 136 p.
- [14] Moshnin E.N. *Tekhnologiya shtampovki krupnogabaritnykh detalei* [Metal Stamping large parts]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1973. 238 p.

Статья поступила в редакцию 24.06.2014

Информация об авторах

ЯКОВЛЕВ Сергей Сергеевич (Тула) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Механика пластического формоизменения». ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» (300012, Тула, Российская Федерация, пр-т Ленина, 92, e-mail: mpf-tula@rambler.ru).

РЕМНЕВ Кирилл Сергеевич (Тула) — кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Механика пластического формоизменения». ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» (300012, Тула, Российская Федерация, пр-т Ленина, 92, e-mail: mpf-tula@rambler.ru).

Information about the authors

YAKOVLEV Sergey Sergeevich (Tula) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Mechanics of Plastic Forming» Department. Tula State University (TSU, Lenina ave., 92, 300012, Tula, Russian Federation, e-mail: mpf-tula@rambler.ru).

REMNEV Kirill Sergeevich (Tula) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Doctoral Student of «Mechanics of Plastic Forming» Department. Tula State University (TSU, Lenina ave., 92, 300012, Tula, Russian Federation, e-mail: mpf-tula@rambler.ru).