



Колыхалов Д. Г., Марьин Б. Н., Феоктистов С. И., Шпорт Р. В.  
D. G. Kolykhalov, B. N. Maryin, S. I. Feoktistov, R. V. Shport

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИМА ПОЛЫХ И ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛЕДЯНЫХ СТЕРЖНЕЙ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА**

**MODELLING OF THE PROCESS OF PRESSING HOLLOW/PIPE BILLETS USING ICE CORES AS THE WORKING MEDIUM**

**Колыхалов Дмитрий Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: dgk@mail.knastu.ru.

**Mr. Dmitry G. Kolykhalov** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Aviation technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: dgk@mail.knastu.ru

**Марьин Борис Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Машины и технология литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maryinsb@mail.ru.

**Mr. Boris N. Maryin** – Doctor of Engineering, Professor, Department of Foundry Machinery and Technology, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: maryinsb@mail.ru.

**Феоктистов Сергей Иванович** – доктор технических наук, декан самолетостроительного факультета, заведующий кафедрой «Технология самолетостроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ssf@knastu.ru.

**Mr. Sergey I. Feoktistov** – Doctor of Engineering, Dean of the Aircraft Engineering Faculty, Head of the Aviation Technology Department (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ssf@knastu.ru.

**Шпорт Роман Вячеславович** – кандидат технических наук, начальник бюро АХК «Сухой».

**Mr. Roman V. Shport** – PhD in Engineering, Head of the Design Engineering Department, Aviation Holding Company "Sukhoi".

**Аннотация.** Рассмотрены возможности моделирования процесса обжима полых и трубчатых заготовок с использованием в качестве рабочего тела ледяных стержней

**Summary.** The paper explores possible ways of modeling the process of pressing/crimping hollow and pipe billets with the help of ice rods as a working medium.

**Ключевые слова:** деформирование заготовок; рабочие тела; замораживание воды; штамповая оснастка.

**Key words:** deformation of billets, working medium, water freezing, metal forming tools.

УДК 621.983.7.001.573

Важной проблемой в авиационной промышленности является изготовление высоко-ресурсных, надежных трубопроводов, которые работают в условиях комплексного нагружения. Они испытывают действия высоких давлений, сверхвысоких и низких температур, пульсирующей нагрузки и гидравлических ударов, поэтому к ним предъявляются высокие требования по механическим свойствам материала, качеству внешней и внутренней поверхностей, сохранению формы сечения, а также максимальному утонению стенок трубы.

Практика эксплуатации показывает, что наибольшее число разрушений трубопроводов связано с утонением их стенок в местах изгиба и перехода от одного диаметра к другому. Значительно снижают работоспособность трубопроводов такие факторы, как чрезмерная эл-

липкость и волнистость стенок, т.е. явления, сопровождающие процессы изготовления трубопроводов. Большое влияние на работоспособность трубопроводов оказывает качество заготовки тонкостенных труб, так как малейшие дефекты поверхности становятся концентраторами усталостных напряжений.

Детали из труб применяются во всех гидрогазовых системах летательных аппаратов, находят широкое применение в нефтяной, газовой, автомобильной промышленности и медицинской технике. Поэтому интенсификация технологических процессов формообразования деталей из тонкостенных трубчатых заготовок за счет увеличения степени деформации металла, достигаемой за одну операцию, совмещения операций, резкого сокращения сроков подготовки производства, трудозатрат и металлоемкости оснащения приобретает большое значение для всех формообразующих технологических процессов.

Перспективы использования и промышленного внедрения новых технологий связаны с применением современных труднодеформируемых материалов, титановых сплавов, а также с мобильностью, высокопроизводительностью, высокой культурой производства и с применением новых наполнителей труб.

Наполнители труб применяются для предотвращения потери устойчивости стенки трубы (гофрообразования) и отклонения от округлости (овальности) при ее гибке. Давление наполнителя, находящегося внутри трубы, должно уравнивать внутреннее напряжение в металле трубы, возникающее при гибке. В зависимости от марки материала, диаметра, толщины стенок и конфигурации труб при гибке в качестве наполнителя кроме жидкостных, легкоплавких и сыпучих материалов может использоваться лёд.

В работе рассмотрена задача использования в качестве рабочего тела ледяного стержня. Основной вопрос, ставившийся перед авторами, был связан с расширением технологических возможностей операций обжима полых и трубчатых заготовок при минимальных затратах на изготовление рабочего тела.

Это достигается тем, что внутри заготовки размещают рабочее тело из ледяного стержня. Технически получить ледяной стержень проще и дешевле, чем рабочее тело из других материалов (резины, полиуретана, снега).

Были использованы заготовки труб с техническими характеристиками:

- марка металла: Д16;
- внутренний диаметр 42 мм;
- толщина стенки 1,5 мм;
- длина заготовки 100 мм.

Схема процесса показана на рис. 1. Штмп состоит из неразъемной матрицы 1 и основания 2. В матрицу 1 снизу вставлена трубчатая заготовка 3, внутри которой находится рабочее тело 4, выполненное из стержня льда.

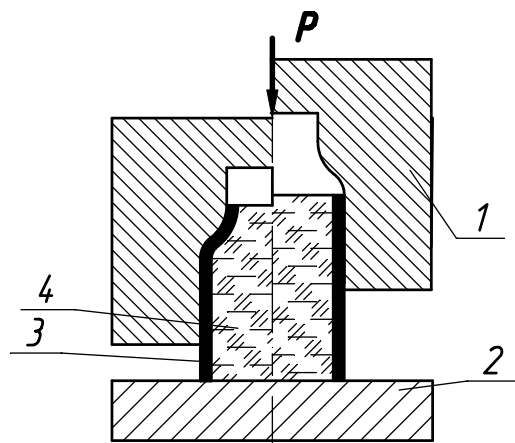


Рис. 1. Штмп для обжима трубчатой заготовки

Штамп работает следующим образом. На основании 2 устанавливают трубчатую заготовку 3, внутрь которой закладывают рабочее тело 4, выполненное из ледяного стержня. При помощи перемещения ползуна пресса с усилием  $P$  (на рис. 1 не показан) перемещается матрица 1, в результате чего происходит обжим трубы. Затем матрицу 1 поднимают вверх, производят выемку готовой детали с рабочим телом 4, которое впоследствии растает за счет положительной температуры рабочего помещения. В результате решается поставленная задача.

Данная схема может быть использована в авиационной, судостроительной и смежных с ними отраслях промышленности. Рабочее тело для передачи усилия при обжиге полых и трубчатых заготовок по жесткой матрице представляет собой ледяной стержень, расположенный во внутреннем объеме заготовки. Достигается расширение технологических возможностей операций обжима полых и трубчатых заготовок при минимальных затратах.

В листовой штамповке формоизменение заготовки наиболее часто осуществляется в условиях осевой симметрии деформирования.

Как установлено в работе [3], при величине отношения толщины заготовки к максимальному ее габариту 0,02 и менее, температура по толщине листа меняется незначительно, следовательно, ее можно считать постоянной. Переносом тепла по толщине материала с движущимися частицами также можно пренебречь. В нашем случае соотношение габаритов заготовки значительно меньше, чем 0,02. Температурный режим соблюдался  $-3...-12$  °С.

В этом случае радиальные и тангенциальные напряжения, действующие в очаге деформаций, можно считать главными напряжениями, которые усредняются по толщине и относятся к срединной поверхности как в безмоментной теории оболочек [5].

Силы трения и изгиба на ребре матрицы учитываются после получения окончательного решения по методике, изложенной в работе Е.А. Попова [4]. К числу допущений относятся также основные гипотезы деформационной теории.

При формоизменении осесимметричных оболочек, имеющих двойную кривизну (см. рис. 2), с учетом характера изменения толщины заготовки уравнения равновесия сил в проекциях на нормаль и касательную к срединной поверхности удобно представить в виде [6]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{d\rho} [\rho S(\rho) \sigma_\rho \sin \psi] &= -(q_n + q_\tau \operatorname{tg} \psi) \rho + (a_n + a_\tau \operatorname{tg} \psi) \frac{\gamma}{g} \rho \cdot S(\rho); \\ \frac{d}{d\rho} [\rho S(\rho) \sigma_\varphi] &= S(\rho) \sigma_\varphi - \frac{q_\tau}{\cos \psi} \rho + \frac{a_\tau}{\cos \psi} \frac{\gamma}{g} \rho \cdot S(\rho), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\psi$  - угол наклона касательной к образующей, отсчитываемый против часовой стрелки от горизонтали;  $q_n$  - проекция удельного давления на нормаль, направленную к центру кривизны;  $q_\tau$  - проекция удельного давления на касательную, направленную в сторону увеличения  $\rho$ ;  $a_n$  - проекция ускорения на нормаль;  $a_\tau$  - проекция ускорения на касательную;  $\gamma$  - удельный вес материала;  $g$  - ускорение свободного падения.

Уравнения равновесия получены для положительных направлений удельных давлений и ускорений, указанных на рис. 2.

Данные уравнения описывают все процессы формоизменяющих операций плоской заготовки. В табл. 1 показано, как изменяются величины, входящие в уравнения, в зависимости от характера процесса, а также в зависимости от того, какой участок заготовки анализируется.

Так, для процессов формовки жидкостью или газом, а также для пневмотермической формовки в режиме сверхпластичности эти уравнения после несложных преобразований можно представить в виде:

$$\sigma_\rho = \frac{q\rho}{2S(\rho)\sin\psi}; \quad (1a)$$

$$\frac{d}{d\rho}[\sigma_\rho S(\rho)] = \frac{\sigma_\varphi - \sigma_\rho}{\rho} S(\rho).$$

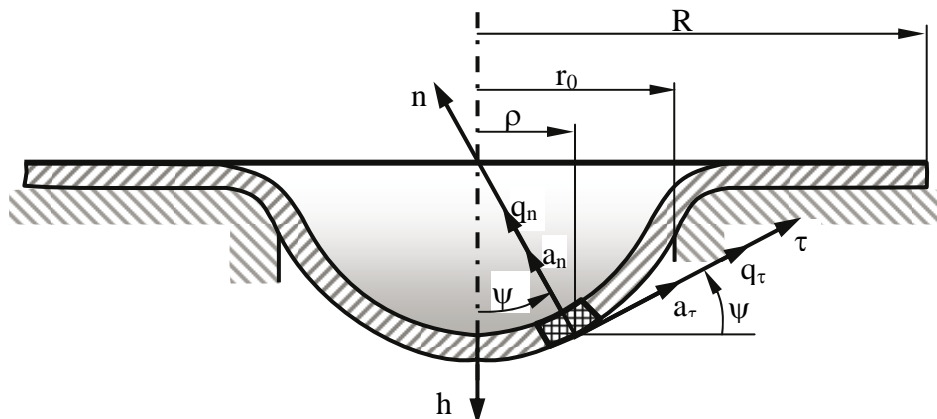


Рис. 2. Схема деформирования плоской заготовки

При рассмотрении внешнего участка, если трением на плоской части заготовки и на ребре матрицы пренебречь, равновесие элемента заготовки для всех процессов описывается одним последним уравнением системы (1a). Заметим, что при принятых допущениях, т.е.  $\mu_{TP} = 0$ , это уравнение справедливо и для торообразного участка на ребре матрицы.

Таблица 1

Значения коэффициентов, входящих в уравнения (1a),  
 для различных технологических процессов

Процесс	Внутренний участок ( $r_0 \geq \rho > 0$ )	Внешний участок (фланец) ( $R \geq \rho > r_0$ )
Высокоскоростная формовка	$\psi = f_1(\rho); q_n = -f_2(\rho);$ $q_\tau = f_3(\rho); a_n = f_4(\rho);$ $a_\tau = f_5(\rho).$	
Формовка резиной	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -q = const; q_\tau = -\mu_{TP}q;$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	$\psi = 0;$
Формовка жестким пуансоном	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -f_2(\rho); q_\tau = -\mu_{TP}f_2(\rho);$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	$q_n = 0;$
Вытяжка	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -f_2(\rho); q_\tau = -\mu_{TP}f_2(\rho);$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	$q_\tau = 0;$
Формовка жидкостью и газом	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -q = const; q_\tau = 0;$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	$a_n = 0;$
Пневмотермическая формовка в режиме сверхпластичности	$\psi = f_1(\rho);$ $q_n = -q = const; q_\tau = 0;$ $a_n = 0; a_\tau = 0.$	$a_\tau = 0.$

В случае формоизменения трубчатой заготовки (см. рис. 3), учитывая, что при обжиме и вывороте внутрь  $q_n = q(\rho)$ ,  $q_\tau = \mu_{TP} q(\rho)$ ,  $\psi = 90^\circ - \alpha$ , а при раздаче и вывороте наружу  $q_n = q(\rho)$ ,  $q_\tau = -\mu_{TP} q(\rho)$ ,  $\psi = 270^\circ - \alpha$ , можно получить уравнение равновесия в виде:

$$\frac{d}{d\rho} [\sigma_\rho S(\rho)] = \frac{\sigma_\varphi (1 + \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha) - \sigma_\rho \left( 1 + \mu_{TP} \rho \frac{d\alpha}{d\rho} \right)}{\rho} S(\rho). \quad (16)$$

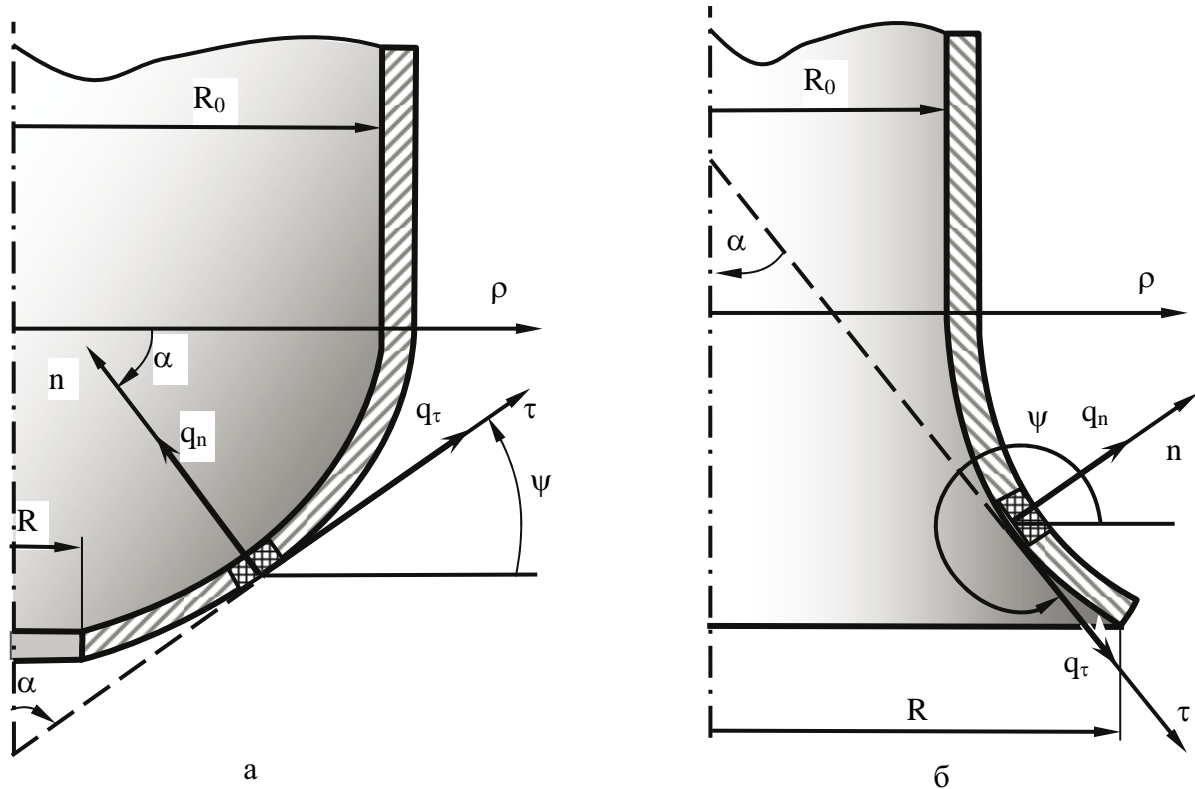


Рис. 3. Схема деформирования трубчатой заготовки:  
а – обжим; б – раздача

Это уравнение справедливо для всех перечисленных процессов формоизменения трубчатой заготовки.

Используя уравнения равновесия (16) и уравнения связи напряжений с деформациями

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho &= \frac{4}{3} E_{сек} \left( e_\rho + \frac{1}{2} e_\varphi \right); \\ \sigma_\varphi &= \frac{4}{3} E_{сек} \left( e_\varphi + \frac{1}{2} e_\rho \right); \\ e_\rho + e_\varphi + e_z &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

для случая несжимаемости материала отсутствия температурных деформаций, получим интегральное уравнение равновесия в истинных деформациях:

$$e_\rho = -\frac{1}{2} \cdot e_\varphi + \frac{3}{4} \cdot \frac{U(\rho)}{S(\rho) \cdot E_{сек}} \cdot \int_R^\rho \frac{S(\rho) E_{сек} e_\varphi (1 + \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha)}{\rho \cdot U(\rho)} d\rho +$$

$$+ \frac{E_{секR} \cdot S(R)}{E_{сек} \cdot S(\rho)} \cdot \left( e_{\rho R} + \frac{1}{2} e_{\varphi R} \right) \cdot U(\rho), \quad (3)$$

где

$$U(\rho) = \exp \left[ - \int_R^\rho \frac{1 - \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha + 2\mu_{TP} \rho \frac{d\alpha}{d\rho}}{2\rho} d\rho \right]. \quad (4)$$

При анализе формоизменения трубчатой заготовки можно считать тангенциальные деформации известными:

$$e_\varphi = \ln \frac{\rho}{R_0}, \quad (5)$$

где  $R_0$  – радиус заготовки (трубы).

Для определения граничных условий (см. рис. 3) необходимо учесть, что

$$E_{секR} \cdot \left( e_{\rho R} + \frac{1}{2} e_{\varphi R} \right) = \frac{3}{4} \sigma_{\rho R}.$$

В случае обжима и раздачи без подпора ( $\sigma_{\rho R} = 0$ ) последнее слагаемое в уравнении (3) обращается в нуль.

При рассмотрении обжима и раздачи в конической матрице угол  $\alpha$  равен углу конусности  $\alpha_\kappa$ . Тогда уравнение (4) упрощается:

$$U(\rho) = \exp \left[ \frac{1 - \mu_{TP} \operatorname{ctg} \alpha_\kappa}{2} \cdot \ln \frac{R}{\rho} \right]. \quad (6)$$

Остановимся более подробно на случае обжима и раздачи в тороидальной матрице. При определенных условиях эти процессы можно рассматривать как выворот внутрь или наружу (см. рис. 4).

Выражая  $\rho$  через угол  $\alpha$ , приведем уравнения (3) и (4) к виду:

$$e_\rho = -\frac{1}{2} e_\varphi - \frac{3}{4} \frac{U(\alpha)}{E_{сек} S(\alpha)} \cdot \int_{\alpha_0}^\alpha \frac{S(\alpha) E_{сек} e_\varphi r_0 (\sin \alpha + \mu_{TP} \cos \alpha)}{(r_0 \cos \alpha + a) \cdot U(\alpha)} d\alpha +$$

$$+ \frac{E_{сек\alpha_0} S(\alpha_0)}{E_{сек} S(\alpha)} \cdot \left( e_{\rho\alpha_0} + \frac{1}{2} e_{\varphi\alpha_0} \right) \cdot U(\alpha), \quad (7)$$

где

$$U(\alpha) = \exp \left[ \int_{\alpha_0}^\alpha \frac{r_0 \sin \alpha - 3\mu_{TP} r_0 \cos \alpha - 2\mu_{TP} a}{2(r_0 \cos \alpha + a)} d\alpha \right]. \quad (8)$$

Для обжима (выворота внутрь):

$$a = (R_0 - r_0),$$

$$e_\varphi = \ln \left[ \frac{R_0 - r_0 (1 - \cos \alpha)}{R_0} \right];$$

для раздачи (выворота наружу):

$$a = -(R_0 - r_0),$$

$$e_\varphi = \ln \left[ \frac{R_0 + r_0(1 - \cos \alpha)}{R_0} \right].$$

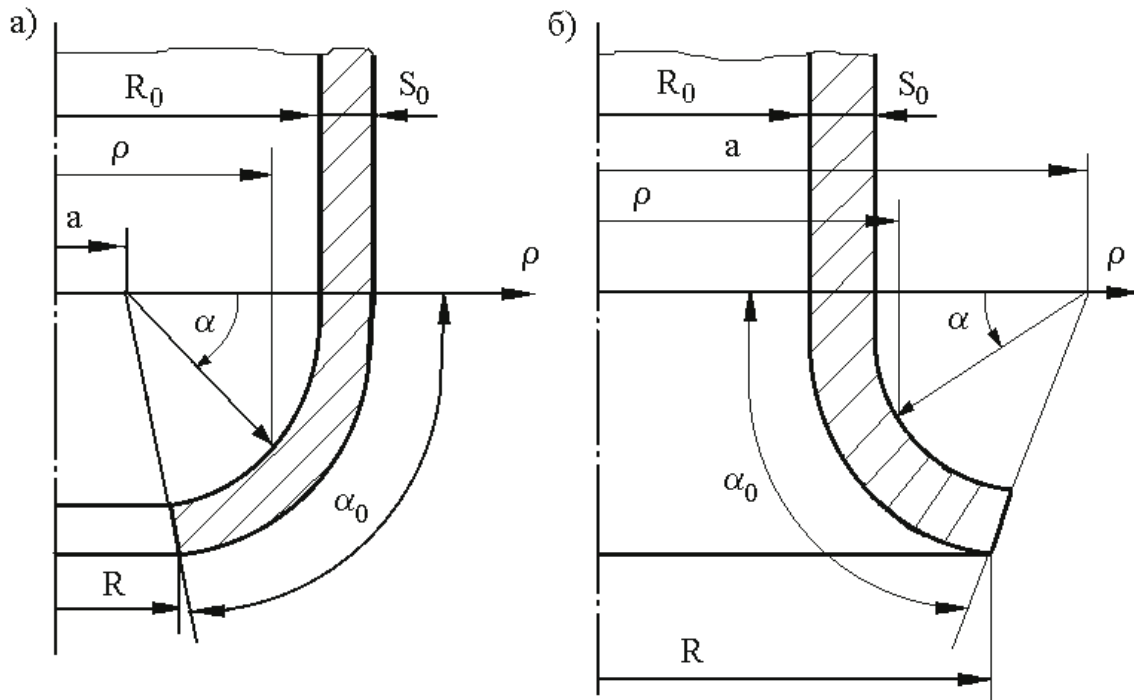


Рис. 4. Схема процессов обжима (а) и раздачи (б) в тороидальной матрице

Выражение (8) можно упростить:

$$U(\alpha) = \exp \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{r_0 \cos \alpha_0 + a}{r_0 \cos \alpha + a} + \frac{3}{2} \mu_{TP} (\alpha_0 - \alpha) + F(\alpha) \right], \quad (9)$$

где

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP} a}{2} \cdot \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\alpha}{r_0 \cos \alpha + a}.$$

В зависимости от соотношения между  $r_0$  и  $a$  выражение  $F(\alpha)$  будет иметь различный вид. Рассмотрим все случаи:

1) обжим в сферической матрице –  $a = 0$ :

$$F(\alpha) = 0;$$

2) обжим при  $a^2 = r_0^2$ , обжим при  $a = r_0 = \frac{R_0}{2}$ :

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP}}{2} \cdot \left( \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \right);$$

3) обжим при  $a^2 < r_0^2$ :

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP} \cdot a}{2\sqrt{r_0^2 - a^2}} \times \ln \left[ \frac{\left( \sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + a + r_0 \right) \left( \sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} - a - r_0 \right)}{\left( \sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - a - r_0 \right) \left( \sqrt{r_0^2 - a^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} + a + r_0 \right)} \right];$$

4)  $a^2 > r_0^2$ , выворот внутрь и наружу, все случаи раздачи:

$$F(\alpha) = \frac{\mu_{TP} a}{\sqrt{a^2 - r_0^2}} \times \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{a + r_0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left( \frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{a + r_0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_0}{2} \right) \right].$$

При решении задач на выворот необходимо учесть, что для значений

$$\operatorname{arctg} \left( \frac{\sqrt{a^2 - r_0^2}}{a + r_0} \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} \right) = \begin{cases} \pi/2, & \text{при } (a + r_0) > 0 \\ -\pi/2, & \text{при } (a + r_0) < 0 \end{cases}.$$

При формоизменении трубчатых заготовок расчет значительно упрощается, так как тангенциальные деформации известны (5). Весь расчет деформированного состояния проводят с помощью уравнений (3) или (7).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гидрогазовые системы летательных аппаратов / Д. Г. Колыхалов, Б. Н. Марьин [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 459 с.
2. Феоктистов, С. И. Автоматизация проектирования технологических процессов и оснастки заготовительно-штамповочного производства авиационной промышленности / С. И. Феоктистов. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 183 с.
3. Галкин, М. Н. Основы теплообмена: учеб. пособие / М. Н. Галкин. – М.: Изд-во МАТИ, 1970. – 159 с.
4. Попов, Е. А. Основы теории листовой штамповки / Е. А. Попов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
5. Соколовский, В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – М.: Высш. шк., 1969. – 608 с.
6. Григорьев, А. С. Большие деформации неоднородных осесимметричных оболочек / А. С. Григорьев // Тр. VIII Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластин. – Ростов-на-Дону, 1971. – С. 119-125.