

7. Матвеев А. Д., Пластический изгиб листа при неизменной толщине, Известия ВУЗов, Машиностроение, Москва, 1983 г., №1, 12-18с
8. Джонсон У., Меллор П.Б., Теория пластичности для инженеров, Машиностроение, Москва, 1979 г., — 567 с.
9. Бондарь В. С., Типалин, С. А., Шпунькин. Н. Ф., Вязкопластический изгиб и скручивание листа, МГТУ «МАМИ», Москва, 2003 г., -168с
10. K. Yilamu, R. Hino, H. Hamasaki, F. Yoshida, Air bending and springback of stainless steel clad aluminum sheet, Journal of Materials Processing Technology, №210, Elsevier, 2010 г. 272–278с.
11. Tekaslan O., Nedim Gerger B., Ulvi Seker, Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in “V” bending dies, Materials and Design, №29, Elsevier, 2008 г. 1043–1050с.
12. Se Young Kim, Won Jong Choi, Sang Yoon Park, Spring-back characteristics of fiber metal laminate (GLARE) in brake forming process, Int J Adv manuf Technol, №32, Springer, 2007 г., 445–451 с.
13. M. Kleiner, V. Hellinger, New Possibilities for Improved Bending of Vibration Damping Laminated Sheets, Annals of the CiRP, №48, 1999 г. 217-220 г.
14. M.H. Parsa, S. Nasher Al Ahkami, M. Ettehad, Experimental and finite element study on the spring back of double curved aluminum/polypropylene/aluminum sandwich sheet, Materials and Design, №31, Elsevier, 2010 г., 4174–4183с.
15. Z. Tan, B. Persson and C. Magnusson, An empiric model for controlling springback in V-die bending of sheet metals, Journal of Materials Processing Technology, №34, Elsevier, 1992 г. 449-455с.
16. Типалин С.А. Исследование и разработка методики расчета процесса профилирования ленты при локальном формоизменении /Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 1998.
17. Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф., Колесов А.В. Упругий изгиб биметаллического листа Известия МГТУ «МАМИ» 2013. Т. 2. № 1. С. 103-106.
18. Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Исследование свойств многослойных листовых материалов / Заготовительные производства в машиностроении 2013 №1 С.28-311.
19. Типалин С.А., Сапрыкин Б.Ю., Шпунькин Н.Ф. Краткий обзор многослойных листовых деформируемых материалов используемых для защиты от шума / Известия МГТУ «МАМИ» 2012. №2. С.194-199
20. Типалин С.А., Шпунькин Н.Ф., Никитин М.Ю., Типалина А.В. Экспериментальное исследование механических свойств демпфирующего материала / Известия МГТУ «МАМИ» 2010. №1. С. 166-170.
21. Шпунькин Н.Ф., Типалин С.А. Никитин М.Ю. Листовой демпфирующий материал для кузовных деталей. Свойства при сдвиговой деформации/ Автомобильная промышленность, 2010, №10 С.39-40

### **Теоретические и технологические аспекты обжима трубных заготовок**

д.т.н. проф. Сосенушкин Е.Н., доц. Яновская Е.А., Хачатрян Д.В., Киндеров В.Ю.  
ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН»  
8(499)972-94-53, [sen@stankin.ru](mailto:sen@stankin.ru)

*Аннотация.* На основе предложенной математической модели рассмотрено напряженно-деформированное состояние трубной заготовки при обжиме конической матрицей. Основные соотношения, полученные в ходе теоретического анализа, позволяют оценить напряжения в очаге деформации, определить поле деформаций и рассчитать длину исходной трубной заготовки.

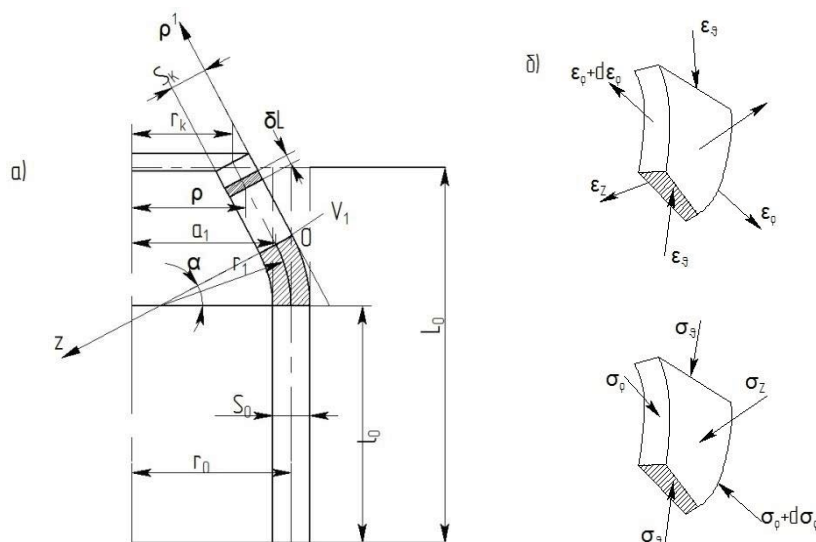
*Ключевые слова:* обжим, труба, матрица, напряжение, деформация, анизотропия.

### Введение

Среди неоспоримых преимуществ технологий обработки металлов давлением – высокая производительность, энерго- и ресурсосбережение, что важно в условиях рыночной экономики. [1]. Штампованные детали, представляющие собой осесимметричные оболочки с постоянной или переменной толщиной стенки, востребованы в изделиях различного назначения: транспортного машиностроения, атомной энергетики, арматуростроения, при производстве боеприпасов и товаров народного потребления [2-7]. Общим подходом к анализу формоизменяющих операций является использование безмоментной теории оболочек [4, 7-10].

При необходимости изменения диаметра полой заготовки, например, тонкостенной трубы, более предпочтительной формоизменяющей операцией является обжим, что обосновывается созданием благоприятной схемы напряженного состояния – неравномерного всестороннего сжатия.

*Математическая модель.* В соответствии со схемой на рисунке 1 осесимметричное напряженное состояние несжимаемого жесткопластического металла трубной заготовки описывается на коническом участке основными соотношениями пластического течения [7, 9].



**Рисунок 1. Формоизменение трубной заготовки обжимом: а – схема обжима конической матрицей; б – действующие в выделенном элементе напряжения и вызванные ими деформации**

Уравнения системы (1) справедливы при допущениях монотонности процесса деформации, подобия диаграмм Мора для напряжений и скоростей деформаций и коаксиальности соответствующих девиаторов.

В общем случае уравнения равновесия могут быть представлены [12]:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \sigma_z \left( \frac{1}{R_\rho} + \frac{1}{R_\theta} \right) - \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} - \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} + \tau_{z\rho} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{R_\rho} = 0$$

$$\rho \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\rho}{\sin \alpha} \left( \frac{\tau_{\rho z}}{R_\rho} + \frac{\tau_{\rho z}}{R_\theta} + \frac{\tau_{\rho z}}{\partial z} \right) = 0, \quad (2)$$

где  $\tau_{\rho z}$  – касательное напряжение, вызванное действием сил трения;  $\rho$  – радиус выделенного кольцевого элемента оболочки;  $\alpha$  – угол конусности матрицы;  $R_\rho, R_\theta$  – радиусы кривизны в меридиональном и окружном сечении элемента оболочки.

Примем, что касательные напряжения на контактной поверхности, пропорциональны нормальному контактному напряжению  $\sigma_k$ , а нормальные  $\sigma_z$  и касательные напряжения  $\tau_{\rho z}$  линейно убывают от максимальных значений на контактной поверхности до нуля на свободной поверхности, толщина заготовки не изменяется и  $z=0$ , т.е. на свободной поверхности си-

стема уравнений (2) приводится к виду [12]:

$$\frac{\sigma_K}{s} = \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta};$$

$$\rho \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\mu \rho \sigma_K}{s \sin \alpha} = 0,$$
(3)

где,  $\mu$  - коэффициент трения по Кулону.

Система уравнений (3) может быть сведена к одному уравнению равновесия кольцевого элемента с учетом трения при условии постоянства толщины стенки  $s$  и отнесении элементарных сил к срединной поверхности деформируемой заготовки, в частности, для операции обжима это уравнение представляется [7-9, 12]:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\mu \rho}{\sin \alpha} \left( \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0.$$
(4)

Для участка конической формы  $R_\rho = \infty$ ,  $R_\theta = \frac{\rho}{\cos \alpha}$ , поэтому дифференциальное уравнение (4) представляется в известном виде [7, 8]:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) = 0.$$
(5)

Используем уравнение пластичности для условий одноименного напряженного состояния, характерного для обжима [7, 9]:

$$\sigma_\theta = -\beta \sigma_s,$$
(6)

где  $\beta$  - коэффициент Лодэ;  $\sigma_s$  - сопротивление деформированию.

В процессах обработки давлением с малыми пластическими деформациями следует использовать степенную аппроксимацию закона упрочнения [11]:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + B \varepsilon_i^m,$$
(7)

где  $\sigma_{s0} = \sigma_{0,2}$ ,  $B$  - постоянные деформируемого металла;  $m$  - коэффициент деформационного упрочнения;  $\varepsilon_i$  - интенсивность деформаций вычисляется:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_\rho - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_\rho)^2},$$
(8)

где  $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$  - деформации выделенного элемента.

При выполнении условия несжимаемости в деформациях  $\varepsilon_\rho = -\varepsilon_\theta - \varepsilon_z$ , интенсивность деформаций имеет вид:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2 + \varepsilon_\theta \varepsilon_z}.$$
(9)

С учетом анизотропии, показателем которой является коэффициент трансверсальной анизотропии  $R$ , интенсивность деформаций выразится [7]:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{R^2 + R + 1}}{R + 1} \varepsilon_\theta.$$
(10)

Закон упрочнения с учетом известных параметров запишется как

$$\sigma_s = \sigma_{0,2} + B^* \varepsilon_\theta^m, \text{ где } B^* = B \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{R^2 + R + 1}}{R + 1} \right)^m.$$

Приращения деформаций могут быть определены:

$$d\varepsilon_z = \frac{ds}{s}; d\varepsilon_\theta = \frac{d\rho}{\rho}; d\varepsilon_\rho = \frac{d(\delta H)}{\delta H}.$$
(11)

При подстановке известных параметров в дифференциальное уравнение равновесия (5) имеем:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho + \beta \left[ \sigma_{0,2} + B^* \left( \ln \frac{R_0}{\rho} \right)^m \right] (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) = 0. \quad (12)$$

С достаточной точностью логарифмическую функцию можно представить первыми членами ряда и проинтегрировать уравнение (12) методом вариаций. После нахождения постоянной интегрирования  $C$  из граничного условия  $\sigma_\rho = 0$  при  $\rho = r_k$ :

$$\begin{aligned} \sigma_\rho = & -\beta \sigma_{0,2} (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) + \beta B^* (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) \frac{(-1)^{m-1}}{m+1} \frac{R_0}{\rho} \left( \frac{\rho}{R_0} - 1 \right)^{m+1} + \\ & + \beta \sigma_{0,2} r_k (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) - \beta B^* (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) \frac{(-1)^{m-1}}{m+1} R_0 \left( \frac{r_k}{R_0} - 1 \right)^{m+1}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для более точной оценки напряженного состояния при обжиге учтем влияние напряжения  $\sigma_z$  на процесс деформирования. Из допущения о линейном характере изменения этих напряжений от  $\sigma_z = 0$  на внутренней свободной поверхности до значения, равного контактному давлению  $\sigma_z = p$ , определим напряжения, действующие в направлении толщины, по уравнению Лапласа [7, 9] системы (3), учитывая, что получаемая поверхность изделия является конической, а на срединной поверхности  $\sigma_z$  определяется своим средним значением и при этом является сжимающим:

$$\sigma_z = -\frac{1}{2} \frac{s}{\rho} \sigma_\theta \cos \alpha, \quad (14)$$

где  $s$  – толщина заготовки в направлении нормали к срединной поверхности.

Таким образом, напряженное состояние конического участка заготовки определяется полученными соотношениями (6), (13), (14).

Деформированное состояние найдем из уравнений системы (1), подставляя известные значения напряжений. Проанализируем отношение скоростей деформаций, описанных системой (1):

$$\frac{\dot{\varepsilon}_z}{\dot{\varepsilon}_\theta} = \frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\theta} = \frac{ds/s}{d\rho/\rho} = \frac{2\sigma_z - \sigma_\rho - \sigma_\theta}{(R+1)\sigma_\theta - R\sigma_\rho - \sigma_z}, \quad (15)$$

которое, при коэффициенте трансверсальной анизотропии  $R = 1$  приводит к известному соотношению Леви – Мизеса [12]:

$$\frac{ds}{s} = \frac{\sigma_z - \sigma_{cp}}{\sigma_\theta - \sigma_{cp}} \times \frac{d\rho}{\rho}, \quad (16)$$

где  $\sigma_{cp} = \frac{1}{3}(\sigma_\rho + \sigma_\theta + \sigma_z)$  – среднее нормальное напряжение.

После интегрирования (15) и преобразований текущая толщина трубной заготовки при обжиге определится соотношением:

$$s = s_0 \left( \frac{\rho}{R_0} \right) \left[ \frac{2\sigma_z - \sigma_\rho - \sigma_\theta}{(R+1)\sigma_\theta - R\sigma_\rho - \sigma_z} \right]. \quad (17)$$

Для расчета длины участка трубной заготовки, необходимого для получения конической части изделия, введем допущение о линейном характере изменения толщины заготовки при обжиге, что, по утверждению автора работы [13], не дает большой погрешности. Координаты начальных точек отрезков указанных прямых находятся в прямой зависимости от

геометрических размеров выбранной трубной заготовки, а координаты конечных точек отрезков прямых могут быть определены по чертежу изделия.

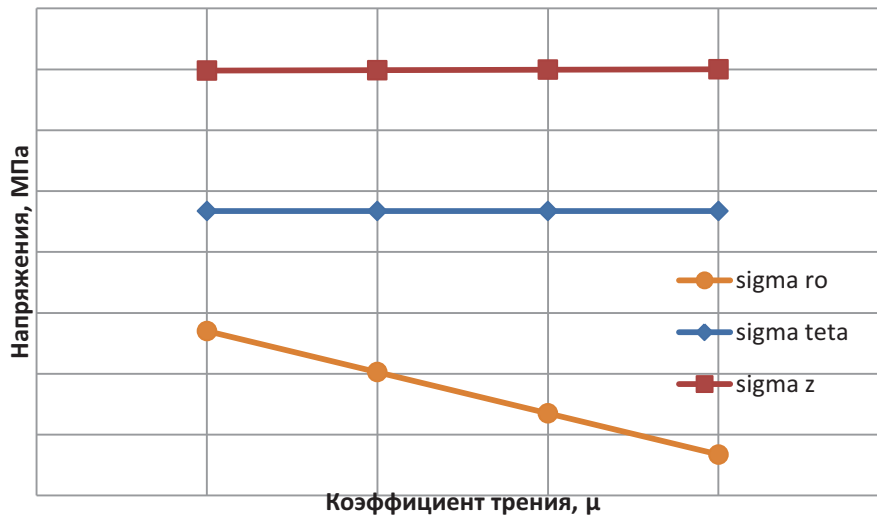
Составим уравнения необходимых отрезков прямых, ограничивающих контур изделия, по известным координатам их начальных и конечных точек.

Длину заготовки, необходимую для формирования конического участка с помощью обжима, найдем из условия постоянства объемов исходной заготовки  $V_0$  и деформированного тела на конечном этапе технологической операции  $V_T$ . Объем участка трубы после деформации будет составлен из объемов тел, полученных вращением отрезков прямых, ограничивающих контур изделия.

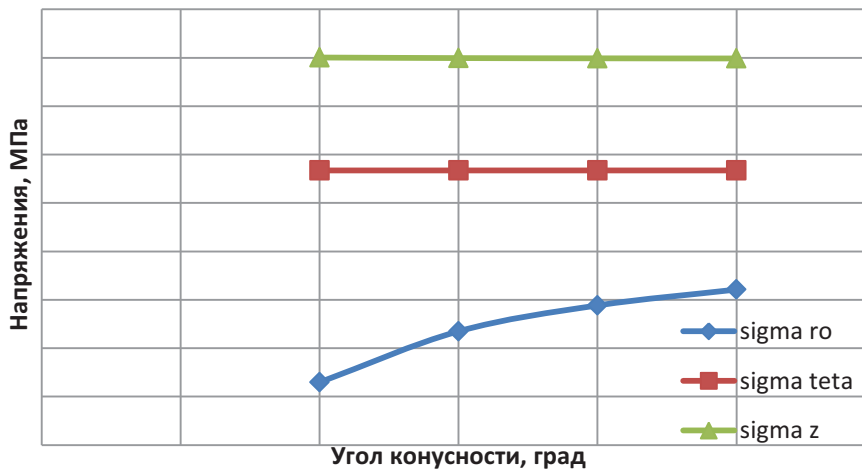
$$\begin{aligned}
 V_m = & 2\pi \left( \frac{1}{3} s_0 R_0 + \frac{1}{6} s_0 R_K + \frac{1}{6} s_K R_0 \cos \alpha + \frac{1}{3} s_K R_K \cos \alpha \right) h + \\
 & + 2\pi \left( \frac{1}{6} R_0^2 s_K \cos \alpha + \frac{1}{6} R_0 R_K s_K \sin \alpha - \frac{1}{3} R_K^2 s_K \sin \alpha \right) + \\
 & + 2\pi \left( \frac{1}{24} s_K s_0^2 \sin \alpha + \frac{1}{24} s_0 s_K \sin \alpha \cos \alpha - \frac{1}{12} s_K^3 \sin \alpha \cos^2 \alpha \right)
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$V_s = 2\pi d_0 s_0 R_0.$$

Длина заготовки для раздачи конического участка на заданный диаметр:  $l_0 = \frac{V_m}{2\pi s_0 R_0}$



а)



б)

Рисунок 2. Поля напряжений в стенке



**Рисунок 3. Изменение длины конического участка заготовки**

Обсуждение результатов. В качестве исходных данных приняты: диаметр трубы 63 мм; толщина стенки 1,5 мм; коническая часть - длина 40 мм; диаметр краевой части после обжима 40 мм,  $\mu=0,15$ ;  $\alpha=15^\circ$ ; материал сталь 12X18H10T -  $\sigma_{0,2}=225$  МПа;  $B=170$  МПа;  $n=0,342$ . График на рисунке 2 отображает поле напряжений, действующих в стенке трубы при обжиме конической матрицей в зависимости от коэффициента трения (а) и в зависимости от угла конусности матрицы (б). Из приведенных графиков видно, что преобладающими напряжениями являются меридиональные сжимающие напряжения, увеличивающиеся с увеличением коэффициента трения и уменьшающиеся с увеличением угла конусности пуансона.

Изменение толщины стенки в соответствии с формулой (15) показано на рисунке 3 (а). С увеличением коэффициента обжима толщина стенки увеличивается. На рисунке 3 (б) показано изменение длины участка заготовки, необходимого для формоизменения трубы на конус, в зависимости от коэффициента раздачи.

#### Выводы

В статье приведен теоретический анализ операции обжима трубной заготовки конической матрицей, позволяющий оценить напряженно-деформированное состояние деформируемого участка заготовки, изменение толщины стенки в процессе формоизменения и рассчитать длину заготовки для оформления конического участка.

#### Литература

1. Григорьев С.Н. Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения. // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. - №3(11). – С.7-13.
2. Артес А.Э., Рогозников П.А., Лыжников Е.И., Филичкин Д.В., Гольшев Н.А. Совершенствование технологии штамповки деталей промышленной арматуры.// Арматуростроение. - №3. – 2005. – С. 26-28.
3. Володин А.М., Сорокин В.А., Петров Н.П., Артес А.Э., Сосенушкин Е.Н., Третьюхин В.В. Разработка инновационных технологий горячей объемной штамповки.// Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. - 2010. - №7. – С.11-15.
4. Попов И.П., Маслов В.Д. Направленное изменение толщины заготовки в формообразующих операциях листовой штамповки.// Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. - №6. – С.19-21.
5. Сосенушкин Е.Н., Климов В.Н., Яновская Е.А. Кутышкина Е.А. Экспериментальные исследования формоизменения стальных труб.//Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2010. – №6. – С.39-43.
6. Сосенушкин Е.Н., Артес А.Э., Третьюхин В.В., Махдиян А. Групповые технологические процессы штамповки трубных переходов в мелкосерийном и серийном производстве.// Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – №7. – 2007. – С.18–24.
7. Аверкиев А.Ю. Формоизменение трубной заготовки при раздаче и обжиме. Часть 2. Обжим конической матрицей.// Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – №3. – 2000. – С. 7 – 11.
8. Непершин Р.И. Методы решения задач осесимметричной деформации идеально жестко-

- пластического тела./ Пластическое формоизменение металлов. – М.: Наука, 1967. – С.95-104.
9. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
10. Сосенушкин Е.Н., Третьякова Е.И., Яновская Е.А. Определение полей напряжений при пластическом деформировании элементов оболочек. /Обработка материалов давлением. Сб. научных трудов. – №1(22). – 2010. – Краматорск. – С.49 – 54.
11. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1979. – 215 с.
12. Теорияковки и штамповки./ Е.П.Унксов, У.Джонсон, В.Л.Колмогоров и др./ Под общей ред. Е.П.Унксова, А.Г.Овчинникова. М.: Машиностроение, 1992. 720 с.
13. Калюжний О.В. Аналіз інженерним методом процесу обтиску з диференційованим протитиском в конічній матриці./ Обработка материалов давлением. – 2012. - №2(31). – С. 15-21.
14. Попов О.В. Изготовление цельноштампованных тонкостенных деталей переменного сечения. – М.: Машиностроение, 1974. – 120 с.

### **Поперечная устойчивость разностенных заготовок при обжиге в ступенчатых конических матрицах**

Матафонов С.С.

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова  
8 (911) 243 17 94, smatafonov@mail.ru

*Аннотация.* В статье рассмотрено влияние разностенности на устойчивость трубных заготовок при обжиге в ступенчатых конических матрицах. Предложена соответствующая математическая модель, которая позволяет спрогнозировать потерю устойчивости заготовок при обжиге на стадии проектирования технологического процесса.

*Ключевые слова:* обжим, трубная заготовка, разностенность, потеря устойчивости, коническая матрица.

Одним из видов потери поперечной устойчивости заготовок является образование продольных складок в зоне обжимаемой кромки заготовки на участке неприлегания длиной « $l$ » в начальной стадии процесса обжига (Рисунок 1 а, б) при малых пластических деформациях с последующим образованием продольных складок на формируемых коническом и цилиндрическом участках детали.

Этот вид потери поперечной устойчивости заготовки характерен для случая резкого изгиба краевой части заготовки при обжиге в конической матрице с радиусом кривизны ее входной части, равным нулю ( $R_p M=0$ ) или значительно меньшим радиуса кривизны срединной поверхности заготовки в меридиональном сечении на участке неприлегания ( $R_p M \ll R_p$ ) [1...3].

Принципиальными особенностями технологии обжига деталей из трубных заготовок или заготовок, полученных вытяжкой с утонением является:

- значительная разностенность заготовок в поперечных сечениях;
- возможно предварительное деформационное, а в некоторых случаях и термомеханическое упрочнение металла заготовок после предшествующих операций вытяжки с утонением и термических операций;
- применение конических матриц обжига составной ступенчатой конструкции формирующих не один, а несколько ОПД.

Обжим выполняется в верхней конической ступени матрицы (первая стадия процесса) с малыми углами конусности ( $\alpha \leq 2^\circ 30'$ ) без образования участка свободного изгиба (неприлегания) при малых деформациях. Однако сопряжение верхней и нижней ступеней матрицы или двух отдельных матриц выполняется без закругленного участка при  $R_p M=0$ . Последнее обстоятельство при определенных условиях (малой относительной толщине стенки заготовки  $S_0/D_0$ , большой разностенности  $\delta S$  и большом угле конусности нижней ступени матрицы)