

**Предельные возможности при раздаче
цилиндрических заготовок с радиальным наружным
противодавлением**

И.П. Попов, Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников

Известно, раздача цилиндрических заготовок с радиальным наружным противодавлением (рис. 1а, рис. 1в) увеличивает предельный коэффициент раздачи $K_{\text{пред}}$, особенно для пластичных материалов с относительной толщиной $S/d = 0.02 - 0.08$ [1]. В этом случае раздача сопровождается осадкой цилиндрической части заготовки и её утолщением.

Для рассматриваемых схем раздачи предельное состояние заготовки может быть ограничено 3мя критериями неустойчивости:

- критерий, связанный со складкообразованием цилиндрической части заготовки;
- критерий, в основу которого положено исчерпание равномерной деформации кромки заготовки;
- критерий, в основу которого положен разрыв кромки заготовки.

Экспериментальные исследования при осадке цилиндрической заготовки в жестком контейнере показывают, что неустойчивость заготовки для рассматриваемых относительных толщин наблюдается в виде резких кольцевых складок в области пластических деформаций (рис. 2). Используя метод Тимошенко С.П., условие неустойчивости гофрообразования запишется в виде равенства $W=V$. Для случая деформирования цилиндрической оболочки изменение потенциальной энергии при выпучивании оболочки равно [2].

$$W = S^3/16 \iint_F [E_c (\chi_h^2 + \chi_A \chi_\theta + \chi_\theta^2) - 3/4 (E_c - E_k) \frac{(6h \chi_A + 6\theta \chi_\theta)^2}{6l^2}] \quad (1)$$

работа внешних сил

$$V = S/2 \iint [6h (dw/dh)^2 + 6\theta (dw/d\theta)^2] dh \cdot d(R, \theta), \quad (2)$$

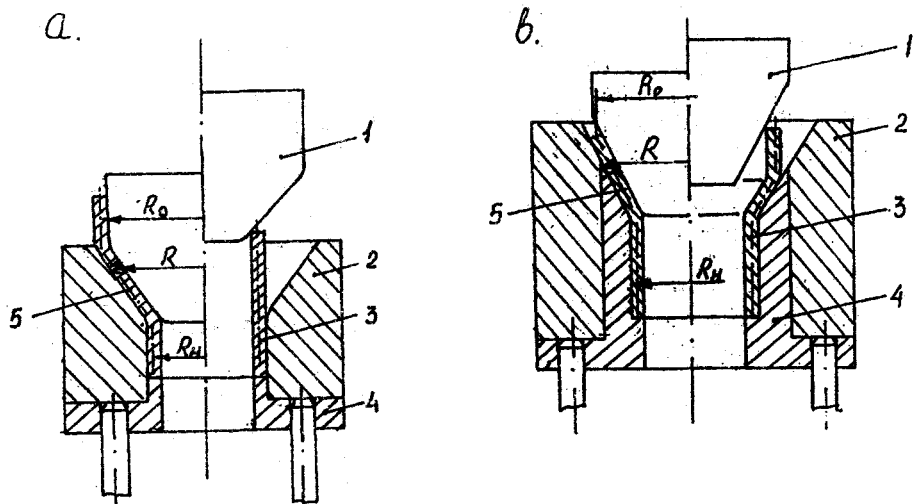


Рис.1.Схемы штампов раздачи с радиальным наружным противодавлением : а - первого перехода; в -последующего перехода.
 1 - оправка, 2 - матрица, 3 - заготовка, 4 - выталкиватель, 5 - деталь



Рис. 2.Форма неустойчивости при осадке в жёстком контейнере [2]

где $\chi_k = dw^2/dh$ - изменение кривизны по высоте оболочки,
 $\chi_\theta = \omega/R^2$ - изменение кривизны в тангенциальном направлении,
 ω - функция прогиба средней поверхности,
 S - толщина оболочки,
 E_c - секущий модуль,
 E_k - касательный модуль,
 σ_h - напряжение по высоте,
 σ_θ - напряжение в тангенциальном направлении,
 F - площадь цилиндрической поверхности заготовки,
 h - высота цилиндрической части заготовки,
 $R\theta$ - длина дуги образующей цилиндрической части заготовки.

Считая процесс осадки цилиндрической части заготовки плоскодеформированным для трансверсально изотропного тела, имеем:

$$\sigma_h = 1/\mu \sigma_\theta, \quad (3)$$

$$\sigma_i = (\sqrt{1-\mu^2}) \sigma_h, \quad (4)$$

$$e_i = 1/\sqrt{1-\mu^2} e_\theta, \quad (5)$$

где μ - коэффициент поперечной деформации, отражающий анизотропного материала [3].

Учитывая степенной закон упрочнения $\sigma_i = K e_i^n$, найдём

$$\sigma_i = K e_\theta^n / (1-\mu^2)^{n/2}, \quad (6)$$

$$E_c = K e_i^{n-1}, \quad E_k = K \mu \cdot e_i^{n-1}, \quad (7)$$

где K, μ - константы механических свойств материала.

Подставив соотношения для плоскодеформированного состояния (3-7) в выражение (1), (2) получим

$$\left(\frac{s}{R_H}\right)^2 = \frac{9e\delta \iint [(\frac{dw}{dh})^2 + \mu(\frac{dw}{d\theta})^2] dh \cdot d(R\theta)}{(1-\mu^2) \iint_F [(\chi_h^2 + \chi_h \chi_\theta + \chi_\theta^2) - 3/4(1-n)/(1-\mu^2)(\chi_h - \mu \chi_\theta)^2] dh \cdot d(R\theta)} \quad (8)$$

Для решения уравнения (8) необходимо выбрать функцию прогиба так, чтобы она удовлетворяла граничным условиям. Выбираем функцию прогиба в виде

$$w = w_0 \sin^2(m\pi h/h_0), \quad (9)$$

где

m - число складок,

w_0 - величина максимального прогиба,

h_0 - высота волны.

Функция удовлетворяет граничным условиям: при $h = 0, h = h_0, w = 0$. Тогда значения кривизн имеют вид

$$\chi_h = 2w_0 (m^2 \pi^2 / h_0^2) \cos(2m\pi h/h_0), \quad (10)$$

$$\chi_\theta = w_0 / R_H^2 \sin^2(m\pi h/h_0). \quad (11)$$

После подстановки (9), (10), (11) в (8) получим

$$\left(\frac{s}{R_H}\right)^2 = \frac{9e\delta}{4(1-\mu^2) R_H^2 m^2 \pi^2 h_0^2 [1 - 3/4(1-n)/(1-\mu^2)]} \quad (12)$$

Исследования показали, что для рассматриваемых толщин число полуволн определяется зависимостью $m = h_0/s = 2$ (рис. 2). Тогда с учётом выражения (12) получим

$$\frac{s}{R_n} = \frac{S_n}{R_n} \exp\left[4/9 (1-\mu^2) S T^2 \left(1 - 3/4 (1-n)/(1-\mu^2)\right)\right], \quad (13)$$

где S_n - исходная толщина заготовки.

Для максимального значения $\mu = 1$ потеря устойчивости происходит при $S/R_n = S_n/R_n$, т. е. в момент начала пластической деформации независимо от других показателей механических свойств. Максимальное утолщение получаем при $\mu = 0$, когда деформация имеет наибольшую благоприятную возможность по толщине. На рисунке 3 представлены графики толщин в момент потери устойчивости для различных показателей анизотропии и одинакового показателя степенного упрочнения материалов дюралюмина Д16 и стали 3.

Видно, что изменение коэффициентов анизотропии приводит к равнозначному изменению результатов относительных толщин в момент неустойчивости при осадке цилиндрической трубы в жёсткой обойме.

Используя (4), (6), (13), найдём напряжение в цилиндрической части заготовки в момент неустойчивости

$$\sigma_h = n/(1-n)/(1-\mu^2)^{n+1/2} \left[4/9 (1-\mu^2) S T^2 \left(1 - 3/4 (1-n)/(1-\mu^2)\right)\right]. \quad (14)$$

Примем условие, что напряжение σ_h в момент неустойчивости заготовки должно равняться напряжению σ_{hp} от раздачи

$$\sigma_{hp} = \sigma_h \quad (15)$$

где

$$\sigma_{hp} = \frac{\sigma_B (K_p - 1) (1 + d_{tp}/l_{g-d})}{\sqrt{1-\mu^2} (1-\gamma_{ш}) \gamma_{ш}^{n_g}} \quad (16)$$

- меридиальное напряжение из зоны раздачи для трансверсально-изотропного материала без учёта изгиба и выпрямления [1],

где
$$\frac{(K_p-1)^{n+1}}{(K_p+1)^n} \approx K_p - 1,$$

$\phi_{тр}$ - коэффициент трения,
 α - угол наклона образующей расширяющейся части,
 ψ_w - относительное сужение в момент образования шейки.

Условие (15) позволяет установить предельный коэффициент раздачи, если считать, что процесс ограничен гофрообразованием в цилиндрической части заготовки

$$K_p = 1 + \frac{6k\sqrt{1-\mu^2}(1-\psi_w)\psi_w^n}{1+\phi_{тр}\operatorname{ctg}\alpha}, \quad (17)$$

здесь $6k$ - определяется по формуле (14).

Рассмотрим ограничения процесса раздачи, в основу которых положено либо допустимое утолщение, либо разрыв кромки заготовки при линейном напряженном состоянии.

Известно, что при линейном растяжении материала

$$(\epsilon_i)_{кр} = \epsilon_n \frac{F_0}{F} = \epsilon_n \frac{1}{1-\psi}. \quad (18)$$

В зависимости от критерия под относительным сужением материала ψ понимают либо ψ_w , соответствующее началу образования шейки, либо ψ_p , соответствующее разрыву материала.

В случае, связанном с исчерпанием равномерной деформации, из условия постоянства объёма имеем

$$\psi_w = \frac{\delta_w}{1+\delta_w} \quad \text{и} \quad (\epsilon_i)_{кр} = \epsilon_n (1+\delta_w) = \eta,$$

где δ_w - относительное удлинение в момент образования шейки.

При линейном состоянии для кромки заготовки имеем [3]

$$\epsilon_\theta = -\mu \epsilon_r, \quad (19)$$

где ϵ_θ , ϵ_r - деформации соответственно в тангенциальном и меридиональном направлениях,

$$\epsilon_i = \sqrt{\frac{\mu}{1-\mu^2}} \sqrt{\frac{\epsilon_r^2}{\mu} + 2\epsilon_r\epsilon_\theta + \frac{\epsilon_\theta^2}{\mu}}. \quad (20)$$

С учётом (19) интенсивность деформации приводится к виду

$$\epsilon_i = \frac{\epsilon_\theta}{\mu} = \frac{\epsilon_n K_b}{\mu} \quad (21)$$

Приравняв выражения (18) и (21), получим

$$(K_b)_{нф} = \frac{1}{(1-\psi)\mu} \quad (22)$$

Приняв в качестве критерия допустимое разрыв кромки заготовки, имеем

$$(K_b)_{нф} = \frac{1}{(1-\psi_p)\mu}. \quad (23)$$

Если критерием предельного состояния является исчерпание равномерной деформации (начало образования шейки), то

$$(K_b)_{нф} = \frac{1}{(1-\psi_w)\mu} \text{ или} \quad (24)$$
$$(K_b)_{нф} = (1+\delta_w)^\mu.$$

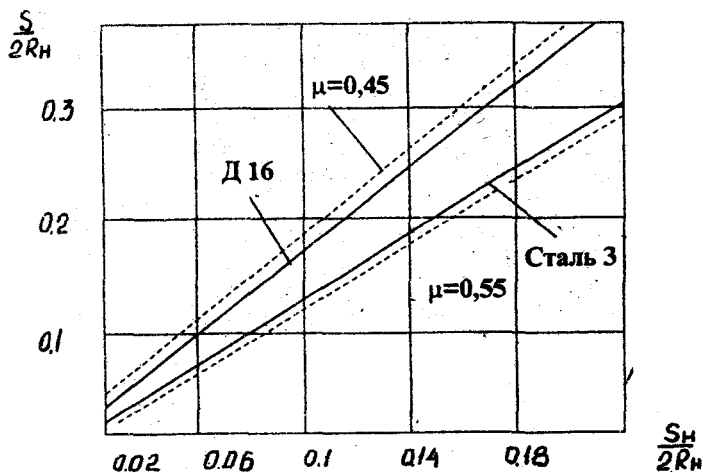


Рис. 3. Графики аналитических (пунктирные) и экспериментальных (сплошные) относительных толщин трубных заготовок в момент неустойчивости

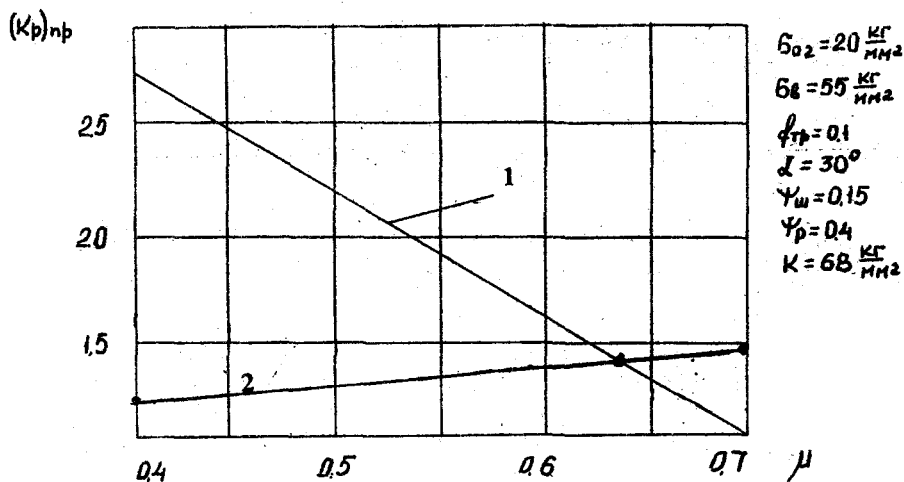


Рис. 4. Предельные коэффициенты раздачи:
1- от гофрообразования, 2- от разрыва кромки

Анализ зависимостей (23), (24) показывает, что наиболее близки значения предельных коэффициентов, полученных по формуле (23). Так, например, для материала Д16АМ ($\psi_p = 0.5$, $\delta_{ш} = 0.13$, $\mu = 0.36$), получаем $(K_p)_{гф} = 1.28$ по формуле (23) и $(K_p)_{гф} = 1.04$ по формуле (24). В целом получаем формулы для расчёта предельных возможностей материала при раздаче с учётом гофрообразования цилиндрической части, исчерпания равномерной деформации и разрыва кромки.

Зависимости (17), (23) позволяют оценить, каким фактором определён предельный коэффициент раздачи. На рис. 4 видно, что при прочих равных условиях в зависимости от коэффициента анизотропии предельный коэффициент раздачи определён либо гофрообразованием, либо разрывом кромки заготовки.

Список использованных источников

1. Ковка и штамповка. Листовая штамповка. Справочник т.4 - М.: Машиностроение, 1987. - 544 с.
2. Попов И.П., Маслов В.Д. Устойчивость цилиндрической оболочки в жёстком контейнере // Теория и технология ОМД : Межвузовский сборник. - Куйбышев, 1977. - с.78 - 80.
3. Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В. Теория и расчёты пластического формоизменения анизотропных материалов. - М.: Металлургия, 1990. - 304 с.
4. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. - М.: Машиностроение, 1977. - 276 с.