

УДК 621. 983

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ОТВЕРСТИЕМ В ДОННОЙ ЧАСТИ ВЫТЯЖКОЙ, СОВМЕЩЕННОЙ С ОТБОРТОВКОЙ, ПРИ НАЛИЧИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ФАКТОРОВ

Титов А.Ю., Филимонов В.И.

ОАО «Ульяновский НИИТ» (НИИ авиационной технологии), Ульяновск, e-mail: fwiumz@mail.ru

Представлены результаты математического моделирования процесса осесимметричной вытяжки, совмещенной с отбортовкой при штамповке деталей с отверстием в донной части. На основе расчета меридиональных напряжений, необходимых для деформирования донной и фланцевой частей заготовки с учетом управляющих факторов, можно создать условия формообразования, позволяющие кратковременно стабилизировать процесс до завершения деформирования. Деформированию подвергается заготовка с предварительно пробитым отверстием, диаметр которого меньше диаметра отверстия в готовой детали, традиционно такие детали получают вытяжкой с последующей пробивкой отверстия. Участие донной части заготовки в формообразовании детали позволит уменьшить диаметр исходной заготовки и увеличить коэффициент использования металла. В качестве управляющих факторов предлагается использовать давление прижима фланцевой части заготовки и давление торцового поджатия кромковой части отверстия.

**Ключевые слова:** вытяжка-отбортовка; управляющие факторы; прижим; торцовое поджатие

## INVESTIGATION IN SHAPING AXIAL-SYMMETRIC PARTS WITH A HOLE IN THEIR BOTTOM USING COMBINED DRAWING-FLANGING WITH CONTROL FACTORS AVAILABILITY

Titov A.Y., Filimonov V.I.

«Ulyanovsk NIAT» JSC, Ulyanovsk, e-mail: fwiumz@mail.ru

There are given the results of mathematical simulation of axial-symmetric combined drawing-flanging applied to stamp parts having a hole in their bottom. The calculation of meridional stresses necessary to shape flange and bottom parts taking into account the control factors enables to create certain forming conditions for brief stabilization of the process until the required deformation is attained. The punched blank with the hole diameter inferior to that of the ready part is then being formed; traditionally such parts are obtained through drawing with further hole punching. The bottom part of the blank being involved into shaping makes it possible to reduce the diameter of the initial blank and to increase the stock utilization ratio. The control factors to be used are flange clamp pressure and butt pressure applied to the hole edge.

**Keywords:** drawing-flanging, control factors, blankholder, edge prepressure

Одной из самых распространенных операций листовой штамповки является вытяжка, – наиболее эффективная формоизменяющая операция ввиду возможности её полной автоматизации и совмещения с другими операциями. Значительную долю в общей номенклатуре деталей, получаемых с помощью вытяжки, составляют полые детали типа тел вращения, многие из которых имеют отверстие в донной части.

В настоящее время подавляющее большинство полых осесимметричных деталей с отверстием в донной части изготавливаются по традиционной технологии, включающей основные технологические операции: вырубка заготовки; вытяжка; пробивка отверстия в донной части. Недостаток таких технологий – низкий коэффициент использования металла (КИМ). Существенно увеличить КИМ позволяет изготовление полых осесимметричных деталей с отверстием в донной части вытяжкой, совмещенной с отбортовкой из плоской кольцевой заготовки с предварительно пробитым отверстием, диаметр которого меньше диаметра отверстия в дне готовой детали [1, 2]. Условием устой-

чивого формообразования при совмещении вытяжки с отбортовкой является создание условий и схем нагружений, при которых меридиональные растягивающие напряжения, возникающие в «зоне вытяжки» и в «зоне отбортовки», максимальны и равны между собой в каждый момент деформирования.

Следует отметить, что вытяжка, совмещенная с отбортовкой (вытяжка – отбортовка) в современной практике машиностроения не имеет широкого применения из-за нестабильности данного технологического процесса вследствие невозможности сохранения необходимого условия совместного их осуществления. Кроме того, на сегодняшний день крайне недостаточны сведения, касающиеся расширения технологических возможностей осуществления вытяжки, совмещенной с отбортовкой, с учетом установления основных факторов, позволяющих управлять процессом формообразования.

**Цель настоящей работы** – разработка математической модели процесса осесимметричной вытяжки – отбортовки на основе определения параметров напряженного деформированного состояния с учетом

управляющих факторов. Использование математической модели даст возможность обеспечить кратковременную стабилизацию процесса до завершения деформирования, что позволит уменьшить диаметр исходной заготовки и увеличить коэффициент использования металла.

Рассмотрим условия осуществления процесса вытяжки, совмещенной с отбортовкой, с обязательным наличием неполной отбортовки, действием прижимов и торцового поджатия (управляющие факторы), при которых достигается требуемая форма детали (рис. 1).

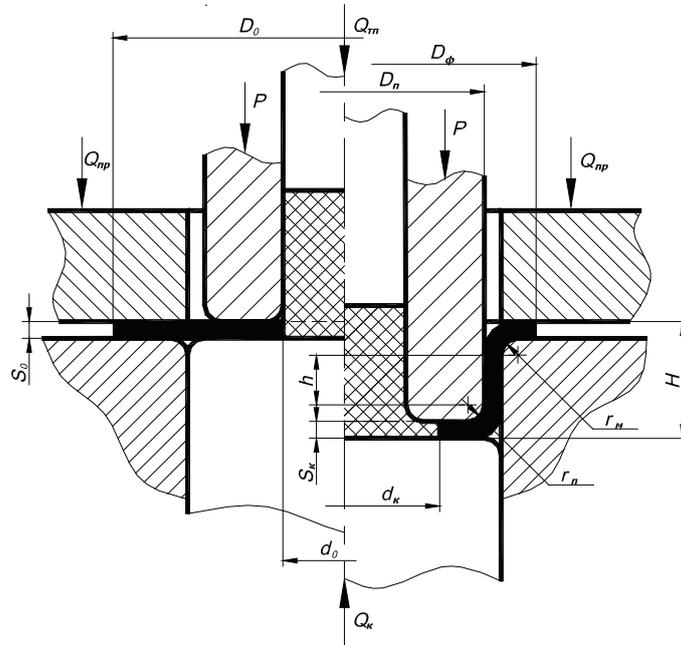


Рис. 1. Схема процесса вытяжки-отбортовки (с наличием управляющих факторов)

Протекание формообразования детали в процессе деформирования заготовки с предварительно пробитым отверстием вытяжкой-отбортовкой зависит от многих факторов: диаметра фланца, изменения толщины и механических характеристик (упрочнения) металла фланца и краевой части отверстия, диаметра отверстия в исходной заготовке, диаметра вытяжки, радиусов скругления кромок пуансона и матрицы, силы прижима и контрприжима, а также дополнительной сжимающей нагрузки по торцу отверстия (торцовое поджатие). Влияние этих факторов в настоящее время до конца не изучено, что существенно ограничивает применение данной операции при изготовлении осесимметричных деталей с отверстием в донной части.

Наиболее важными с точки зрения управления процессом формообразования являются следующие факторы: сила прижима фланца, усилие торцового поджатия краевой части отверстия [1, 3].

В работе [1] проведен анализ процесса деформирования донной и фланцевой части заготовки для моментов достижения максимальных значений напряжений при условии обязательного наличия неполной отбортовки. Повысить предельные возможности формообразования вытяжки-отбортовки за счет деформирования донной части заго-

товки, подвергающейся отбортовке, можно путем создания определяющих условий в очаге деформации, характерных при совмещении нескольких операций [3].

В нашем случае рациональным вариантом совмещения является торцовое поджатие, обеспечивающее непосредственное приложение дополнительных сил к кромке отверстия. Деформирование дна заготовки без деформаций в условиях торцового поджатия и действия контрприжима происходит в условиях растягивающих тангенциальных напряжений и окружных деформаций растяжения. При этом возникают задачи определения деформационных характеристик, напряжений, а также силовых параметров процесса формообразования.

Будем считать, что диаграммы Мора напряженного и деформированного состояний подобны. Это позволяет записать равенство показателей вида напряженного и деформированного состояния в виде  $v_{\sigma} = v_{\epsilon}$ , откуда следует:

$$\frac{\sigma_{\rho} - \sigma_n}{\sigma_{\theta} - \sigma_n} = \frac{\epsilon_{\rho} - \epsilon_n}{\epsilon_{\theta} - \epsilon_n}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\rho}$ ,  $\sigma_{\theta}$  – напряжения в меридиональном (радиальном) и широтном направлениях соответственно;  $\sigma_n$  – напряжение по толщине заготовки;  $\epsilon_{\rho}$ ,  $\epsilon_{\theta}$  – радиальная и окружная

деформации соответственно;  $\varepsilon_n$  – деформация по толщине заготовки.

Полагая, что нормальные напряжения пренебрежимо малы в сравнении с радиальными и тангенциальными напряжениями, соотношение (1) можно представить в следующей форме:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_\theta} = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_n}{\varepsilon_\theta - \varepsilon_n}. \quad (2)$$

Введем обозначение  $\chi = \sigma_r / \sigma_\theta$ , тогда соотношение (2) переписывается следующим образом:

$$\chi = \sigma_r / \sigma_\theta = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_n}{\varepsilon_\theta - \varepsilon_n}. \quad (3)$$

Используя условие о несжимаемости материала:

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_n = 0,$$

получаем из формулы (3) следующую зависимость:

$$\varepsilon_n = \frac{\chi + 1}{\chi - 2} \cdot \varepsilon_\theta. \quad (4)$$

С учётом определения интенсивности деформаций [4] в терминах главных деформаций имеем:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_n)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_n)^2}. \quad (5)$$

Из соотношений (4) и (5) получаем:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r - \varepsilon_\theta &= \varepsilon_\theta \frac{3 \cdot (1 - \chi)}{\chi - 2}; \\ \varepsilon_r - \varepsilon_n &= \varepsilon_\theta \frac{3 \cdot \chi}{2 - \chi}; \\ \varepsilon_\theta - \varepsilon_n &= \varepsilon_\theta \cdot \frac{2}{2 - \chi}. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставив соотношения (6) в формулу (5), имеем:

$$\varepsilon_i = \frac{2 \cdot \sqrt{\chi^2 - \chi + 1}}{|\chi - 2|} \cdot \varepsilon_\theta. \quad (7)$$

Примем во внимание определение окружной деформации для произвольного этапа деформирования с учётом того, что в некоторый момент деформирования  $r_{\text{от}} = R_0$ . При этом значение текущего радиуса будет принимать значения из диапазона  $[R_0, r_k]$ , где  $r_k$  – конечный радиус отверстия по чертежу. Введем вспомогательные величины:

$$B = \frac{2 \cdot \sqrt{\chi^2 - \chi + 1}}{|\chi - 2|} \quad \text{и} \quad D = \frac{B}{R_0}. \quad (8)$$

$$\sigma_r^d = F \cdot \ln \rho_c + \Pi \cdot D \rho_c - F \cdot \ln R_0 - \Pi \cdot D \cdot R_0 - \sigma_0 = F \cdot \ln \frac{\rho_c}{R_0} + \Pi \cdot D \cdot (\rho_c - R_0) - \sigma_0, \quad (17)$$

Тогда интенсивность напряжений (7), с учётом обозначений (8), а также определения окружной деформации через геометрические параметры заготовки на рис. 1, примет вид:

$$\varepsilon_i = D\rho - B. \quad (9)$$

Уравнение равновесия для основной части очага деформации при отбортовке, осуществляемой пуансоном с плоским торцом, имеет вид [4]:

$$\rho \frac{d\sigma_r}{d\rho} + \sigma_r - \sigma_\theta = 0. \quad (10)$$

После незначительных преобразований это уравнение приобретает следующую форму:

$$\frac{d\sigma_r}{d\rho} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{\rho} = 0, \quad (11)$$

где  $\sigma_r, \sigma_\theta$  – напряжения в радиальном и широтном направлениях соответственно;  $\rho$  – текущее значение радиуса.

Упрощённое условие пластичности Мизеса-Генке имеет вид:

$$\sigma_r - \sigma_\theta = -(\sigma_s + \Pi \cdot \varepsilon_i), \quad (12)$$

где  $\Pi$  – модуль упрочнения,  $\sigma_s$  – предел текучести материала,  $\varepsilon_i$  – интенсивность деформации.

Подставив интенсивность деформации из формулы (9) в условие пластичности (12), получим:

$$\begin{aligned} \sigma_r - \sigma_\theta &= -(\sigma_s + \Pi \cdot (D\rho - B)) = \\ &= -[(\sigma_s - \Pi \cdot B) + \Pi \cdot D\rho]. \end{aligned} \quad (13)$$

Обозначив  $F = \sigma_s - \Pi \cdot B$ , из соотношения (13) имеем:

$$\sigma_r - \sigma_\theta = -F - \Pi \cdot D\rho. \quad (14)$$

Подстановка левой части условия (14) в уравнение (11) и последующее интегрирование приводит к следующему результату:

$$\sigma_r^- = F \cdot \ln \rho + \Pi \cdot D\rho + C. \quad (15)$$

Постоянную интегрирования  $C$  в решении (15) находим из граничного условия  $\sigma_r = -\sigma_0$  (где  $\sigma_0$  – напряжение торцового поджатия) при  $\rho = R_0$ :

$$C = -\sigma_0 - F \cdot \ln R_0 - \Pi \cdot D \cdot R_0. \quad (16)$$

Подставляя постоянную интегрирования из формулы (16) в решение (15), получаем максимальное радиальное напряжение в следующем виде:

где  $\rho_c$  – радиус границы прямолинейной зоны донной части кольца и зоны изгиба,  $\rho_c = R_n - r_n$ , где  $R_n$  – радиус пуансона,  $r_n$  – радиус скругления кромки пуансона.

Вычисление напряжения, связанного с учетом изгиба и последующего разгиба заготовки на ребре пуансона, определим формулой, приведённой в работе [5]:

$$\sigma_{u-p}^d = \sigma_s \cdot \frac{S_0}{2 \cdot r_n + S_0} \quad (18)$$

Влияние действия контрприжима можно учесть следующим образом:

$$\sigma_{\rho}^d = \left[ F \cdot \ln \frac{\rho_c}{R_0} + \Pi \cdot D \cdot (\rho_c - R_0) - \sigma_0 + \sigma_s \cdot \frac{S_0}{2 \cdot r_n + S_0} + \frac{2Q_{кп} \cdot \mu}{2\pi R_n \cdot S_0} \right] \cdot e^{\alpha \mu}, \quad (20)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения на перетяжном ребре пуансона;  $\alpha$  – угол обхвата заготовкой инструмента.

Выполним анализ влияния торцового поджатия на величину радиального напряжения в формуле (20). Предварительно преобразуем эту зависимость к относительным радиальным напряжениям и введём коэффициент отбортовки  $K = R_0/\rho_c$ .

На рис. 2 представлены соответствующие зависимости с указанием значений, входящих в модель (20) параметров.

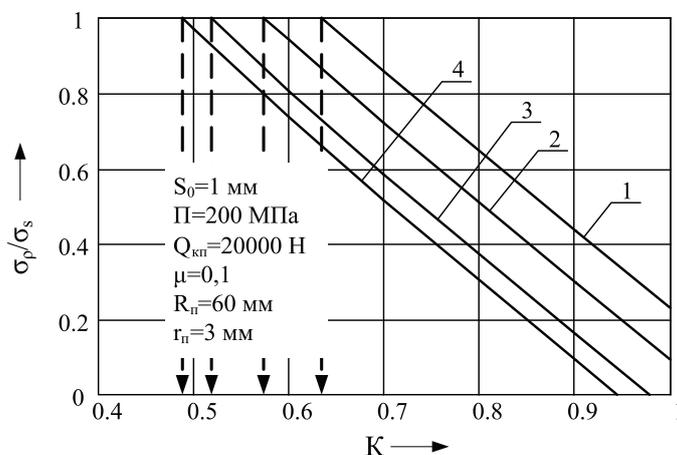


Рис. 2. Зависимость относительного радиального напряжения от величины торцового поджатия: 1, 2, 3, 4 –  $\sigma_0 = 20; 40; 50$  и  $60$  МПа соответственно

Предотвращение изгиба (депланаций) заготовки и исключение перемещения эластичного материала в зазор между заготовкой и инструментом со стороны отверстия (рис. 1) при торцовом поджатии предполагает применение контрприжима. Эта вынужденная мера уменьшает технологические возможности отбортовки. С ростом силы контрприжима увеличивается предельный коэффициент отбортовки: увеличение силы прижима с 1 до 2 кН приводит к увеличению коэффициента отбортовки на 4%.

$$\sigma_n^d = \frac{Q_{кп} \cdot \mu}{\pi R_n \cdot S_0}, \quad (19)$$

где  $Q_{кп}$  – сила действия контрприжима;  $R_n$  – радиус пуансона.

Для учета трения с целью получения полного напряжения, которое передается вертикальной стенке, используем закон Эйлера, предусматривающий факторизацию члена  $e^{\alpha \mu}$  с полным напряжением формообразования донной части. В окончательном виде радиальные напряжения с учётом соотношений (17), (18) и (19) представляются зависимостью:

Пунктирными линиями со стрелками показаны значения предельных коэффициентов отбортовки по критерию достижения предела текучести в наклонной стенке заготовки.

Из графиков рис. 2 следует, что приложение торцового поджатия до уровня 25% от предела текучести существенно уменьшает предельный коэффициент отбортовки: от 0,63 до 0,48. Вероятно, это наиболее действенный инструмент интенсификации процесса отбортовки.

Напряжение силы действия контрприжима не может выступать в качестве управляющего фактора при реализации металлосберегающей технологии, т.к. снижает интенсивность формообразования за счет отбортовки, что не дает возможности существенно уменьшить диаметр исходной заготовки.

Очевидно, что напряжение, возникающее при реализации торцового поджатия, может использоваться в качестве управляющего фактора при моделировании формо-

образования в соответствии с предложенной схемой нагружения (см. рис. 1).

Для анализа деформирования фланцевой части заготовки необходимо определить полное напряжение  $\sigma_p$ , передаваемое вертикальной стенке со стороны фланцевой части заготовки при установившемся процессе преимущественного деформирования вытяжкой:

$$\sigma_p^D = (\sigma_p^\phi + \sigma_n^\phi + \sigma_{u-p}^\phi) \cdot e^{\mu\alpha}, \quad (21)$$

где  $\sigma_p^\phi$  – радиальное напряжение деформирования фланца;  $\sigma_n^\phi$  – напряжение от действия прижима;  $\sigma_{u-p}^\phi$  – напряжение от изгиба-разгиба заготовки на ребре матрицы.

Определим напряжения, входящие в формулу (21) с учётом упрочнения. Аналогично формуле (7) искомая зависимость деформаций от окружной деформации и фактора  $\chi$ , выражающего отношение радиального и тангенциального напряжений, может быть представлена в виде:

$$\varepsilon_i = \frac{2\sqrt{\chi^2 - \chi + 1}}{|\chi - 2|} \cdot \left(1 - \frac{\rho}{R_r}\right), \quad (22)$$

где  $R_r$  – текущее значение радиуса кривизны фланца.

Для вычисления радиального напряжения используем совместное решение урав-

$$\sigma_{u-p}^\phi = \left[ \sigma_s + \Pi \left( \frac{S_0}{2 \cdot r_m + S_0} \right) \right] \cdot \left( \frac{S_0}{2r_m + S_0} \right), \quad (27)$$

где  $r_m$  – радиус скругления ребра матрицы, мм.

Таким образом, частные напряжения, входящие в формулу (21), полностью определяются выражениями (25)–(27). Тогда

$$\sigma_p^D = \left\{ G \cdot \ln \left( \frac{R_r}{R_\phi} \right) + \text{ВП} \left( \frac{R_\phi}{R_r} - 1 \right) + \left[ \sigma_s + \Pi \left( \frac{S_0}{2r_m + S_0} \right) \right] \cdot \left( \frac{S_0}{2r_m + S_0} \right) + \frac{Q_n^\phi \cdot \mu}{\pi \cdot R_\phi \cdot S_0} \right\} \cdot e^{\mu\alpha}, \quad (28)$$

где  $R_\phi$  – внутренний радиус плоского кольцевого участка заготовки, мм.

Таким образом возможны два варианта осуществления управления процессом совмещения операций вытяжки и отбортовки:

1) приложением сжимающих сил на поверхности кромки отверстия (торцовым поджатием);

2) увеличением силы прижима фланцевой части заготовки.

Для изучения влияния этих управляющих факторов на процесс формообразования были проведены экспериментальные исследования. Построены зависимости предельного деформирования от относи-

тельного деформирования (10) с условием пластичности в следующей форме:

$$\sigma_p - \sigma_\theta = \sigma_s + \Pi \cdot \varepsilon_i. \quad (23)$$

Граничное условие для данного случая имеет вид:

$$\sigma_p(R_r) = 0. \quad (24)$$

Решение, полученное интегрированием уравнения (10) совместно с условиями (23) и (24), представляется следующим выражением:

$$\sigma_p^\phi = -G \cdot \ln \left( \frac{\rho}{R_r} \right) + \text{В} \cdot \Pi \cdot \left( \frac{\rho}{R_r} - 1 \right), \quad (25)$$

где  $G = \Pi \cdot \text{В} + \sigma_s$ .

Напряжение от действия прижима  $\sigma_n^\phi$  в угловой зоне фланца вычисляется на основе закона трения Амонтона-Кулона, причем трение учитывается на обеих сторонах фланца:

$$\sigma_n^\phi = \mu \frac{Q_n^\phi}{\pi \cdot R_\phi \cdot S_0}, \quad (26)$$

где  $Q_n^\phi$  – удельная сила прижима, Н;  $R_\phi$  – внутренний радиус кольца плоского участка фланца, мм.

Напряжение от изгиба-разгиба заготовки на ребре матрицы может быть вычислено по формуле, аналогичной соотношению (18):

радиальные напряжения, переходящие на наклонный участок заготовки в зазоре пуансона и матрицы, можно представить в окончательном виде:

тельной толщины материала  $K_n = f(S_0/d_0)$  (рис. 3. а) и относительного диаметра отверстия  $K_n = f(d_0/D_n)$  (рис. 3. б) для случаев формообразования без торцового поджатия и с торцовым поджатием.

Анализ результатов экспериментов показывает, что совмещение операций вытяжки и отбортовки с торцовым поджатием по кромке отверстия эластичной средой (см. рис. 3) снижает предельную степень деформации по сравнению с формообразованием без торцового поджатия на 6%. Следует отметить, что при этом степень утонения металла на кромке отверстия снижается с 16,6 до 15,2%.

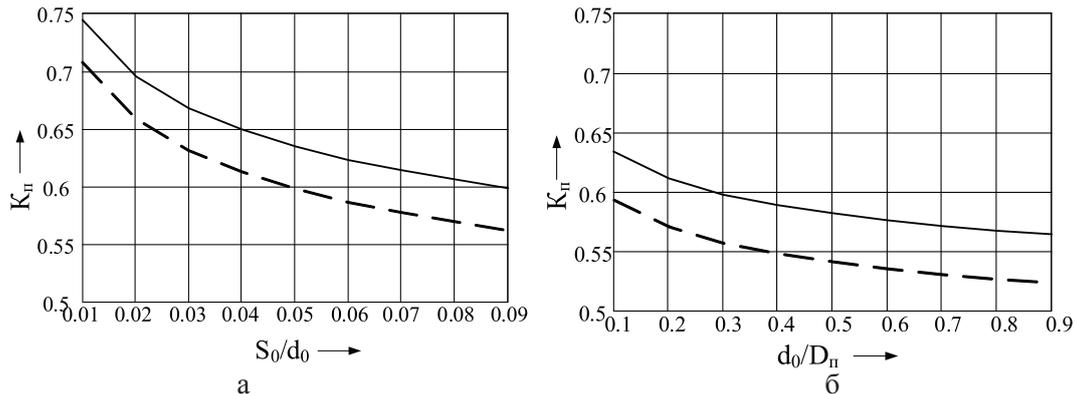


Рис. 3. Зависимости предельного деформирования от относительной толщины (а) и относительного диаметра отверстия (б).  
 ————— без торцового поджатия — — — с торцовым поджатием

Увеличение давления прижима ( $q_{пр}$ ) фланцевой части заготовки (рис. 4) от 1,0 до 2,0 Па уменьшает интенсивность деформации фланцевой части заготовки на 10%, а

увеличение  $q_{пр}$  до 3,0 МПа делает преимущественным видом деформирования отбортовку, при этом относительное утонение увеличивается до 20%.

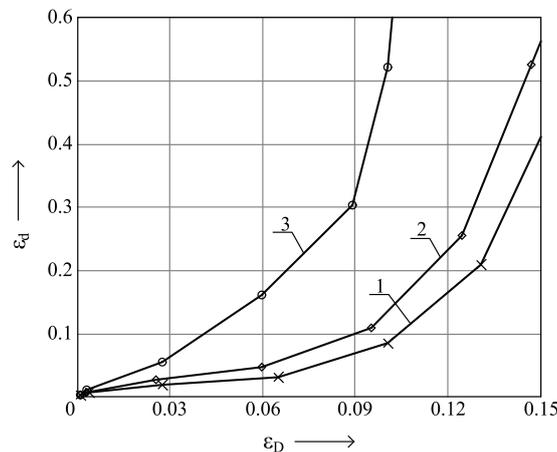


Рис. 4. Относительные изменения диаметра отверстия  $\varepsilon_d$  и фланца  $\varepsilon_f$  при вытяжке-отбортовке: кривые 1, 2, 3 отвечают значениям  $q_{пр} = 1,0; 2,0$  и  $3,0$  МПа соответственно

Таким образом, наличие управляющих факторов, таких как сила прижима и торцовое поджатие, позволяет создать условия формообразования при совмещении операций осесимметричной вытяжки и отбортовки при штамповке деталей с отверстием в донной части, позволяющие кратковременно (до завершения деформирования) стабилизировать процесс. Это позволит, во-первых, повысить коэффициент использования металла, так как формообразование детали осуществляется за счет деформирования фланцевой и донной частей заготовки, во-вторых, в некоторых случаях позволит снизить количество переходов штамповки.

**Список литературы**

1. Берлет Ю.Н., Филимонов В.И., Титов Ю.А. Условия протекания процесса вытяжки с неполной отбортовкой // Кузнечно-штамповочное производство. – 2000. – №2. – С. 20–25.  
 2. Берлет Ю.Н. Металлосберегающие процессы штамповки деталей типа тел вращения на основе вытяжки-от-

бортовки. // Ю.Н. Берлет, Ю.А. Титов, А.Ш. Мурашов, В.И. Филимонов. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – С. 71.

3. Ершов В.И., Федосова С.А., Соболев А.И. Об одном из путей интенсификации процесса отбортовки отверстий // Кузнечно-штамповочное производство. – 1983. – №2. С. 20–22.

4. Филимонов В.И. Моделирование процесса вытяжки-отбортовки при изготовлении коробчатых деталей с фланцем и отверстием в донной части // В.И. Филимонов, В.М. Никитенко // Технология металлов. – 2009. – №2. – С. 11–17.

5. Матвеев Г.А. Исследование совмещенных операций вытяжки и отбортовки // Труды МВТУ. – М., 1983. – С. 118.

6. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 278.

**Рецензенты:**

Дьяков И.Ф., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск;

Табак В.П., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Ульяновского государственного технического университета, г. Ульяновск.

Работа поступила в редакцию 19.08.2011.