

На правах рукописи

Нестеренко Елена Сергеевна

**Совершенствование процесса глубокой вытяжки тонкостенных  
осесимметричных деталей в штампе с упругим прижимом**

Специальность 05.03.05 – Технологии  
и машины обработки давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара 2007

Работа выполнена на кафедре обработки металлов давлением ГОУ ВПО “Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва” (СГАУ).

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор  
Попов Игорь Петрович

Официальные оппоненты

доктор технических наук, доцент  
Моисеев Виктор Кузьмич,  
кафедра производства летательных  
аппаратов и управления качеством  
в машиностроении,  
ГОУ ВПО “Самарский государственный  
аэрокосмический университет имени  
академика С.П. Королёва”

кандидат технических наук,  
Щуровский Денис Васильевич,  
менеджер по качеству и развитию  
поставщиков, ЗАО «GM-Автоваз»

Ведущая организация

ОАО «Авиакор - Авиационный завод»

Защита состоится « 26 » декабря 2007 г. на заседании диссертационного совета Д212.215.03 при СГАУ по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан « 23 » ноября 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н.

Ю.С. Клочков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Полые тонкостенные осесимметричные детали, полученные из листа процессом вытяжки, имеют широкое применение в авиационной промышленности за счет достаточно высокой прочности, жесткости и небольшого веса.

Практика изготовления таких деталей в операциях листовой штамповки показывает, что коэффициент вытяжки снижается при уменьшении относительной толщины заготовки.

Объяснение этому явлению, как показал анализ существующих источников, заключается в следующем: для вытяжки тонкостенных деталей требуется более сильный прижим для ликвидации гофрообразования фланца. Это приводит к увеличению сил трения, росту напряжений в опасном сечении и преждевременному разрыву заготовки.

Известно, что предельный коэффициент вытяжки, при котором вытягиваемая заготовка будет находиться на грани возможного разрушения, можно увеличить разными методами, основным из которых является минимизация усилия прижима.

Опыты, проводимые в 60<sup>х</sup> г.г. профессором Овчинниковым А.Г. показали, что при вытяжке относительно тонкостенных заготовок ( $(S/D)100\% < 0,6$ ) в случае если прижим распределяется не по кромке фланца, как в традиционном случае, а по всей его поверхности коэффициент вытяжки увеличивается. Однако этому явлению до сих пор не найдено объяснения.

Следует подчеркнуть, что при минимизации усилия прижима с целью интенсификации глубокой вытяжки отсутствует направление, основанное на использовании упругих свойств штамповой оснастки (упругого прижима, упругой матрицы и др.). Данное направление не требует использования специального оборудования и сложной конструкции оснастки. И может быть применимо при больших объемах производства.

На кафедре обработки металлов давлением Самарского государственного аэрокосмического университета разработана конструктивная возможность проведения вытяжки с прижимом, прилегающим по всей поверхности фланца в течение всего процесса. Этот процесс осуществляют с помощью использования упругих свойств штамповой оснастки, а именно: прижим выполнен в виде кольца переменного сечения, обеспечивающего упругие перемещения, которые позволяют прижать фланец заготовки с необходимым давлением по всей его поверхности. Однако необходимы методики расчета технологических параметров разработанного способа вытяжки с упругим прижимом.

В связи с этим, представленные в диссертации исследования процесса вытяжки тонкостенных цилиндрических деталей в инструментальном штампе с упругим прижимом являются актуальными.

**Цель диссертационной работы.** Разработка методики проектирования способа вытяжки тонкостенных осесимметричных деталей в штампе с упругим прижимом.

**Методы исследований.** Теоретические исследования при разработке способа вытяжки базировались на основных положениях теории пластического деформирования листовых материалов, изгиба круглых пластин, теории гофрообразования.

Экспериментальные исследования осуществлялись в лабораторных условиях с применением методов математической статистики на гидравлической машине ЦДМПУ-30.

**Достоверность результатов** обеспечивается обоснованностью использованных теоретических зависимостей, допущений и ограничений, корректностью поставленных задач, применением известных математических методов и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, полученными как лично автором, так и другими исследованиями, а также использованием результатов работы в промышленности.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Выявлена особенность механизма вытяжки тонколистовых заготовок.
2. Разработана методика проектирования относительно тонкостенных осесимметричных деталей с использованием процесса глубокой вытяжки в штампе с упругим прижимом, позволяющим увеличить коэффициент вытяжки на 15-20%.

**Практическое значение** работы заключается в:

1. получении тонкостенных цилиндрических деталей с большим коэффициентом вытяжки, близким к коэффициентам вытяжки толстостенных деталей.
2. совершенствовании процесса вытяжки тонкостенных деталей за счет снижения трения, количества переходов и улучшения качества поверхности деталей.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы реализованы в виде руководяще-технического материала и внедрены на заводе ОАО «Гидроавтоматика».

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались на 6 Международных и 7 Всероссийских конференциях.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией 2 статьи.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа выполнена на 150 страницах машинописного текста, содержит 90 рисунков и 9 таблиц. Список использованных источников содержит 98 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы, научная новизна, практическое значение и основные результаты работы.

**В первой главе** изложено современное состояние теории и технологии изготовления цилиндрических тонкостенных заготовок и изделий методами глубокой вытяжки с условием полного прилегания прижима к фланцу заготовки. Показаны особенности вытяжки тонколистового материала. Описаны механизм гофрообразования на фланце и условия применения прижима. Проанализированы методы расчета потери устойчивости.

На основе проведенного обзора работ установлено, что большой вклад в развитие теории вытяжки тонколистового материала, расчета потери устойчивости внесли В.Д. Головлев, Л.А. Шофман, В.П. Романовский, Л.И. Рудман, М.Н. Бирюков, Ю.Н. Алексеев, Е.И. Исаченков, Е.Н. Мошнин, М.В. Сторожев, Е.А. Попов, А.Г. Овчинников, А.Д. Томленов, Ю.Б. Колесов, Е.С. Сизов, В.Л. Колмогоров и др.

Выявлено, что при условии полного прилегания прижима к фланцу заготовки на протяжении всего процесса вытяжки коэффициент вытяжки относительно тонкостенных деталей возрастает на 15-20%.

Однако существующие методы вытяжки тонколистового материала трудоемки и сложны либо по конструкции оснастки, либо по применяемому оборудованию и не обеспечивают полного прилегания прижима к заготовке в ходе всего процесса вытяжки.

На рисунке 1 представлена схема штампа, обеспечивающего прилегание прижима по всей поверхности фланца за счет перемещения упругого прижима.

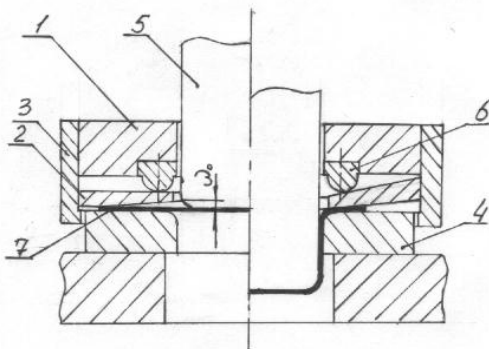


Рисунок 1 – Схема конструкции штампа для вытяжки тонколистового материала с использованием упругого прижима. 1-кольцо опорное; 2-прижим упругий; 3-обойма; 4-матрица; 5-пуансон; 6-выступ кольцевой; 7-заготовка.

Усилие на прижим передается через кольцевой выступ 6, который расположен по внутреннему радиусу прижима 2. В процессе вытяжки под действием усилия прижим будет упруго деформироваться. Величина этого упругого перемещения ограничена упругими свойствами материала, которые должны превышать максимальную величину разнотолщинности на фланце.

Однако данный способ практически не изучен. Отсутствуют методики проектирования технологических параметров способа глубокой вытяжки с упругим прижимом.

В связи с этим в задачи настоящего исследования входило:

1. Теоретически обосновать, что использование способа глубокой вытяжки с упругим прижимом приводит к снижению напряжений в опасном сечении и увеличению предельного коэффициента вытяжки по сравнению с традиционным методом;
2. Определить технологические параметры процесса: усилие прижима; предельный коэффициент вытяжки;
3. Разработать методику определения геометрических параметров упругого прижима;
4. Привести результаты экспериментальных и теоретических исследований в сравнении с традиционным способом вытяжки.

**Во второй главе** подробно рассмотрены особенности механизма действия жесткого прижима. Исследования показали, что при вытяжке относительно тонкостенных заготовок с относительной толщиной  $\frac{s}{D}100\% < 0,6$  наблюдаются явления, которые отличны от известных. Особенность состоит в том, что даже при оптимальных усилиях прижима на свободном участке фланца возникает гофрообразование и поэтому при прохождении гофр через радиусное скругление матрицы возникают дополнительные растягивающие напряжения, которые влияют на растягивающие напряжения в опасном сечении.

Для нахождения дополнительных напряжений (рисунок 2) используется приближенная методика, изложенная в работах Е.А. Попова, М.Е. Зубцова, А.Н. Малова.

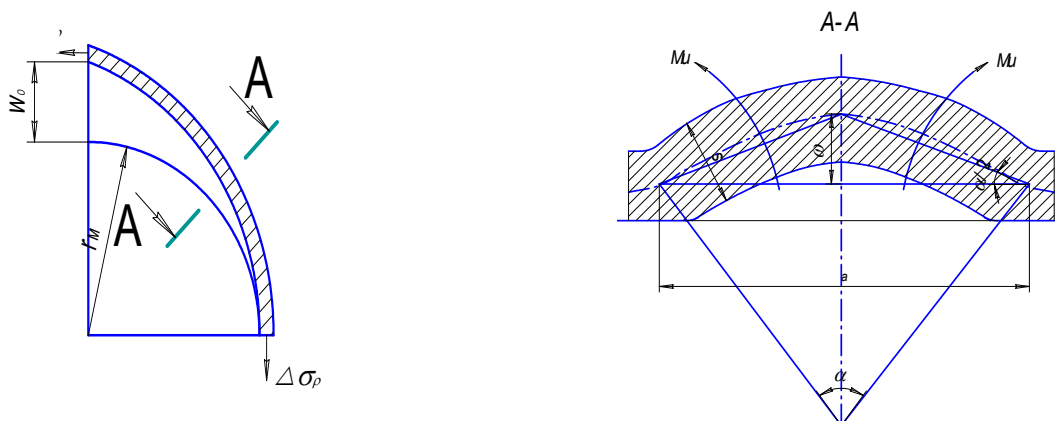


Рисунок 2 – Схема прохождения гофры через радиусную часть матрицы

Выпрямление гофры происходит при прохождении по всей образующей рабочей поверхности матрицы от сил, вызванных дополнительными меридиональными напряжениями на величине перемещения  $\omega_0$ . При этом работа равна:

$$A_{\sigma} = \Delta\sigma_p s a \omega_0, \quad (1)$$

где  $\Delta\sigma_p$  - дополнительное меридиональное напряжение;

$s$  – толщина заготовки;

$a$  – длина полуволны;

$\omega_0$  – величина перемещения от дополнительных усилий выпрямления волны.

Гофра, выпрямляясь, совершает работу сопротивления:

$$A_a = M_u r_M \frac{\pi}{2} \alpha, \quad (2)$$

где  $M_u = \sigma_a \frac{s^2}{4}$  – момент сопротивления изгиба единицы ширины;  $\sigma_b$  – предел прочности материала;

$r_M \frac{\pi}{2}$  – ширина волны, равная длине образующей радиусной поверхности матрицы;

$\alpha$  – угол, ограничивающий длину волны.

Из условия равенства (1) и (2):

$$\Delta\sigma_\rho = 0,8\sigma_s \frac{s r_M}{a^2}. \quad (3)$$

Найденные значения дополнительных растягивающих напряжений  $\Delta\sigma_\rho$ , возникающие при использовании жесткого прижима, составляют 10-13% от предела прочности материала.

Для определения напряжений и деформаций в работе, используется метод, разработанный Е.А.Поповым, в основе которого лежат приближенное уравнение равновесия и условие пластичности по максимальным касательным напряжениям.

Предельный коэффициент вытяжки определяется из условия  $\sigma_{\rho \max} = \sigma_s$ . Это условие связано и с достижением максимальной величины разнотолщинности фланца заготовки как показали исследования. Отсюда следует, что основной задачей при рассмотрении процесса вытяжки является отыскание величин:  $\Delta s_{\max}$  и  $\sigma_{\rho \max}$ . Максимальные растягивающие напряжения определяются по формуле Е.А. Попова:

$$\sigma_{\rho \max} = \sigma_s \left[ \left( \frac{K_B^{2\psi_u} - 1}{2\psi_u} \right)^{\frac{1}{1-\psi_u}} + F_{\text{трж}} \frac{s}{2r_M + s} \right] (1 + 1,6f_{\text{тр}}), \quad (4)$$

$$\text{где } F_{\text{трж}} = \frac{f_{\text{тр}} Q}{\pi R_H s \sigma_s},$$

$F_{\text{трж}}$  – сила трения под прижимом на заготовку при использовании жесткого прижима;  $K_B$  – коэффициент вытяжки,  $\psi_u$  – относительное сужение;  $s$  – толщина заготовки,  $r_M$  – радиус матрицы;  $f_{\text{тр}}$  – коэффициент трения;  $Q$  – усилие прижима.

При использовании упругого прижима напряженно-деформированное состояние элементов участков заготовки будет таким же, как при использовании жесткого прижима. В уравнении равновесия изменится лишь составляющая сил трения под прижимом:

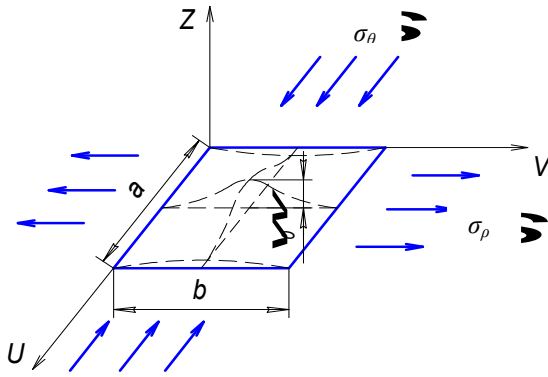
$$F_{\text{тпру}} = \frac{2f_{\text{тпру}} Q}{\pi(R_H + r_d) \cdot s \sigma_s},$$

где  $R_H$  – радиус фланца;  $r_d$  – радиус детали.

Определено, что условие полного прилегания упругого прижима к фланцу заготовки не влияет на распределение толщины по образующей детали.

Однако условия прижима влияют на форму потери устойчивости фланца.

Исследования показали, что при использовании жесткого прижима, форма потери устойчивости фланца будет иметь вид (рисунок 3).



Функция прогиба:

$$\omega = \frac{1}{2} \omega_0 \left[ 1 - \cos\left(2\pi \frac{v}{b}\right) \right] \sin \frac{\pi \cdot u}{a}$$

с граничными условиями:

$$\text{при } v=b, u=a/2 \quad \cos 2\pi = 1 \quad \omega = 0,$$

$$\text{при } v=0, u=a/2 \quad \cos 0 = 1 \quad \omega = 0,$$

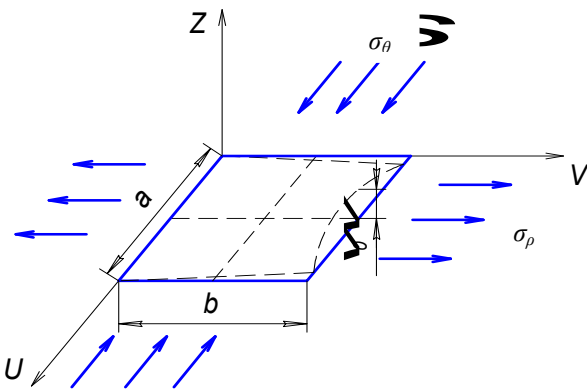
$$\text{а при } v=b/2, u=a/2$$

$$\cos \pi = -1; \quad \omega = \omega_0 = \max.$$

Рисунок 3 – Потеря устойчивости фланца при оптимальном усилии жесткого прижима

Такая форма возникает за счет того, что краевая часть фланца утолщается, причем максимально вблизи края заготовки при  $\rho = R_H$ , и усилие прижима распределяется по узкой кольцевой части фланца, граничащей с наружным краем заготовки. Гофра по высоте небольшая, она проходит в зазор между матрицей и пуансоном и при переходе через вытяжное ребро матрицы выпрямляется. Однако на это требуется дополнительная работа, что приводит к росту растягивающих напряжений и поэтому уменьшается  $K_B$ . Кроме того, ухудшается качество детали из-за ризок.

При упругом прижиме фланец теряет устойчивость так, как показано на рисунке 4, потому что сила прижима распределена по всей поверхности фланца.



Функция прогиба:

$$\omega = \omega_0 \left( 1 - \cos \frac{\pi \cdot v}{2 \cdot b} \right) \sin \frac{\pi \cdot u}{a}$$

с граничными условиями:

$$\text{при } v=b, u=a/2$$

$$\cos(\pi/2) = 0, \quad \omega = \omega_0 = \max;$$

$$\text{при } v=0, u=a/2$$

$$\cos 0 = 1; \quad \omega = 0.$$

Рисунок 4 – Потеря устойчивости фланца заготовки при недостаточном усилии упругого прижима

Усилия прижимов, необходимые для ликвидации гофр определяются по методике В.Д.Головлева. Для этого воспользуемся энергетическим критерием устойчивости:

$$U + (-A_q) = A, \tag{5}$$

где  $U$  – работа внутренних сил,  $A$  – работа контурных внешних сил,  $A_q$  – работа внешних сил прижима.

Уравнение критического состояния плоского участка фланца:

$$\int_0^a \int_0^b \left[ \frac{2}{3} E_p J \left( \chi_\theta^2 + \chi_\theta \chi_\rho + \chi_\rho^2 + \chi_{\theta\rho}^2 - \psi \frac{\chi^2}{K_\sigma} \right) + \frac{1}{2} t \sigma_\theta (\beta \omega_\theta^2 + m_\sigma \omega_\rho^2) \right] d\rho d\theta + \frac{\omega_0^2}{l} q = 0, \tag{6}$$



где  $q$  – параметр силы прижима;  $\psi = \frac{3}{4}(1-n)$ ,  $K_\sigma = 1 - m_\sigma + m_\sigma^2$ ;  $m_\sigma = \frac{\sigma_\rho}{\sigma_\theta}$ ;  $\chi_\rho$ ,  $\chi_\theta$  – кривизны срединной поверхности;  $\chi_{\rho\theta}$  – кручение срединной поверхности;  $E_p$  – модуль пластичности изотропного материала;  $J$  – момент инерции;  $\omega_\theta$  и  $\omega_\rho$  – частные производные функции прогибов;  $a$  – длина полуволны;  $b$  – ширина фланца;  $l$  – длина криволинейной части фланца по средней линии на данной стадии вытяжки.

$$q = \frac{c}{\omega_0} Q_0 + \frac{1}{2} c^2 t, \quad (7)$$

где  $Q_0$  – постоянная составляющая силы прижима;  $t$  – жесткость прижима,  $t=0$ , т.к. прижим пневматического типа;  $c$  – постоянная,  $\omega_0$  – максимальная амплитуда полуволны.

Подставляя в уравнение (6) функции прогибов аналогично для жесткого потом упругого прижимов, и из (6) (7) находим необходимое усилие для ликвидации гофрообразования.

Для жесткого прижима  $Q_0$  равно:

$$Q_0 = \frac{\omega_0}{c} \left[ -\frac{\pi^2 l}{4a^2 b} \left( \sigma_{\theta cp} s \frac{b^2}{2} N' + \frac{8}{3} \pi^2 E_p J M' \right) \right] \quad (8)$$

где  $N'$  и  $M'$  переменные, зависящие от размеров выпучиваемого элемента фланца,  $\sigma_{\theta cp}$  – величина сжимающих напряжений, находится как среднее значение сжимающих напряжений по наружному и внутреннему краям фланца.

Для упругого прижима  $Q_0$  равно:

$$Q_0 = \frac{\omega_0}{c} \left[ -\frac{\pi^2 l}{4a^2 b} \left( \sigma_{\theta cp} s \cdot b^2 N' + \frac{3}{4} \pi^2 E_p J M' \right) \right] \quad (9)$$

Если принять, что сила прижима воспринимается каждым из элементов в точке  $u = a/2$ ;  $v = b/2$  (для жесткого прижима  $c=2$ , для упругого  $c=0,586$ ), то при прочих равных условиях ( $r_B = 22$ мм,  $s=0,5$ мм,  $\beta=1$ ,  $n=0,15$ ,  $\omega_0=1$ мм) значения усилий прижимов в момент достижения максимального усилия вытяжки представлены на графике (рисунок 5).

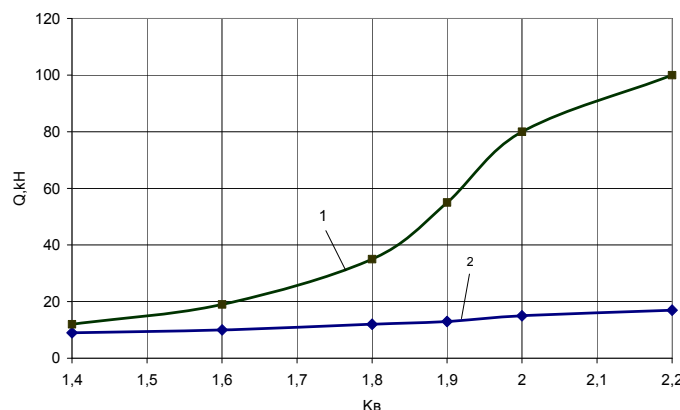


Рисунок 5 – Значение критических усилий прижимов, 1 – для жесткого прижима; 2 – для упругого прижима

Из графиков (рисунок 5) видно, что применение упругого прижима, необходимое для ликвидации гофрообразования, требует усилие прижима значительно

меньше, чем при использовании жесткого прижима. Это приводит к уменьшению составляющей усилия трения и снижает напряжения в опасном сечении.

**В третьей главе** определяются геометрические параметры упругого прижима.

Рассматривается форма упругого прижима на стадии максимальной разнотолщинности фланца. Схема действия прижима в процессе вытяжки показана на рисунке 6, где  $\Delta s_{\max} = s_{\text{кромки}} - s_{\text{матрицы}}$  - максимальная разнотолщинность фланца.

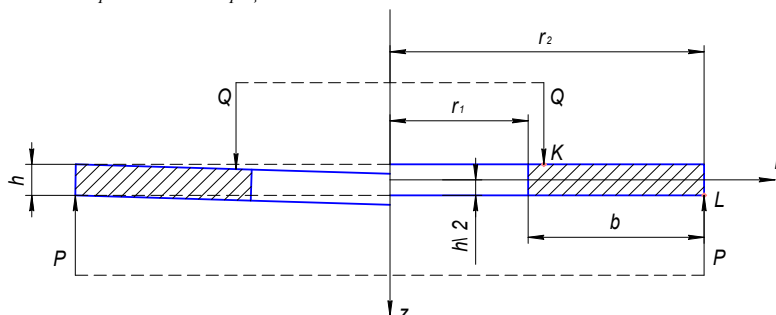


Рисунок 6 – Схема нагружения упругого кольца

При расчете геометрических параметров прижима применяем инженерную теорию расчета осесимметричного изгиба круглых деталей, основанную на предположении о неизменности формы поперечного сечения, разработанную К.Б. Биценко, С.В. Бояршиновым.

Находим растягивающие и сжимающие напряжения, возникающие внутри кольца:

$$\sigma_r = \frac{Ez}{(1-\mu^2)} \left( \frac{d\vartheta}{dr} + \mu \frac{\vartheta}{r} \right); \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = \frac{Ez}{(1-\mu^2)} \left( \frac{\vartheta}{r} + \mu \frac{d\vartheta}{dr} \right). \quad (11)$$

Так как  $\sigma_r$  мало по сравнению с  $\sigma_\theta$ , то принимаем  $\sigma_\theta$  за интенсивность напряжений в нагружаемом кольце и сравниваем с пределом упругости материала кольца  $\sigma_{\text{упр}}$ :

$$\sigma_i = \sigma_\theta \leq \sigma_{\text{упр}} \quad (12)$$

Если условие (12) выполняется, то прижимное кольцо пластически не деформируется.

При интегрировании напряжений по площади граней элемента пластины (рисунок 7) нормальные напряжения приводим к изгибающим моментам  $M_r$  и  $M_\theta$ , а касательные – поперечной силе  $Q$ .

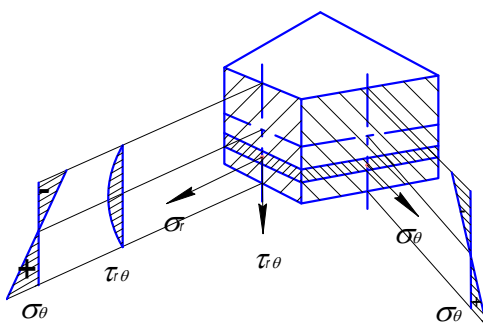


Рисунок 7 – Распределение напряжений по толщине кольца

Изгибающие моменты в радиальном и окружном направлениях запишем в виде интегралов:

$$M_r = \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_\rho z dz ; \quad M_\theta = \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_\theta z dz . \quad (13)$$

$$q = \frac{Eh^3 \Delta s}{12r^3 (r_1 - r_2)(1 - \mu^2)} . \quad (14)$$

Из (13) высота упругого кольца равна:

$$h = \sqrt[3]{\frac{q12r^3 (r_1 - r_2)(1 - \mu^2)}{E\Delta s}} \quad (15)$$

В формуле (15) две неизвестных величины:  $h$ ,  $q$ . Таким образом, необходимо подобрать такую высоту прижимного кольца, при которой оптимального усилия прижима будет хватать для деформации кольца на нужную высоту и на предотвращение гофрообразования. При этом кольцо не должно пластически деформироваться. Результаты расчетов приведены на рисунках 8,9.

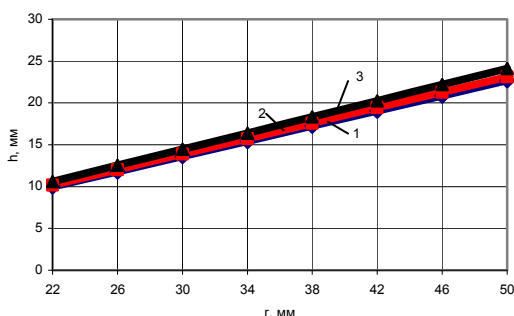


Рисунок 8 – Высота прижимного кольца, при  $E=20 \cdot 10^9$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\mu=0,3$  (материал кольца сталь 45),  $r_0=22$  мм, 1 – при  $R_{зар}=40$  мм,  $\Delta s_{max}=0,015$  мм,  $q=0,17$  кг/мм<sup>2</sup>; 2 – при  $R_{зар}=42$  мм,  $\Delta s_{max}=0,017$  мм,  $q=0,20$  кг/мм<sup>2</sup>; 3 – при  $R_{зар}=44$  мм,  $\Delta s_{max}=0,018$  мм,  $q=0,28$  кг/мм<sup>2</sup>

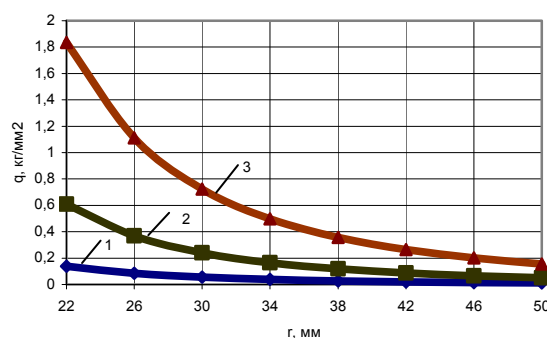


Рисунок 9 – Распределение поверхностной нагрузки по ширине прижима,  $r_0=22$  мм 1 – при  $h_{min}=10$  мм; 2 – при  $h_{сред}=18$  мм; 3 – при  $h_{max}=23$  мм

Из графика (рисунок 8) видно, что высота прижима должна быть переменной, однако это усложняет конструкцию штампа. Поэтому примем ее постоянной. Из графиков (рисунок 9) видно, что при  $h_{min}=10$  мм распределение поверхностной нагрузки более равномерно, максимальное значение  $q=0,17$  кг/мм<sup>2</sup> достигается при  $r=22$  мм, минимальное  $q=0,01$  кг/мм<sup>2</sup> при  $r=50$  мм. При  $h_{сред}=18$  мм и  $h_{max}=23$  мм поверхностная нагрузка  $q=0,45$  кг/мм<sup>2</sup> и  $q=1,1$  кг/мм<sup>2</sup> соответственно при  $r=22$  мм превышает допустимую нагрузку, равную  $q=0,2-0,3$  кг/мм<sup>2</sup>.

Также расчет прижимного кольца проводился методом конечных элементов в программе «DEFORM 2D V8.1».

Анализируя полученные результаты можно сделать следующий вывод: за постоянную величину прижима можно принять  $h_{min}$ , то есть высоту прижима, рассчитанную при радиусе кольца  $r=r_{внутр}$ .

**В четвертой главе** приведены результаты исследований распределения деформаций во фланце заготовки, предельного коэффициента вытяжки и упругого прогиба прижимного кольца.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях на универсальной гидравлической машине ЦДМПУ-30. В качестве оснастки использовался экспериментальный штамп.

Замеры толщины фланца производились на различных стадиях деформации: на стадии перед достижением стадии максимальной разнотолщинности (при смещении фланца на 5% от начальной ширины фланца), на стадии максимальной разнотолщинности (при смещении фланца на 20%) и на стадии после достижения стадии максимальной разнотолщинности (при смещении фланца на 25%). Разница между экспериментальными замерами толщины на фланце при вытяжке с жестким и упругим прижимами на различных стадиях остается на уровне статистической погрешности, равной 10%.

Определенные экспериментально оптимальные усилия упругого прижима меньше на 1,5-5кН усилий жесткого прижима. И с ростом коэффициента вытяжки эта разница увеличивается. Разница же между теоретическими и экспериментальными значениями для упругого прижима незначительна и объясняется тем, что для облегчения теоретических расчетов были введены допущения. А значительное отличие между теоретическими и экспериментальными значениями оптимальных усилий жесткого прижима при  $K_b > 1,7$  объясняется, тем, что при теоретических расчетах не учитывалась возможная потеря устойчивости фланца заготовки (рисунок 10).

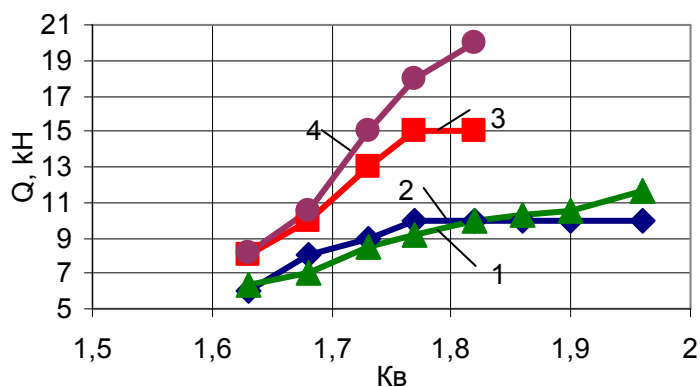


Рисунок 10- Оптимальное усилие прижима (АД0);

$$S = 0,27\text{мм}; f_{mp} = 0,1; r_m = r_n = 3\text{мм}$$

1 – с упругим прижимом теоретические значения; 2 – с упругим прижимом экспериментальные данные; 3 – с жестким прижимом экспериментальные данные; 4 – с жестким прижимом теоретические значения

Эксперименты по исследованию потери устойчивости фланца дали полное подтверждение ранее принятых схем (рисунок 3, 4). С упругим прижимом вытягиваем деталь с усилием прижима на 50% ниже оптимального (рисунок 11а). При

этом из-за недостаточного усилия прижима образуются гофры на фланце. С жестким прижимом вытягиваем деталь с коэффициентом вытяжки выше предельного, прикладывая к прижиму оптимальное усилие. Происходит обрыв заготовки (рисунок 11б).



а



б

Рисунок 11 – Гофрообразование на фланце

а) при упругом прижиме  $Q=5\text{кН}$ ,  $K_B=1,82$ ; б) при жестком прижиме  $Q=15\text{кН}$ ,  $K_B=1,87$

Предельный коэффициент вытяжки с применением упругого прижима определяется из зависимости усилия вытяжки от коэффициента вытяжки в координатах  $P_{\text{выт } i} - K_{\text{в } i}$  (рисунок 12). Диаметр заготовки  $D_{\text{заг}}$  определяется из справочных данных для детали заданных геометрических размеров ( $d, s$ ). Первая заготовка вытягивалась с диаметром заведомо меньше  $D_{\text{заг}}$ :  $D_1 = D_{\text{заг}} - 4\text{мм}$ . Снимались показания усилия вытяжки  $P_1$ . Далее вытягивают заготовки с диаметрами  $D_2 = D_1 + 2\text{мм}$  и  $D_3 = D_{\text{заг}} + 4\text{мм}$ . Снимают показания максимальных усилий вытяжки  $P_2$  и  $P_3$ . При вытяжке заготовки с диаметром  $D_3$  произойдет обрыв дна в опасном сечении при достижении максимального усилия процесса (т.к.  $\sigma_{\rho \text{max}} > \sigma_{\text{алл}}$ ). Т.к. разница между рассматриваемыми точками не велика, то можно считать, что на этих участках изменение усилия происходит по линейному закону и точки 1, 2 соединяют прямой. Поскольку точка 3 соответствует максимальному значению усилия, то линия параллельная оси абсцисс будет ограничивать область значений  $P_{\text{выт}}$ . Точка пересечений этих линий 4 имеет проекцию на оси абсцисс, соответствующую значению предельного коэффициента вытяжки. То есть это момент, когда усилие вытяжки достигает максимального значения и процесс вытяжки происходит без дефекта (обрыва).

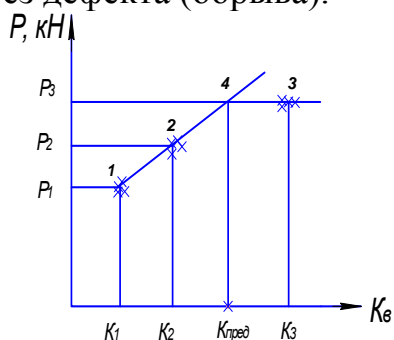


Рисунок 12 – Определение предельного коэффициента вытяжки

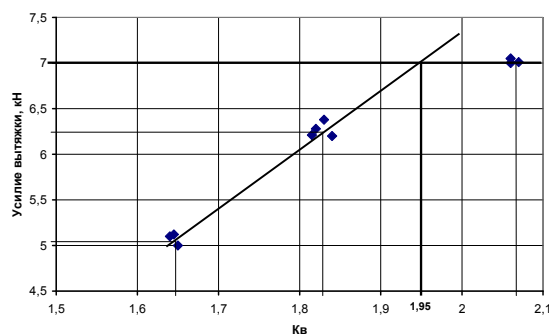


Рисунок 13- Предельный коэффициент вытяжки (материал АД0),  $S=0,27\text{мм}$ ;  $f_{mp}=0,1$ ;  $r_m=r_n=3\text{мм}$ ,  $P_{\text{выт}}=7\text{кН}$ ,  $K_{\text{в пред}}=1,95$

Из графика (рисунок 13) видно что, использование упругого прижима для относительно тонкостенных заготовок с  $S/D 100\%=0,5-0,2$  позволяет использовать коэффициенты вытяжки на 20% больше рекомендуемых значений. А это равносильно коэффициентам вытяжки для более толстых заготовок  $S/D 100\%=1,5-1,0$ .

Эксперименты по прогибу прижимного показали, что теоретические значения прогиба прижима входят в доверительный интервал ( $\pm 0,02$  мм), в котором находятся значения экспериментальных замеров. Прижим при заданной высоте после снятия нагрузки не имеет остаточных деформаций.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Исследован процесс глубокой вытяжки тонкостенных осесимметричных деталей в штампе с упругим прижимом позволяющий увеличить коэффициент вытяжки на 15-20%.
2. Выявлена особенность механизма вытяжки тонколистовых заготовок, заключающаяся в возникновении дополнительных растягивающих напряжений, которые являются причинами понижения величин коэффициентов вытяжки с уменьшением относительной толщины заготовки.
3. Определены дополнительные растягивающие напряжения  $\Delta\sigma$ , возникающие при использовании жесткого прижима. Их значения составляют 10-13% от предела прочности материала заготовки.
4. Показано, что использование упругого прижима снижает усилие прижима, необходимого для ликвидации гофрообразования в 2-3 раза.
5. Разработана методика проектирования относительно тонкостенных осесимметричных деталей с использованием процесса глубокой вытяжки в штампе с упругим прижимом.
6. Изготовленная опытно-промышленная партия изделий показала перспективность технологического процесса и рекомендована к внедрению в производство.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

В ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией:

1. Попов, И.П. Особенности вытяжки тонколистового материала в штампе с упругим элементом [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко // Заготовительные производства в машиностроении. - 2005. - №6 - С. 37-40.

2. Попов, И.П. Вытяжка тонколистового материала [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко // Кузнечно-штамповое производство. - 2006. - №10 - С.30-33.

и других изданиях:

1. Попов, И.П. Вытяжка с применением упругого прижима [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко, И.Г. Голикова // Тезисы докладов 50-й студенческой научно-технической конференции. - Самара, 2000. - С.36-37.

2. Попов, И.П. Устранение гофрообразования на фланце при вытяжке тонколистового материала с помощью применения упругих свойств штамповой оснастки [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко, И.Г. Голикова // Материалы и технологии XXI Века, сборник материалов всероссийской научно-технической конференции. - Пенза, 2001. - С.81-84.

3. Попов, И.П. Использование упругих свойств штамповой оснастки [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко, И.Г. Голикова // Сборник тезисов докладов IX Всероссийских Туполевских чтений студентов научно-технической конференции. - Казань, 2000. - Т.1. - С.20.

4. Попов, И.П. Преимущества использования упругого прижима при вытяжке тонкостенных осесимметричных заготовок в сравнении с традиционным способом вытяжки [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко, И.Г. Голикова // Технология и оборудование современного машиностроения, сборник тезисов доклада всероссийской молодежной научно-технической конференции. - Уфа, 2000. - С.47.

5. Попов, И.П. Вытяжка тонкостенных осесимметричных заготовок с применением упругого прижима и ее преимущества [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко, И.Г. Голикова // Решетневские чтения, тезисы докладов IV всероссийской научно-практической конференции. - Красноярск, 2000. - С.106-107.

6. Попов, И.П. Вытяжка с применением упругого прижима [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко, И.Г. Голикова // Новые направления развития производства и потребления алюминия и его сплавов. Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 40-летию Самарского металлургического завода. - Самара, 2000. - С.318-325.

7. Попов, И.П. Штамп для вытяжки тонкостенного листового материала с использованием упругих свойств прижима [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко // Тезисы докладов международной молодежной научной конференции «XXVII Гагаринские чтения», М., 2001. - Т.1. - С.94-95.

8. Попов, И.П. Вытяжка тонкостенного листового материала с применением упругого прижима [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко // Материалы III-ей Уральской школы - семинара металлургов - молодых ученых. Всероссийская научно-практическая конференция, Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2001. - С.46.

9. Попов, И.П. Вытяжка тонкостенного листового материала [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко, И.Г. Голикова // Тезисы докладов всероссийской молодежной научной конференции «VI Королевские чтения». - Самара, 2001. - Т.1. - С.195-196.

10. Попов, И.П. Определение технологических параметров упругого прижима [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко // Материалы Второй Международной научно-технической конференции Металлдеформ. - Самара, 2004. - С.27.

11. Попов, И.П. Ликвидация потери устойчивости фланца заготовки при вытяжке тонколистового материала в штампе с упругим прижимом [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко // Всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «VIII Королевские чтения», Сборник трудов. - Самара, СГАУ, 2005. - С.217.

12. Попов, И.П. Штамп для глубокой вытяжки [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением. Сборник тезисов международной научно-технической

конференции, БГТУ «Военмех», Санкт-Петербург. - Изд-во «ИВА», 2005. - С.221-224.

13. Попов, И.П. Применение упругого прижима в штампе для осесимметричной вытяжки тонколистового материала [Текст] / И.П. Попов, Е.С. Нестеренко // Материалы IX Международной научной конференции «Решетневские чтения». - Красноярск, 2005. - С.187.

14. Нестеренко, Е.С. Моделирование процесса глубокой вытяжки тонколистового материала в программе ANSYS [Текст] / Е.С. Нестеренко, Е.В. Шабатина // Материалы XIV Международной научной конференции «Туполевские чтения». - Казань, 2006. - Т.1. - С.101-102.

Подписано в печать \_\_\_\_\_  
Тираж 100 экземпляров  
Отпечатано с готового оригинала-макета  
443086 Самара, Московское шоссе, 34