

*На правах рукописи*

**ДЕМЬЯНЕНКО ЕЛЕНА ГЕННАДЬЕВНА**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОВКИ  
ТОНКОСТЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ  
КОНИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК**

Специальность 05.03.05 - Технологии и машины обработки давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Самара 2009**

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ) на кафедре обработки металлов давлением

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Попов Игорь Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Моисеев Виктор Кузьмич

кандидат технических наук  
Щуровский Денис Васильевич

Ведущая организация - Федеральное государственное унитарное  
предприятие «Государственный научно-  
производственный ракетно-космический  
центр «ЦСКБ-Прогресс» (г. Самара)

Защита состоится «4» декабря 2009 г. в 10.00 час. на заседании  
диссертационного совета Д 212.215.03 при ГОУ ВПО «Самарский  
государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.  
Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени  
академика С.П. Королева»

Автореферат разослан «30» октября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук

Ю.С. Ключков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современные тенденции развития различных отраслей промышленности стимулируют разработку высокоэффективных и конкурентоспособных видов техники и технологий, обеспечивающих жесткие требования к качеству и эксплуатационным свойствам изделий при экономии материальных и энергетических ресурсов, трудовых затрат, снижении себестоимости производства, что актуально для машиностроения.

Типовыми изделиями ракетно-космической и авиационной индустрии являются оболочки из листовых заготовок (обшивки отсеков, обтекатели, топливные баки различных форм и размеров, баллоны хранения газов, сопловые оболочки, оболочки камер сгорания двигателей и др.). Они представляют собой тонкостенные осесимметричные детали усеченной сужающейся формы и являются трудоемкими в обработке. К ним предъявляются высокие конструкторские требования, определяющие технологическую возможность изготовления детали: геометрическая точность, качество поверхности, механические свойства, равномерная толщина, надежность в эксплуатации.

Задача технолога состоит в том, чтобы спроектировать технологический процесс с минимальным числом переходов, высоким коэффициентом использования материала, точными геометрическими параметрами. Кроме того, полученная деталь должна удовлетворять заданным эксплуатационным характеристикам. При достижении этого результата важно учитывать разнотолщинность получаемых деталей в листовой штамповке. Известно, например, что разнотолщинность многократной вытяжки составляет 50-100%. Это является одной из основных причин уменьшения степени формообразования на последующих операциях штамповки, снижения коэффициента использования материала, т.к. не всегда полученный характер изменения толщины, ее величина на штампованной детали соответствует требуемым характеристикам. Во избежание этого исходную толщину заготовки выбирают завышенной на определенную величину разнотолщинности. Для деталей авиационной техники, подвергающихся механической обработке, возрастает трудоемкость изготовления и затраты материала из-за увеличения количества металла, снимаемого в стружку. Поэтому с технической и экономической точек зрения очень важно проектировать технологический процесс так, чтобы он направленно изменял толщину заготовки. Наиболее эффективны при таком подходе способы формовки из тонкостенных конических заготовок. Однако им присущ ряд недостатков, как в конструктивном плане, так и вследствие отсутствия методик проектирования.

Разработка и внедрение ресурсосберегающих, научно обоснованных технологий должны быть направлены на уменьшение расхода материала, что является одним из радикальных путей снижения себестоимости деталей и трудоемкости изготовления при обеспечении показателей качества. Таким образом, разработка методик проектирования новых способов формовки из конических заготовок, совершенствование устройств для формообразования, которые повышают качество детали за счет равномерности толщины стенки, точности профиля и механических свойств, является актуальной.

**Целью работы** является разработка методики проектирования процесса формовки тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы с равномерной толщиной стенки из конических заготовок.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи исследований**:

1. Выявить механизм и провести анализ напряженно-деформированного состояния процесса формовки из конических заготовок.
2. Выявить область применения способа формовки из конических заготовок.
3. Усовершенствовать штамповую оснастку для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей (выпуклой, вогнутой) формы способом формовки с использованием эластичного элемента.
4. Установить основные параметры, влияющие на разнотолщинность детали.
5. Разработать математическую модель процесса формовки из конических заготовок и установить значения технологических параметров для получения равномерной толщины тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы.
6. Провести экспериментальные исследования процесса с целью подтверждения достоверности результатов анализа.

**Методы исследований.** Теоретические исследования базировались на основных положениях и допущениях теории пластического деформирования листовых материалов, вычислительной математике. В анализе напряженно-деформированного состояния процесса формовки для подтверждения допущения о плоско-деформированном состоянии был смоделирован процесс формовки деталей, относящихся к классу тонкостенных, с использованием программного продукта ANSYS.

Экспериментальные исследования проводили в лабораторных условиях с применением методов математической обработки результатов эксперимента на универсальной испытательной машине ЦДМПУ-30 и на растяжной машине Testometric FS-150 AX.

**Автор защищает.**

1. Методику проектирования технологического процесса, основанную на способе формовки конических заготовок, обеспечивающую снижение трудоемкости, сокращение расхода штампуемого металла при изготовлении.
2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе формоизменения, основанные на минимизации выражения функционала между заданной равномерной толщиной и технологически возможной, по параметрам процесса формовки.
3. Расчетные предельные параметры формоизменения в зависимости от механических свойств деформируемого материала и параметров процесса формовки.
4. Конструкцию устройства, позволяющего интенсифицировать процесс формовки конических заготовок.
5. Результаты экспериментальных исследований по получению деталей с равномерной толщиной стенки.

**Научная новизна.**

1. Выявлены особенности процесса формоизменения конических заготовок при изготовлении тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы способом формовки.
2. Разработана математическая модель процесса формовки тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы из конических заготовок.

3. Установлены предельные параметры и границы применимости процесса формовки с использованием эластичного элемента и без него для выпуклых и вогнутых деталей.
4. Разработана методика проектирования технологического процесса формообразования тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы способом формовки.

**Достоверность результатов** исследований, научных положений, выводов базируются на четких физических представлениях процессов формообразования различных конструкционных материалов; корректностью использования математического аппарата, программного продукта ANSYS; применением аналитических методов решения задач; современными методами проведения опытов и обработки экспериментальных данных; сходимостью теоретических и экспериментальных данных, полученных автором.

**Практическая ценность.**

1. Механизм процесса формообразования и основных параметров, влияющих на разнотолщинность изделия с дальнейшей оценкой возможности применения усовершенствованного способа формовки тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы.
2. Конструкция штамповой оснастки нового способа формовки из конических заготовок.
3. Технологический процесс получения тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы с равномерным распределением толщины вдоль образующей.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты данных исследований рекомендованы в виде руководяще-технических материалов в производство на предприятии ООО «Моторостроитель» (г. Самара). На основе разработанной методики приведен расчет реальной детали с заданными геометрическими параметрами для нового варианта ее изготовления на предприятии ОАО «РОСТВЕРТОЛ» (г. Ростов-на-Дону).

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на международной молодежной научной конференции, посвященной 1000-летию города Казани, Туполевские чтения (Казань: КГТУ, 2005); XV Туполевские чтения (Казань: КГТУ, 2007); IX Королевские чтения: всероссийская молодежная научная конференция с международным участием (Самара: СГАУ, 2007); Мавлютовские чтения: всероссийская молодежная научная конференция, посвященная 75-летию УГАТУ (Уфа: УГАТУ, 2007); XVI Туполевские чтения: международная молодежная научная конференция (Казань: КГТУ, 2008); всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов «Актуальные проблемы авиации и космонавтики» (Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2008); Решетневские чтения: XII международная научная конференция (Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т., 2008).

**Публикации.** Материалы, отражающие основное содержание диссертации опубликованы в 12 работах, в том числе в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией 3 статьи; 2 патента.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из основных условных обозначений, введения, четырех глав, списка использованных источников и

приложения. Работа изложена на 152 страницах машинописного текста, включая 79 рисунков, 28 таблиц, библиографию из 102 наименований и приложение.

Автор выражает благодарность коллективу кафедры обработки металлов давлением за содействие, а так же заведующему кафедрой ОМД, чл.-корр. РАН, доктору технических наук, профессору Ф.В. Гречникову и научному руководителю, доктору технических наук, профессору И.П. Попову за практическую помощь при выполнении работы, ценные замечания и рекомендации.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи исследования, научная новизна, практическая ценность и основные результаты работы.

**В первой главе** отмечено, что экономичное и высокоэффективное производство качественных тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы является одной из важнейших проблем современной индустрии. Анализ показал, что в различных конструкциях, особенно в авиационной и ракетно-космической технике, нашли применение такие детали со следующими геометрическими характеристиками:

$$\frac{S_{\text{заг}}}{D} \langle 0,008; 0,5 \langle \frac{H}{D} \leq 0,7; \frac{D}{d} = 1,7 \div 2,2,$$

где  $D$  - диаметр большего основания детали;  $d$  - диаметр меньшего основания детали;  $S_{\text{заг}}$  - толщина заготовки;  $H$  - высота детали.

Для них составлен классификатор.

В связи с предъявляемыми к подобным деталям высокими требованиями по точности геометрической формы (диаметральным размерам, толщине стенки), качеству поверхности и механическим свойствам, связанными с обеспечением надежности эксплуатации в условиях агрессивной среды, высоких температур и давлений, возникает необходимость совершенствования методов их изготовления. Удовлетворить требованиям, возможно, если выполнить условие:

$$\iint_F (S_T - S_{\text{зад}})^2 dF \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $S_{\text{зад}}$  - заданная толщина детали;  $S_T$  - технологически возможная толщина, которая получается после формообразования заготовки;  $F$  - площадь детали по срединной поверхности.

Функционал требует приближения технологически возможной толщины  $S_T$  к заданной толщине детали  $S_{\text{зад}}$  при условии минимального отклонения как со стороны положительной, так и отрицательной разницы между двумя функциями толщин по всей поверхности детали.

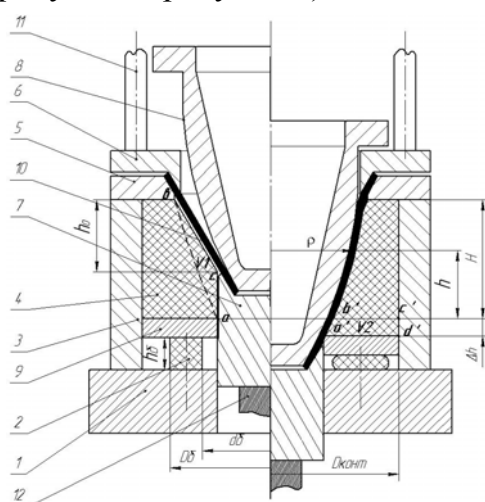
В первую очередь, условие можно выполнить, подобрав способ формообразования с соответствующей схемой напряженно-деформированного состояния, обеспечивающий надежность и устойчивость процесса.

Во вторую очередь, направленно изменять толщину заготовки, приближая ее к заданной, возможно путем использования технологических параметров процесса: исходными размерами заготовки, трением, геометрией инструмента, анизотропией трансверсально-изотропного тела, граничными условиями.

Рассмотрены возможные технологии и способы изготовления тонкостенных осесимметричных деталей. Проведенный анализ позволил сделать вывод: для получения деталей такого вида используется множество способов, но многие из них требуют либо уникального оборудования и оснастки (штамповка взрывом, электрогидроштамповка и др.), либо не обеспечивают заданной геометрической точности штампованной детали, в том числе и по толщине, либо не обеспечивают устойчивость процесса для тонкостенных заготовок. Для устранения указанных недостатков было предложено новое устройство для формообразования тонкостенных осесимметричных деталей (Пат. 58055 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> B21D22/30), реализующее способ формовки из тонкостенных конических заготовок. Однако для него отсутствует методика проектирования, и имеются конструктивные несовершенства.

Аналитический обзор научно-технической и патентной литературы позволил сформулировать цель и выделить задачи, подлежащие решению.

Во второй главе приведены основные допущения, уравнения для решения поставленных задач и результаты анализа процесса формовки, реализованного в усовершенствованном устройстве (Пат. 78709 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> B21D20/30. Устройство для формообразования тонкостенных усеченных сужающихся оболочек). Оно обладает большими возможностями и более простым механизмом формообразования тонкостенных осесимметричных деталей, которое может быть использовано при изготовлении изделий различных габаритов (см. рисунок 1, рисунок 2).



1 - плита штампа; 2 - эластичный буфер; 3 - контейнер; 4 - эластичный элемент; 5 - матрица; 6 - прижим; 7 - выталкиватель; 8 - пуансон; 9 - подкладная плита; 10 - заготовка; 11 - шпилька прижимного устройства; 12 - шпилька буферного устройства

Рисунок 1 - Схема устройства для формообразования выпуклых тонкостенных деталей

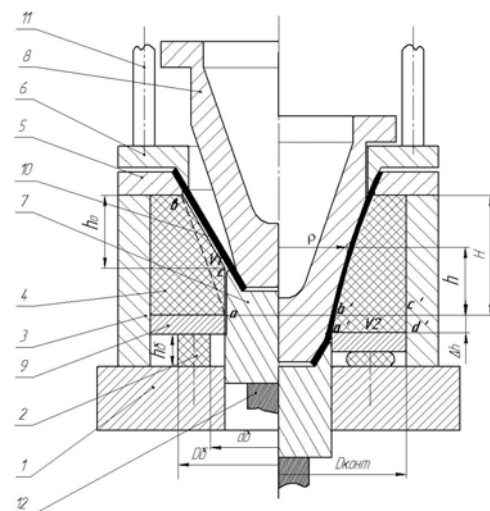


Рисунок 2 - Схема устройства для формообразования вогнутых тонкостенных деталей

Устройство, содержащее пуансон 8, контейнер 3, прижим 6, выталкиватель 7, матрицу 5, согласно модели, снабжено плитой штампа 1, на которую установлен контейнер 3, внутри него на плите штампа расположен эластичный элемент 4, размещенный на подкладной плите. Давление эластичным элементом создается с помощью подкладной плиты, усилие подпора которой определяется с помощью буферного устройства. Эластичный элемент выполнен в виде кольца прямоугольного

сечения высотой  $H$ , которая больше на 5-10% рабочей части поверхности пуансона, со срезанной со стороны пуансона частью в виде конического сечения с углом конусности равным углу конусности заготовки. Большой диаметр эластичного элемента равен внутреннему диаметру матрицы, а меньший диаметр равен диаметру выталкивателя. Заготовка, в виде усечённого конуса устанавливается наружными поверхностями, прилегающими к торцу большего основания, на матрицу 5, а прилегающие к торцу меньшего основания, на выталкиватель 7. Затем заготовка зажимается по внутренним поверхностям к матрице 5 прижимом 6, а к выталкивателю 7 пуансоном 8. Инструмент, где происходит зажим заготовки, выполнен с рабочими поверхностями, имеющими конусность, совпадающей с конусностью заготовки. Такая геометрия позволяет надёжно закрепить заготовку до момента пластического деформирования. Пуансон перемещается вниз, вытесняя часть объема эластичного элемента  $V_1 = V_2$ , который перемещает подкладную плиту 9 вниз. Давление, которое создается внутри эластичного элемента, определяется усилием подпора буферного устройства пресса. Происходит пластическая деформация заготовки в условиях плоского растяжения. Процесс пластического формообразования производится до полного прилегания заготовки по всей поверхности пуансона, формирующей размеры готовой детали, и ограничен величиной утонения заготовки в зоне опасного сечения наименьшего диаметра. На поверхности контакта эластичного элемента и заготовки действуют реактивные силы трения, так как перемещение эластичного элемента отстает от заготовки. На поверхности контакта пуансона и заготовки действуют активные силы трения, которые перераспределяют напряжения в меридиональном направлении  $\sigma_\rho$ , уменьшая их в зоне наименьшего диаметра и увеличивая в зоне наибольшего диаметра. Создав их преобладающее влияние, возможно, получить минимальную разнотолщинность. Аналитически это условие может быть представлено как:

$$\int_l (S_T - S_{зад})^2 dl \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $l$  - длина образующей детали.

Выражение (2) является функционалом. Его выполнение дает возможность увеличить КИМ, уменьшить трудоемкость и повысить эксплуатационные характеристики детали. Заданная толщина может быть установлена исходя из технологических или эксплуатационных (конструкторских) требований. К технологическим требованиям относятся: увеличение степени деформирования, коэффициента использования металла, снижение фестонистости и.т.п. Заданная толщина для нашего случая:  $S_{зад} = S_{дет} = const$ .

В анализе напряженно-деформированного состояния введены допущения:

- О плоско-деформированном состоянии: ( $\sigma_\theta = \mu \sigma_\rho$ ). Для подтверждения данного допущения был смоделирован процесс формовки деталей, относящихся к классу тонкостенных с использованием программного продукта ANSYS. Условие плоско-деформированного состояния в случае получения равномерной толщины было проверено для деталей разных форм и предельных случаев формовки.
- Упрочнение металла представляется в виде линейной функции:

$$\sigma_s = \sigma_{TO} + \Pi e_i, \quad (3)$$

где  $e_i$  - интенсивность деформаций на рассматриваемом интервале деформирования;  $\Pi$  - модуль упрочнения;  $\sigma_s$  - напряжение текучести;  $\sigma_{TO}$  -



экстраполированный предел текучести. Значения констант упрочнения линейной зависимости определяют относительно экспериментальных данных, либо относительно широко распространенной аналитической зависимости кривой упрочнения степенного вида.

- О создаваемом давлении. Согласно приведенной схеме (см. рисунок 1, рисунок 2), давление создаваемое эластичным элементом будем считать, как и в уравнении Лапласа, выраженным через параметры  $\sigma_\rho$  и  $S_T$ . Наиболее просто такую зависимость можно представить в виде функции:

$$q = k\sigma_\rho S_T, \quad (4)$$

где  $k$  - коэффициент пропорциональности сжатия эластичного элемента;  $\sigma_\rho$  - напряжения в меридиональном направлении.

- Традиционные допущения:

- материал считаем трансверсально-изотропным телом;
- трение учитывается по закону Кулона.

При решении инженерным методом, уравнение равновесия в полярной системе координат для случая формообразования заготовки, в заключительной стадии процесса с использованием эластичного элемента примет вид:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{f\rho}{\sin \alpha} \left( \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{q \left( 1 - \frac{f_1}{f} \right)}{S_T} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0, \quad (5)$$

где  $q$  - давление, создаваемое эластичным элементом;  $R_\rho$  - радиус детали в меридиональном направлении;  $R_\theta$  - радиус детали в тангенциальном направлении;  $\mu$  - коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела;  $\sigma_\rho$  - напряжения в меридиональном направлении;  $\sigma_\theta$  - напряжения в тангенциальном направлении;  $f_1$  - коэффициент трения между поверхностями заготовки и эластичным элементом;  $f$  - коэффициент трения между поверхностями инструмента и заготовки;  $\alpha$  - угол наклона к касательной, проведенной к рассматриваемому элементу образующей с координатой  $\rho$ .

Отличается представленное уравнение от известного тем, что на поверхности заготовки действуют силы трения во взаимно-противоположных направлениях: на внутренней поверхности контакта заготовки и пуансона - активные силы, на наружной поверхности контакта заготовки с эластичным элементом - реактивные

силы. Используя уравнение (5), условие пластичности  $\sigma_\rho = \frac{\sigma_s}{\sqrt{1-\mu^2}}$ , запись кривой

упрочнения в виде:  $\sigma_s = \sigma_{TO} + \Pi \frac{S_{zag} - S_T}{S_{zag}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2}}$  и соотношение:  $\sigma_\theta = \mu\sigma_\rho$ ,

получено решение по напряжениям и по толщине:

$$\sigma_{\rho} \approx \sigma_{\rho}^* \frac{1+B \left( k \left( 1 - \frac{f_1}{f} \right) \pm 1 \right) x}{1+Ax}, S_T = S_{\text{заг}} \left[ \frac{\sigma_{TO} \sqrt{1-\mu^2}}{\Pi} + 1 - \frac{\sigma_{\rho}^* (1-\mu^2)}{\Pi} \right] \frac{1+B \left( k \left( 1 - \frac{f_1}{f} \right) \pm 1 \right) x}{1+Ax},$$

где  $A=1-\mu-f\mu \cdot \text{ctg} \alpha$ ,  $B=\frac{r \cdot f}{\sin \alpha}$ ,  $\alpha = \text{arctg} \left( \frac{R-r}{h_{\text{дем}}} \right)$ ,  $x = \left( \frac{\rho'}{r'} - 1 \right)$ ,  $r' = \frac{r}{R_{\rho}}$ ,

$\rho' = \frac{\rho}{R_{\rho}}$ ;  $r$  - радиус меньшего основания детали;  $R$  - радиус большего основания

детали;  $h_{\text{дем}}$  - высота полученной детали;  $\sigma_{\rho}^*$  - значение напряжения в меридиональном направлении, взятые из граничного условия при  $\rho=r$ ;

$\pm$  - знаки, определяющие форму детали:  $+$  - выпуклая форма;  $-$  - вогнутая форма.

Минимизация функционала (2) по коэффициенту пропорциональности сжатия эластичного элемента  $k$  и границ интегрирования  $0 \leq x \leq 1$  имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial k} \int_0^1 \left\{ S_{\text{заг}} \left[ \frac{\sigma_{TO} \sqrt{1-\mu^2}}{\Pi} + 1 - b - \frac{\sigma_{\rho}^* (1-\mu^2)}{\Pi} \right] \frac{1+B \left( k \left( 1 - \frac{f_1}{f} \right) \pm 1 \right) x}{1+Ax} \right\}^2 dx = 0,$$

где  $b$  - коэффициент утонения материала:  $b = S_{\text{дем}} / S_{\text{заг}}$ .

$$k = \frac{(1-\mu-f\mu \cdot \text{ctg} \alpha) \sin \alpha \pm r' f}{r' \cdot R_{\rho}} \cdot \frac{1}{f-f_1}. \quad (6)$$

Рассмотрены границы применимости способа формовки с учетом использования эластичного элемента и без него; построены оценочные зависимости (графики) давления, создаваемого эластичным элементом  $q$ , от коэффициента анизотропии трансверсально-изотропного тела  $\mu$  при реальных значениях коэффициентов трения, для разных материалов и форм деталей. Условием отсутствия давления, создаваемого эластичным элементом, является равенство  $k=0$ . В этом случае за параметр, обеспечивающий минимизацию функции, принят коэффициент трения и получено решение:

$$f = \frac{(1-\mu) \left( \mu \cdot \text{ctg} \alpha - \frac{r'}{\sin \alpha} \right)}{(\mu \cdot \text{ctg} \alpha)^2 + \left( \frac{r'}{\sin \alpha} \right)^2}. \quad (7)$$

Получены зависимости, определяющие усилие процесса формовки, усилие прижима и предельные параметры.

**В третьей главе** приведены данные экспериментальных исследований; изложены результаты сопоставления этих данных с теоретическими расчетами.

Эксперименты проводились в лабораторных условиях на машине ЦДМПУ-30 с оснасткой для моделирования процесса формовки. Для определения величины деформации по толщине применялась мерительная скоба с индикатором часового типа с ценой деления шкалы индикатора - 0,01 мм. Для замера и нанесения линейных размеров использовался штангенциркуль и штангенрейсмус с ценой деления 0,05 мм. Обработка результатов проводилась с применением методов математической статистики. Для качественной проверки полученных результатов использовали разнообразные по механическим свойствам материалы: МЗ, АД1, 12Х18Н10Т. Механические свойства материалов определялись испытаниями на растяжной машине Testometric FS-150 АХ по ГОСТ 7855-55 и ГОСТу 1497-61. По заданным размерам детали и ее форме вычислялась необходимая степень деформации по толщине стенки. Размеры исходной заготовки для формовки определялись в зависимости от формы и размеров готовой детали. Размеры заготовки по меньшему диаметру  $d_z$  и большему диаметру  $D_z$  находились с учетом припуска под зажимы.

В первую очередь определялся угол конусности исходной заготовки. Для выпуклой детали он равен углу наклона, образованного касательной, проведенной к кромке детали у меньшего основания. Для детали вогнутой формы угол конусности определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{заг}} = \frac{(R-r)}{h_{\text{дем}}} . \quad (8)$$

Сама же толщина заготовки вычислялась из условия постоянства объема заготовки и детали. Для выпуклой детали она равна:

$$S_{\text{заг}} = \frac{F_{\text{дем}} S_{\text{дем}}}{F_{\text{заг}}} , \quad (9)$$

где  $F_{\text{заг}}$  - площадь заготовки без учета припусков под зажимы;  $F_{\text{дем}}$  - площадь детали по срединной поверхности, равная (см. рисунок 3):

$$F_{\text{дем}} = 2\pi R_{\rho} [R_{\rho} (\sin \alpha_0 - \sin \alpha_{\kappa}) - a \cdot (\alpha_0 - \alpha_{\kappa})] , \quad (10)$$

где  $\alpha_0$  - угол, образованный радиусом  $R_{\rho}$ , проведенным к кромке детали меньшего основания и осью, проведенной из центра радиуса  $R_{\rho}$  и перпендикулярной оси симметрии детали;  $\alpha_{\kappa}$  - угол, образованный радиусом  $R_{\rho}$ , проведенным к кромке детали большего основания и осью, проведенной из центра радиуса  $R_{\rho}$  и перпендикулярной оси симметрии детали;  $a$  - расстояние от центра радиуса  $R_{\rho}$  до оси симметрии.

Для вогнутой детали:

$$S_{\text{заг}} = \frac{F_{\text{нф}} S_{\text{дем}}}{F_{\text{заг}}} , F_{\text{нф}} = F_{\text{дем}} + F_{\text{ц.ч}} , \quad (11)$$

где  $F_{\text{нф}}$  - площадь поверхности детали с учетом цилиндрического припуска необходимого для формовки в условиях плоско-деформированного состояния;  $F_{\text{ц.ч}}$  - площадь цилиндрической части, равная:

$$F_{\text{ц.ч}} = 2\pi R \cdot \Delta h . \quad (12)$$

Цилиндрический участок необходим, чтобы соблюдалось условие плоско-деформированного состояния во избежании гофрообразования заготовки. Эти

условия выполняются, если часть объема заготовки перейдет в цилиндрическую часть, являющейся технологическим припуском.

Площадь вогнутой детали равна (см. рисунок 4):

$$F_{дет} = 2\pi \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} [r + R_p (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)] R_p d\alpha = 2\pi R_p [\alpha_{дет} r + R_p \cos \alpha_1 \cdot \alpha_{дет} - R_p (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)] \quad (13)$$

где  $\alpha_1$  - угол, образованный кромкой детали меньшего основания и осью проведенной из центра радиуса  $R_p$  и перпендикулярной оси симметрии детали;  $\alpha_2$  - угол, образованный кромкой детали большего основания и осью проведенной из центра радиуса  $R_p$  и перпендикулярной оси симметрии детали;  $\alpha_{дет}$  - угол, образованный кромкой детали меньшего и большего основания:  $\alpha_{дет} = \alpha_2 - \alpha_1$ .

Площадь заготовки для рассматриваемых форм деталей определялась (см. рисунок 3, рисунок 4):

$$F_{заг} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4 \sin \alpha_{заг}} \quad (14)$$

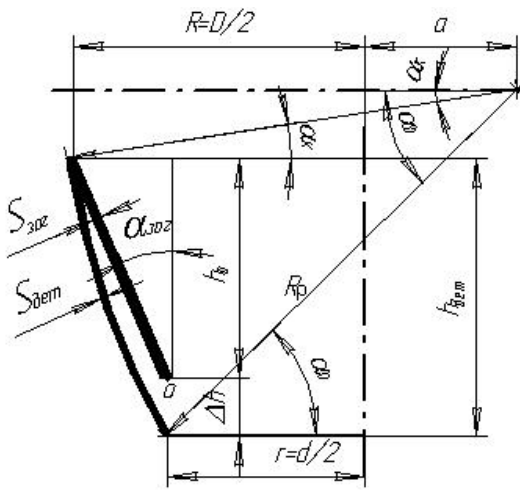


Рисунок 3 – Геометрическая схема для определения перемещения пуансона при формовке выпуклой детали

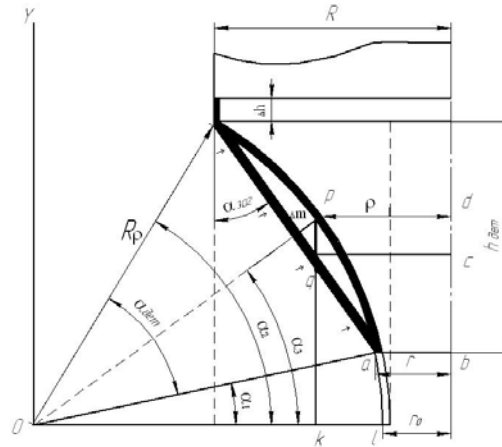


Рисунок 4 – Геометрическая схема для определения перемещения пуансона при формовке вогнутой детали

Построив развертку, для получения детали заданных размеров, вычислялось перемещение пуансона. Для выпуклой детали (см. рисунок 3):

$$\Delta h = h_{дет} - h_0, \quad (15)$$

где  $\Delta h$  - перемещение пуансона;  $h_0$  - высота заготовки.

$$h_0 = \left( \frac{D}{2} - \frac{d}{2} \right) / \operatorname{tg} \alpha_{заг}, \quad h_{дет} = R_p (\sin \alpha_0 - \sin \alpha_k). \quad (16)$$

Для случая вогнутой детали (см. рисунок 4):

$$\Delta h = \frac{\frac{\pi(R^2 - r^2) 2\pi R_p [\alpha_{ап} r + R_p \cos \alpha_1 \cdot \alpha_{ап} - R_p (\sin \alpha_3 - \sin \alpha_1)] \sin \alpha_{заг}}{\sin \alpha_{заг}}}{\frac{\pi [(R_p (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_3) + r)^2 - r^2]}{2\pi R}} - \frac{2\pi R_p [\alpha_{дет} r + R_p \cos \alpha_1 \cdot \alpha_{дет} - R_p (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)]}{2\pi R}, \quad (17)$$

где из геометрических соотношений:  $\alpha_{ап} = \alpha_3 - \alpha_1$ .

Определены предельные параметры процесса формовки для случая всестороннего растяжения, используя критерий Томленова А.Д.:

$$\varepsilon_{S_{кр}} = -\frac{m+1}{2-m}n, \quad (18)$$

где  $n$  - показатель механических свойств материала;  
 $m$  - коэффициент, который вычисляется по формуле:

$$m = \frac{(1+R_L) \cdot R_L \cdot e_\theta + R_L^2 e_\rho}{(1+R_L) \cdot R_L \cdot e_\rho + R_L^2 e_\theta}, \quad (19)$$

где  $R_L$  - коэффициент Лэнкфорда, вычисляемый по формуле:

$$R_L = \frac{\mu}{(1-\mu)}. \quad (20)$$

Расчет давления, создаваемого эластичным элементом при формообразовании вогнутой детали проводился по формуле (4). Найденное значение давления можно создать, используя конструкцию штамповой оснастки, изображенной на рисунке 5. Величину этого давления определяет эластичный буфер 2, находящийся под подкладной плитой 9 (см. рисунок 5). В основу расчета положено равенство усилий эластичного элемента и эластичного буфера, действующих на подкладную плиту (с разных сторон).

$$\frac{\pi(D_{конт}^2 - d^2)}{4}q = \frac{\pi(D_\phi^2 - d_\phi^2)}{4}q_\phi, \quad (21)$$

где  $q, q_\phi$  - соответственно давления, создаваемые эластичным элементом и эластичным буфером;

$D_\phi = (0,75 - 0,8)D_{конт}$  - наружный диаметр эластичного буфера;

$d_\phi = d / (0,75 - 0,8)$  - внутренний диаметр эластичного буфера.

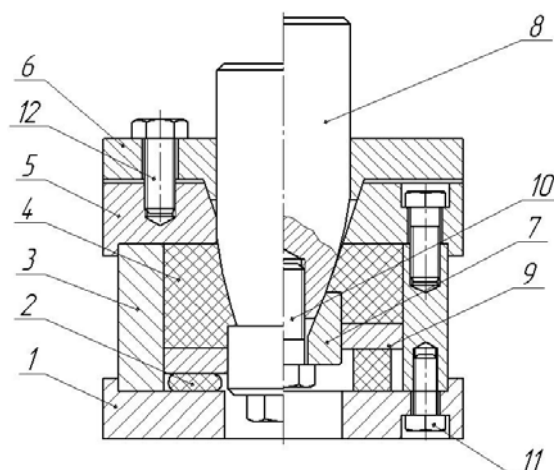
Величина перемещения подкладной плиты равна величине сжатия эластичного буфера 2. Зная необходимое давление, находят усилие, действующее на подкладную плиту. Высота эластичного буфера определялась при осаживании резинового кольца. По результатам эксперимента строилось линейное уравнение регрессии вида:  $q_\phi = f(\varepsilon)$ ,

где  $\varepsilon = \frac{\Delta h_\phi}{h_\phi}$ ;  $\Delta h_\phi$  - величина сжатия эластичного буфера;  $h_\phi$  - высота эластичного

буфера.

С целью проверки достоверности предложенной методики, была выполнена серия экспериментов: получены детали выпуклой и вогнутой формы, проведены замеры толщин. Оценка разнотолщинности (1-2%) позволяет характеризовать толщину стенки деталей как равномерную. В результате проведенных исследований отработана конструкция модельной штамповой оснастки, рассчитан на прочность контейнер, определено усилие процесса, дано обоснование использования разрезанной заготовки, согнутой в конус и без соединения вдоль образующей. Чтобы

выполнить условие  $\frac{S_{заг}}{D} < 0,008$ , абсолютная толщина заготовки не превышала 0,345 мм.



1 - плита штампа; 2 - эластичный буфер; 3 - контейнер; 4 - эластичный элемент; 5 - матрица; 6 - прижим; 7 - выталкиватель; 8 - пуансон; 9 - подкладная плита; 10 - болт; 11 - винт; 12 - болт

Рисунок 5 – Общий вид штампа

**В четвертой главе** приведена методика (последовательность выполняемых операций) проектирования процесса формовки тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы с равномерной толщиной стенки из конических заготовок; расчет реальной детали с заданными геометрическими параметрами и новым вариантом ее изготовления на предприятии ОАО «РОСТВЕРТОЛ»; рассчитана экономия расходуемого материала по весу при использовании операции формовки относительно базовой технологии предприятия ОАО «РОСТВЕРТОЛ», основанной на операции вытяжки. Экономия составила 25%.

Результаты данных исследований рекомендованы в виде руководяще-технических материалов в производство на предприятии ООО «Моторостроитель» (г. Самара).

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Из анализа научно-технической литературы следует, что одним из рациональных и производительных процессов изготовления тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы является процесс формовки из конических заготовок.

2. Разработана классификация тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы (при соотношении  $\frac{S_{заг}}{D} \in (0,008; 0,5$ ;  $0,5 \leq \frac{H}{D} \leq 0,7$ ;  $\frac{D}{d} = 1,7 \div 2,2$ ) на

основе конструктивно-геометрических и технологических признаков, позволяющих за одну операцию производить формообразование детали.

3. Установлено, что процесс формообразования происходит в условиях плоско-деформированного состояния.

4. Выявлены основные технологические параметры ( $f$ -коэффициент трения между поверхностями инструмента и заготовки;  $q$ -давление, создаваемое эластичным элементом;  $\mu$ -коэффициент анизотропии трансверсально-изотропного тела; относительные размеры заготовки), влияющие на разнотолщинность и установлены их значения для заданной толщины детали. При увеличении  $\mu$  при прочих равных

условиях давление, создаваемое эластичным элементом падает. При увеличении  $\alpha$  при прочих равных условиях давление, создаваемое эластичным элементом возрастает.

5. Разработана методика проектирования процесса формовки тонкостенных осесимметричных деталей усеченной сужающейся формы, позволяющая получать равномерные толщины стенки и механические свойства, за счет действия активных сил трения между пуансоном и заготовкой, которые перераспределяют напряжения в меридиональном направлении  $\sigma_\rho$ , уменьшая их в зоне наименьшего диаметра и увеличивая в зоне наибольшего диаметра.

6. Спроектирована штамповая оснастка для формообразования выпуклых и вогнутых тонкостенных осесимметричных усеченных сужающихся деталей, реализующая процесс формовки с равномерной толщиной стенки (Пат. 78709).

7. Установлены предельные параметры и границы формообразования для плоско-деформированного состояния, плоско-напряженного растяжения трансверсально-изотропного тела.

8. Доказано, что погрешность между теоретическими и экспериментальными значениями не превышает 15-18%.

9. Экономия расходуемого материала по весу с учетом предложенного раскроя при использовании операции формовки относительно базовой технологии предприятия ОАО «РОСТВЕРТОЛ», основанной на операции вытяжки, составила 25%.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ**

**в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией:**

1. Демьяненко, Е.Г. Исследование процесса формообразования цельноштампованных деталей по схеме отбортовка-формовка [Текст]/Е.Г. Демьяненко, И.П. Попов, А.Г. Шляпугин//Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. - № 1. – С. 138-145.

2. Попов, И.П. Штамп для изготовления тонкостенных сварных оболочек [Текст] / И.П. Попов, Е.Г. Демьяненко//Заготовительные производства в машиностроении. – 2006. - № 12. – С. 25-27.

3. Демьяненко, Е.Г. Анализ технологических процессов отбортовки-формовки в системе LS-DYNA [Текст]/Е.Г. Демьяненко, С.Ф. Глушенко, И.П. Попов//Вестник СГАУ. – Самара: СГАУ, - 2006. - № 2, часть 1. – С. 282- 286.

**в других изданиях:**

4. Пат. 58055 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup>B21D22/30. Устройство для формообразования оболочек сужающейся формы [Текст]/И.П. Попов, В.Д. Маслов, Е.Г. Демьяненко; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – 2006117037/22; заявл. 17.05.2006; опубл. 10.11.2006, Бюл. № 31.

5. Пат. 78709 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup>B21D20/30. Устройство для формообразования тонкостенных усеченных сужающихся оболочек [Текст]/Попов И.П., Демьяненко Е.Г., Десятниченко К.И.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Самарский аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева. – 2008112698; заявл. 02.04.2008; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34.

6. Демьяненко, Е.Г. Устройство для формовки выпуклых оболочек [Текст]/Е.Г. Демьяненко//Тез. док. Всероссийской науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов. Актуальные проблемы авиации и космонавтики/Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – 2008. – том 1. – С. 88-89.
7. Демьяненко, Е.Г. Основные допущения процесса формовки для получения тонкостенных деталей с постоянной толщиной стенки [Текст]/Е.Г. Демьяненко//Тез. док. XII Международной науч. конф. Решетневские чтения/Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – 2008. – С. 199-201.
8. Демьяненко, Е.Г. Устройство для формовки вогнутых оболочек [Текст]/Е.Г. Демьяненко//Тез. док. Международной молод. науч. конф. XVI Туполевские чтения/Казан. гос. техн. ун-т. – 2008. – том 1. – С. 61-63.
9. Демьяненко, Е.Г. Направленное изменение толщины конической оболочки [Текст]/Е.Г. Демьяненко//Тез. док. Международной молод. науч. конф. XV Туполевские чтения/Казан. гос. техн. ун-т. – 2007. – том 1. – С. 52-54.
10. Демьяненко, Е.Г. Возможности процесса вытяжки тонкостенных конических оболочек [Текст]/ Е.Г. Демьяненко//Тез. док. Всероссийской молод. науч. конф. с международным участием IX Королевские чтения/Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – 2007. – С. 178.
11. Демьяненко, Е.Г. Определение толщины заготовки при формовке детали конической формы [Текст]/ Е.Г. Демьяненко//Тез. док. Всероссийской молод. науч. конф., посвященная 75-летию УГАТУ. Мавлютовские чтения/Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – 2007. – том 2. – С.120-121.
12. Демьяненко, Е.Г. Влияние формообразования по схеме отбортовка - формовка на точность деталей оболочковых форм для авиационных двигателей [Текст]/Е.Г. Демьяненко//Тез. док. Международной молод. науч. конф. Туполевские чтения/Казан. гос. техн. ун-т. – 2005. – том 1. – С. 44-45.