

**Петрушина Марина Михайловна**

**РАЗРАБОТКА СОВМЕЩЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ВЫТЯЖКИ И ВСТРЕЧНОЙ ОТБОРТОВКИ**

**05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**



**Москва 2013**

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель — **Евсюков Сергей Александрович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные  
оппоненты: **Ковалев Виктор Григорьевич**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Технологии приборостроения»  
Московского государственного технического  
университета им. Н.Э. Баумана

**Лавриненко Владислав Юрьевич**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Машин и технологии обработки металлов  
давлением» Московского государственного  
индустриального университета

Ведущая организация - **ФГБОУ ВПО «Тульский государственный  
университет»**

Защита состоится «17 декабря 2013 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании  
диссертационного совета Д 212.141.04 в Московском государственном  
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:

105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул, д.5

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью  
направлять по указанному адресу

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан «17 декабря 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.141.04

кандидат технических наук, доцент

*Семенов В.И.*

Семенов В.И.



## **Актуальность темы**

Важнейшими задачами, стоящими перед современным машиностроением, является экономия материала, повышение качества изделий и производительности труда. Решение этих задач связано с разработкой и внедрением в производство высокопроизводительных, малоотходных технологических процессов изготовления деталей машин и агрегатов, обладающих необходимым набором эксплуатационных свойств. Ресурсосберегающее направление научно-технического прогресса является обоснованным не только с экономической, но и с экологической точки зрения. Большую роль в решении этих задач могут сыграть технологические процессы обработки металлов давлением.

В современной технике существует класс деталей, имеющих форму колец с двойными стенками, или U-образной образующей. К ним относятся, например, профильные кольца воздухоочистительных аппаратов, которые имеют аэродинамический профиль. Существующий способ изготовления подобных деталей методами обработки резанием характеризуется большим отходом металла, дальнейшее использование которого затруднительно. Значительной экономии металла при их изготовлении можно добиться за счет применения операций листовой штамповки. А совмещение операций вытяжки и отбортовки позволяет интенсифицировать процесс и получить деталь за один переход с минимальными отходами металла.

При применении совмещенного процесса вытяжки и отбортовки возможно преобладание одной из операций над другой, что приводит к разности высот наружной и внутренней стенок колец и в результате к увеличению расхода металла за счет дополнительной обрезки. Для более эффективного управления этим процессом необходимо выявить закономерности течения металла в совмещенном процессе и определить оптимальные соотношения коэффициентов вытяжки и отбортовки для получения требуемого соотношения высот стенок колец.

В современной технической литературе не уделено достаточного внимания процессам совмещения вытяжки и встречной отбортовки в одном переходе для получения деталей типа профильных колец, поэтому исследования в этой области являются актуальными и имеют практическое значение.

## **Цель работы**

Повышение эффективности изготовления колец с двойными стенками (или U-образной образующей) путем разработки совмещенного технологического процесса вытяжки и встречной отбортовки.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- разработать технологический процесс изготовления колец с двойными стенками методом совмещения процессов вытяжки и встречной отбортовки в одном технологическом переходе;

- исследовать закономерности формоизменения в совмещенном процессе «вытяжка – встречная отбортовка», определить границы применимости совмещенного процесса вытяжки – встречной отбортовки;
- установить зависимости для определения конечных размеров изделия от основных технологических факторов процесса (размеры заготовки, толщина листа, материал, наличие или отсутствие прижима);
- выполнить экспериментальную проверку основных теоретических положений путем физического эксперимента;
- разработать рекомендации по расчету и проектированию технологических процессов вытяжки – встречной отбортовки деталей как с симметричным, так и с аэродинамическим профилем и технологической оснастки для их осуществления.

### **Методы исследования**

Теоретические исследования операций совмещения вытяжки и встречной отбортовки листовых заготовок с отверстием выполнены с использованием основных положений механики деформируемого твердого тела и теории пластичности.

Анализ напряженного и деформированного состояний заготовки осуществлен аналитически инженерным методом и численно методом конечных элементов на ЭВМ с использованием специализированной программы AutoForm.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием испытательных машин и регистрирующей аппаратуры.

### **Автор защищает**

- выявленные границы применения совмещенного процесса вытяжки и встречной отбортовки;
- результаты экспериментальных исследований совмещенного процесса вытяжка – встречная отбортовка с использованием и без использования складкодержателя;
- разработанные рекомендации по проектированию технологических процессов совмещения вытяжки и встречной отбортовки, которые использованы при изготовлении номенклатуры профильных колец воздухоочистительного аппарата из стали 08кп.

### **Научную новизну составляют**

- выявленные закономерности влияния технологических параметров и геометрических размеров на характер деформирования и конечную форму изделия в совмещенном процессе вытяжки и встречной отбортовки;
- значения соотношений коэффициентов вытяжки и встречной отбортовки в совмещенном процессе, при которых процесс совмещения вытяжки и встречной отбортовки протекает стабильно (без перетяжки), а также зависимости для определения граничного радиуса процессов из условия равенства меридиональных напряжений и его смещения относительно геометрической границы процессов, при котором процесс не теряет стабильность;

- зависимости для определения конечных размеров изделия при различных соотношениях коэффициентов вытяжки и отбортовки;
- результаты моделирования совмещенного процесса вытяжки – встречной отбортовки в программном комплексе AutoForm.

**Достоверность** результатов подтверждается использованием современных методов исследования, включающих вычислительные эксперименты с применением метода конечных элементов в программном комплексе AutoForm, физическими экспериментами, выполненными на кафедре технологий обработки давлением (MT6) на гидравлических прессах ПД476 и INSTRON DX600 с привлечением современных экспериментальных средств (программно – измерительный комплекс Spider-8), качественным и количественным согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований.

### **Практическая значимость**

Разработаны рекомендации по расчету технологических параметров совмещенной операции вытяжки и встречной отбортовки листовых заготовок с отверстием, обеспечивающих интенсификацию технологических процессов, уменьшение трудоемкости и металлоемкости изготовления профильных колец с U-образной образующей.

### **Реализация работы**

Предложенные рекомендации по расчету технологических параметров операций совмещения вытяжки и встречной отбортовки листовых заготовок с отверстием использованы для разработки технологического процесса изготовления номенклатуры профильных колец воздухоочистительного аппарата. Технологический процесс изготовления номенклатуры профильных колец воздухоочистительного аппарата методами листовой штамповки обеспечивает сокращение трудоемкости изготовления деталей на 70% и общего веса аппарата на 25% по сравнению с используемой технологией изготовления колец методами обработки резания. При этом достигаются необходимые требования к изделию по геометрическим и механическим характеристикам.

### **Личный вклад состоит**

в выполнении математического моделирования совмещенного процесса вытяжки и встречной отбортовки для общего случая колец с двойными стенками и случая колец с двойными стенками с аэродинамическим профилем и определении закономерностей формоизменения в совмещенном процессе в зависимости от технологических параметров процесса;

в разработке методики проектирования совмещенного процесса вытяжки и встречной отбортовки на основе построенной регрессионной модели изменения высоты стенок;

в выполнении экспериментального исследования совмещенного процесса вытяжки и встречной отбортовки для колец с аэродинамическим профилем и сопоставлении результатов моделирования и экспериментального исследования;

в разработке производственного штампа для изготовления профильных колец с аэродинамическим профилем.

### **Апробация работы**

Результаты исследований доложены на Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна 2008: Машиностроительные технологии», посвященной 140-летию высшего технологического образования в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008), на III студенческой научно-инженерной выставке «ПОЛИТЕХНИКА» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008), на Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи (Москва: ВВЦ, 2009), на Третьей Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010), на X конгрессе «Кузнец-2010» (Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2010).

### **Публикации**

Основное содержание диссертационной работы изложено в 11 научных работах, в том числе трех изданиях, рекомендованных ВАК.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы из 108 источников. Текст диссертации содержит 163 машинописные страницы, включая 9 таблиц и 83 рисунка.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснованы актуальность темы диссертационной работы, ее научная новизна, практическая значимость и реализация работы, приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние теоретических и экспериментальных исследований операций вытяжки, отбортовки и их совмещения. Проведен анализ существующих технологических процессов изготовления осесимметричных деталей методами вытяжки, отбортовки листовых заготовок с отверстием и их совмещения в одном переходе. Обоснована постановка задач исследований.

Значительный вклад в исследование операций вытяжки и отбортовки внесли Е.А.Попов, С.И.Губкин, М.Е.Зубцов, А.А.Бугрова, А.Д.Матвеев, В.И.Ершов, О.В.Попов, А.Г.Свчинников, Ю.А.Аверкиев, С.П.Яковлев, С.С.Яковлев, В.Г.Ковалев, И.Н.Шубин, Э.Л.Мельников, В.П.Романовский, Л.А.Шофман, С.А.Евсюков, В.Ф.Константинов, Ф.В.Гречников, Л.И.Рудман, С.А.Валиев, Z.Marciniak и многие другие. В работах этих ученых изучено напряженное и деформированное состояние заготовок, подвергающихся операциям вытяжки и отбортовки, проведены исследования операций, даны рекомендации по проектированию технологических процессов.

Исследованию совмещений операций вытяжки и отбортовки посвящены работы Е.А.Попова, Г.А.Матвеева, Г.Д.Скворцова, С.А.Евсюкова, М.В.Сукова, ТАН ЮН-СИ и других. В их работах найдены условия совместного протекания

процессов вытяжки и отбортовки в кольцевых заготовках, разработаны математические модели процесса и методики расчета технологических параметров. В одной из рассмотренных работ упоминается возможность применения совмещенного процесса вытяжки и отбортовки для кольцевых деталей с двойными стенками, однако исследования зависимостей основных параметров технологического процесса от свойств заготовки, в том числе разности высот наружной и внутренней стенок при этом не проводились. Таким образом, поставленные в настоящей работе задачи не решались в рассмотренных работах и являются актуальными.

Во второй главе приводятся основные уравнения и соотношения, необходимые для теоретического анализа напряженного и деформированного состояний заготовки инженерным методом и методом конечных элементов.

Основой инженерного метода является совместное решение упрощенных уравнений равновесия совместно с условием пластичности с учетом следующих допущений:

1. Задачу приводят к осесимметричной или плоской.
2. Распределение нормальных напряжений определяют только для контактной поверхности.
3. Для упрощения дифференциальных уравнений равновесия нормальные напряжения принимают зависимыми только от одной из координат, а зависимость касательных напряжений от соответствующей координаты принимают линейной.

В результате метода конечных элементов ищется не аналитическое, а численное решение задачи. Система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных сводится к системе линейных алгебраических уравнений большой размерности. Число этих уравнений пропорционально числу точек, в которых находится решение задачи.

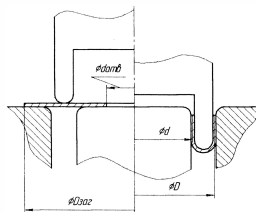


Рис.1.  
Схема процесса

Третья глава посвящена теоретическому исследованию совмещенного процесса вытяжки и встречной отбортовки. Процесс вытяжки и встречной отбортовки производится за один переход из кольцевой заготовки, наружный диаметр которой рассчитывается исходя из соотношений для вытяжки, а диаметр отверстия —

исходя из соотношений для отбортовки. Коэффициент вытяжки определяем по формуле  $k_{\text{выт}} = D_{\text{нар}}/D$ , где  $D_{\text{нар}}$  — диаметр кольцевой заготовки,  $D$  — наружный диаметр профильного кольца. Коэффициент отбортовки определяем по

формуле  $k_{отб} = d/d_{отв}$ , где  $d$  – внутренний диаметр (диаметр борта) профильного кольца,  $d_{отв}$  – диаметр отверстия кольцевой заготовки (Рис.1).

При отсутствии перетяжки (т.е. перемещения металла из одной зоны в другую) в ходе процесса высота наружной и внутренней стенок соответствует заданной высоте, на основании которой был произведен расчет заготовки.

Для количественной оценки явления перетяжки введем коэффициент перетяжки, равный соотношению фактической высоты стенки к расчетной:

$$K_n = \frac{H}{H_0} \quad (\text{Рис.2}).$$

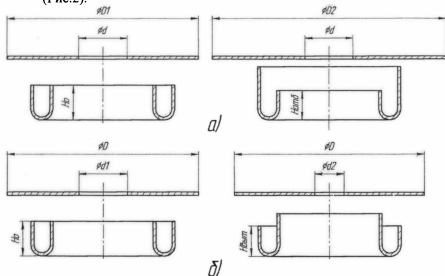


Рис.2.

Схема изменения соотношений коэффициентов вытяжки и отбортовки:

а – путем изменения коэффициента вытяжки; б – путем изменения коэффициента отбортовки

Коэффициент перетяжки может меняться от нуля до единицы. Единица соответствует стабильному процессу, ноль соответствует случаю, когда измеряемая высота стенки равна нулю, т.е. материал полностью перетянут в другую стенку.

С целью определения зависимости коэффициента перетяжки от соотношения коэффициентов вытяжки и отбортовки проведем серию численных экспериментов. Для этого выберем деталь с высотой, соответствующей расчету ( $K_n=1$ ), и будем менять сначала коэффициент вытяжки, увеличивая диаметр заготовки, а затем коэффициент отбортовки, уменьшая диаметр отверстия.

Очевидно, что при изменении одного размера кольцевой заготовки высота соответствующей стенки будет изменяться, но при условии отсутствия «перетяжки» высота второй стенки должна оставаться постоянной. Именно эту



высоту ( $H_{отб}$  при изменении  $k_{выт}$  и  $H_{выт}$  при изменении  $k_{отб}$ ) и будем сравнивать с расчетной высотой  $H_0$ , которая совпадает с высотой первой (исходной) детали, что позволит количественно оценить перетяжку при каждом соотношении коэффициентов вытяжки и отбортовки.

Моделирование показало, что с увеличением коэффициента вытяжки (уменьшением соотношения  $k_{отб}/k_{выт}$ ) высота стенки внутреннего борта уменьшается и при определенном соотношении коэффициентов операция вытяжки проходит не полностью, а внутренняя стенка у детали отсутствует (Рис.3).

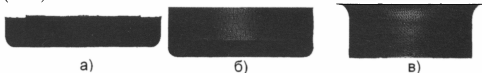


Рис.3.

Разрез детали, полученной в результате моделирования:

а –  $k_{отб}/k_{выт}=1,21$ ; б –  $k_{отб}/k_{выт}=1,06$ ; в –  $k_{отб}/k_{выт}=0,96$

Аналогично с увеличением коэффициента отбортовки (увеличением соотношения  $k_{отб}/k_{выт}$ ) высота наружной стенки уменьшается и при определенном соотношении коэффициентов операция отбортовки проходит не полностью, а наружная стенка у детали отсутствует (Рис.4).

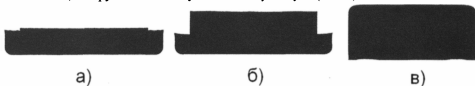


Рис.4.

Разрез детали, полученной в результате моделирования:

а –  $k_{отб}/k_{выт}=1,21$ ; б –  $k_{отб}/k_{выт}=1,67$ ; в –  $k_{отб}/k_{выт}=2,09$

В результате исследования определено, что с увеличением относительной толщины детали границы применения совмещенного процесса вытяжки и встречной отбортовки расширяются, при этом для колец с разными диаметрами они смещены по оси  $k_{отб}/k_{выт}$  в сторону увеличения соотношения коэффициентов для деталей с большей относительной толщиной (Рис.5). При этом для деталей с относительной толщиной  $s/D=0,010$  возможность штамповать детали без перетяжки достаточно ограничена: перетяжка отсутствует или не превышает 5% только для значений  $k_{отб}/k_{выт}$ , лежащих в отрезке от 1,04 до 1,13. Для деталей с относительной толщиной  $s/D=0,015$  аналогичные условия  $k_{отб}/k_{выт}$  в отрезке от 1,15 до 1,32. Для деталей с относительной толщиной  $s/D=0,020$  перетяжка отсутствует или не превышает 5% для значений  $k_{отб}/k_{выт}$ , лежащих в отрезке от 1,22 до 1,65.

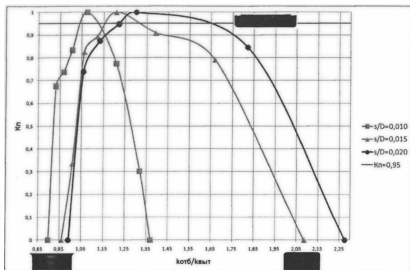


Рис.5.

Зависимость коэффициента перетяжки от соотношения коэффициентов вытяжки и отбортовки для разных диаметров детали

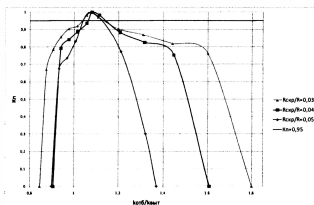


Рис.6.

Зависимость коэффициента перетяжки от соотношения коэффициентов вытяжки и отбортовки для разных радиусов скругления пуансона

пуансона увеличит напряжения в процессе вытяжки и встречной отбортовки, что повышает риск разрушения заготовки.

С уменьшением относительного радиуса скругления пуансона границы применения совмещенного процесса вытяжки и встречной отбортовки расширяются (Рис.6). Однако участок, где перетяжка отсутствует или не превышает 5%, практически совпадает для используемых величин относительных радиусов скругления, а также стоит учитывать, что уменьшение радиуса скругления

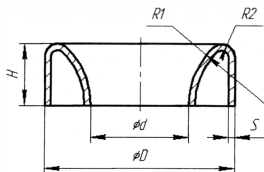


Рис.7.

Чертеж профильного кольца с  
аэродинамическим профилем

зависимости изменения относительной высоты внутреннего борта от соотношения коэффициентов отбортовки и вытяжки (Рис.8).

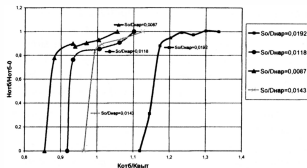


Рис.8.

Зависимости относительной высоты внутреннего борта от отношения коэффициентов вытяжки и встречной отбортовки для разных относительных толщин деталей

определенный момент операция вытяжки проходит не полностью, а внутренняя стенка полностью перетекает во внешнюю ( $K_n = H_{отб}/H_0 = 0$ ). Для  $s/D = 0,0192$  критическое отношение соответствует значению 1,17, для  $s/D = 0,0143$  – значению 0,99, для  $s/D = 0,0118$  – значению 0,93 и для  $s/D = 0,0087$  критическое отношение коэффициентов равно 0,88. Таким образом, графики разных типоразмеров смещены друг относительно друга по оси абсцисс.

При изменении диаметра отверстия, т.е. коэффициента отбортовки, перетяжка в сторону отбортовки наблюдается при штамповке деталей с меньшей относительной толщиной ( $s/D = 0,0087$ ; 0,0096). При штамповке

По аналогии с исследованиями совмещенного процесса вытяжки и отбортовки для деталей с симметричным профилем, в работе проведены исследования совмещенного процесса для колец с аэродинамическим профилем (Рис.7), которые в частности используются в аэродинамических аппаратах пылегазоочистки.

При изменении диаметра заготовки, т.е. коэффициента вытяжки, получены следующие

Анализируя полученные графики, наблюдаем, что характер изменения относительной высоты борта для разных типоразмеров аналогичен. До определенного момента изменение высоты стенки борта незначительно, но существует критическое значение отношения коэффициентов вытяжки и встречной отбортовки, при котором начинается «перетяжка» (явный изгиб графика) в сторону вытяжки и в

деталей с большей относительной толщиной ( $s/D=0,0192; 0,0288$ ) перетяжка в сторону отбортовки не наблюдается даже при значительном увеличении коэффициента отбортовки.

В листовой штамповке в процессе вытяжки часто используют силовой прижим для предотвращения образования складок во фланце. В случае колец с двойными стенками рассматриваем использование складкодержателя. При использовании силового прижима перетяжка в сторону вытяжки наступает при меньших значениях коэффициента вытяжки, что уменьшает возможность протекания стабильного процесса вытяжки и встречной отбортовки по сравнению со штамповкой с использованием складкодержателя. Следовательно, можно рекомендовать использование складкодержателя.

В результате исследования определено, что увеличение толщины заготовки при прочих равных условиях способствует наиболее безопасному течению процесса отбортовки и протеканию процесса вытяжки без образования складок во фланце.

В совмещенном процессе вытяжки и встречной отбортовки для колец с аэродинамическим профилем контур детали точно повторяет контур пуансона, что имеет большое значение для эксплуатационных свойств детали.

Для определения граничного радиуса, разделяющего процессы вытяжки и отбортовки принято допущение, что граница между операциями вытяжки и отбортовки находится между радиусом борта  $R_b$  и радиусом стакана  $r$  и может быть определена как точка равенства меридиональных напряжений при вытяжке и отбортовке. Для определения граничного радиуса необходимо решить уравнение  $\sigma_{\rho}^{выт} = \sigma_{\rho}^{отб}$  относительно  $\rho$ . Для учета влияния трения на скругленной кромке матрицы, явления изгиба при переходе элементов заготовки на скругленную кромку матрицы и при сходе с нее в процессе вытяжки, а также трения на кромке пуансона, влияния изгиба на кромках матрицы и пуансона в процессе отбортовки необходимо подставить выражения для напряжений вытяжки и отбортовки с учетом дополнительных факторов:

$$\sigma_{\rho}^{выт} = \sigma_s \left( \ln \frac{R_{II}}{\rho} + \frac{s}{2r_m + s} \right) \cdot (1 + 1,6\mu);$$

$$\sigma_{\rho}^{отб} = \sigma_s \left( 1 - \frac{r_{on}}{\rho} + \frac{s}{2r_n + s} + \frac{s}{4r_m + 2s} \right) \cdot (1 + 1,6\mu).$$

Решая полученное равенство относительно  $\rho$ , получаем формулу для определения граничного радиуса из условия равенства меридиональных напряжений:

$$\rho = -\frac{R_*}{2} \left( \frac{s}{2r_n^{отб} + s} + \frac{s}{4r_m^{отб} + 2s} - \frac{s}{2r_m^{выт} + s} - \sqrt{\left( \frac{s}{2r_n^{отб} + s} + \frac{s}{4r_m^{отб} + 2s} - \frac{s}{2r_m^{выт} + s} \right)^2 + \frac{4r_{on}}{R_n}} \right)$$

Стабильность совмещенного процесса напрямую зависит от положения граничного радиуса, при котором меридиональные напряжения вытяжки и отбортовки равны. И при определенном сдвиге расчетного граничного радиуса

относительно геометрической границы процессов один из процессов преобладает над другим и происходит перетяжка.

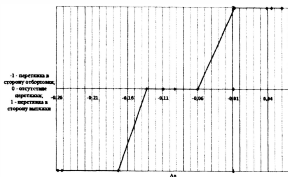


Рис.9.

Зависимость наличия перетяжки от  $\Delta\rho$

Для того чтобы оценить размеры этого влияния, введем относительную величину

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{гр} - \rho_{черт}}{\rho_{черт}}, \text{ где } \rho_{гр} -$$

радиус, определенный из условия равенства напряжений,  $\rho_{черт}$  - геометрическая граница процессов, определенная по чертежу детали, и сопоставим полученные точки с результатами математического

моделирования.

В результате получаем, что при сдвиге граничного радиуса  $\rho_{гр}$  относительно  $\rho_{черт}$  в направлении к оси вращения детали на величину от 6% до 13,3% перетяжка отсутствует как в сторону вытяжки, так и в сторону отбортовки. При сдвиге граничного радиуса  $\rho_{гр}$  относительно  $\rho_{черт}$  в направлении к оси вращения детали более чем на 17% в процессе штамповки происходит перетяжка в сторону отбортовки. При любой величине сдвига граничного радиуса  $\rho_{гр}$  относительно  $\rho_{черт}$  в направлении от оси вращения детали в процессе штамповки происходит перетяжка в сторону вытяжки (Рис.9).

Для профильных колец с аэродинамическим профилем получаем, что при сдвиге граничного радиуса  $\rho_{гр}$  относительно  $\rho_{черт}$  в направлении к оси вращения детали на величину от 3,9% до 17,4% перетяжка отсутствует как в сторону вытяжки, так и в сторону отбортовки. При сдвиге граничного радиуса  $\rho_{гр}$  относительно  $\rho_{черт}$  в направлении к оси вращения детали более чем на 22% в процессе штамповки происходит перетяжка в сторону отбортовки. При любой величине сдвига граничного радиуса  $\rho_{гр}$  относительно  $\rho_{черт}$  в направлении от оси вращения детали в процессе штамповки происходит перетяжка в сторону вытяжки.

Для ряда деталей с относительными толщинами  $s/D=0,005; 0,010; 0,015$  рассчитаны максимальные напряжения при вытяжке и максимальные напряжения при отбортовке и построены графики сил, соответствующих этим напряжениям, на этих же графиках обозначены зоны перетяжки, которые определены математическим моделированием (Рис.10).

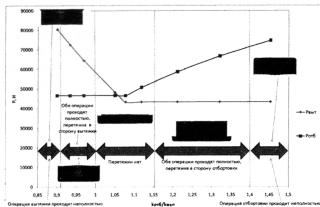


Рис.10.

График сил, соответствующих максимальным напряжениям, и зоны перетяжки для деталей с  $s/D=0,005$

Разработана регрессионная модель, позволяющая определять изменение полученной высоты борта по сравнению с расчетной в зависимости от технологических параметров процесса:

$$y = -0,2064 - 0,1218 x_1 + 0,0239 x_2 - 0,0055 x_3 + 0,0172 x_4 + 0,0654 x_5 - 0,0271 x_6 - 0,0743 x_7 - 0,0383 x_8 + 0,0478 x_9 - 0,0044 x_1^2 - 0,0069 x_3^2$$

В четвертой главе приведены данные об экспериментальном исследовании совмещенного процесса вытяжки и встречной отбортовки. Проверка теоретических зависимостей проводилась на примере штамповки профильных колец с аэродинамическим профилем. Материал кольца – сталь 08кп. В рамках эксперимента получены все основные возможные случаи получения профильных колец при разных соотношениях коэффициентов отбортовки и вытяжки (Рис.11).

Утолщение наружной стенки (по краю) при штамповке с использованием складкодержателя незначительно – в пределах 0,1 мм, что составляет не более 5% толщины исходного листа. При штамповке без использования складкодержателя максимальное утолщение составило 0,3 мм (15%). По результатам моделирования утолщение наружной стенки со складкодержателем 0,2 мм (10%), без складкодержателя 0,35 мм (17,5%). Утонение внутренней стенки (по краю) составило 0,4÷0,6 мм или 20÷30% толщины исходного листа. По результатам моделирования утонение внутренней стенки 0,5-0,6 мм (25÷30%). Таким образом, расхождение экспериментальных и теоретических данных по утолщению и утонению не превышает 5% от толщины.

При сопоставлении результатов расчета сил, соответствующих максимальным напряжениям, и результатов математического моделирования получаем, что в точке пересечения графиков сил, соответствующих максимальным напряжениям, при вытяжке и отбортовке процесс протекает стабильно для всех рассмотренных относительных толщин.

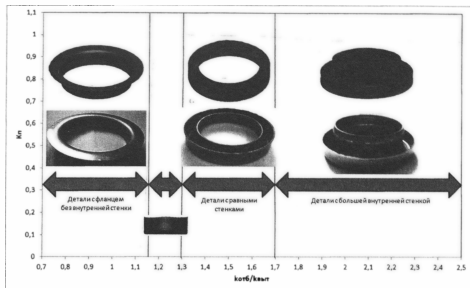


Рис.11.

Зоны получения возможных форм деталей при разных соотношениях коэффициентов отбортовки и вытяжки деталей

Погрешность получения наружного диаметра у всех деталей составила не более 1 мм (0,9%), внутренний диаметр получен у всех деталей точно (в пределах точности измерительного инструмента), что совпадает с теоретическими данными.



Рис.12.

Детали, полученные в результате эксперимента

Детали, полученные с использованием складкодержателя, имеют ровную гладкую поверхность. Детали, полученные без

использования складкодержателя, имеют поверхность с четкими следами от гофр, что соответствует результатам математического моделирования (Рис.12).

В целом сравнение полученных данных в результате математического моделирования и физического эксперимента позволяет считать результаты моделирования достоверными.

В пятой главе разработаны практические рекомендации и приведены данные о внедрении результатов работы. Разработана методика определения размеров заготовки для получения требуемых размеров детали на основе регрессионной модели (Рис.5.1 в диссертации).

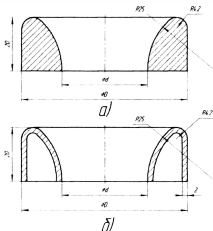


Рис.13.

Чертеж кольца

*a* – по существующей технологии;  
*б* – по предложенной технологии

Предложенные рекомендации по расчету технологических параметров операций совмещения вытяжки и встречной отбортовки листовых заготовок с отверстием использованы для разработки технологического процесса изготовления номенклатуры профильных колец воздухоочистительного аппарата. Чертежи колец, изготавливаемые по существующей технологии и новой технологии, представлены на Рис.13.

Разработанный технологический процесс принят для использования в ООО «ЭкоТех». Технологический процесс изготовления номенклатуры профильных колец воздухоочистительного аппарата методами листовой штамповки обеспечивает сокращение трудоемкости изготовления деталей на 70% и общего

веса аппарата на 25% по сравнению с используемой технологией изготовления колец методами обработки резания. При этом достигаются необходимые требования к изделию по геометрическим и механическим характеристикам.

Для изготовления профильных колец с использованием складкодержателя разработан производственный штамп. Также с учетом необходимости изготовления профильных колец разных типоразмеров разработана схема штампа с универсальным устройством для крепления блоков всех типоразмеров колец из номенклатуры к плите штампа.

### Общие выводы и результаты работы

1. Предложенный в работе способ штамповки колец с двойными стенками, основанный на совмещении операций вытяжки и встречной отбортовки, реализуется за один переход с минимальным отходом металла, что позволяет значительно сократить трудоемкость изготовления подобных деталей и значительно уменьшить отходы металла по сравнению с существующим способом изготовления профильных колец.

2. Показано, что с увеличением относительной толщины детали границы применения совмещенного процесса вытяжки и встречной отбортовки расширяются. Одновременно с уменьшением относительного радиуса скругления пуансона границы применения совмещенного процесса вытяжки и встречной отбортовки также расширяются, но при этом максимальные напряжения при вытяжке и отбортовке увеличиваются, что ограничивает максимальное формоизменение и технологические возможности способа пластичностью металла. Установлены границы применения совмещенного



процесса вытяжки и встречной отбортовки для относительных толщин  $s/D$  в интервале от 0,005 до 0,020.

3. Показано, что в случае постоянного коэффициента трения на всей поверхности детали влияние трения незначительно. В случае создания различных условий трения в отдельных участках очага деформации, наиболее благоприятных для перетяжки в ту или иную сторону, за счет трения возможно изменить высоту борта или наружной стенки до 70%.

4. Исходя из условия равенства напряжений при вытяжке и отбортовке, определен граничный радиус, разделяющий операции вытяжки и отбортовки. Определены границы допустимого отклонения полученного радиуса от радиуса, определяемого по чертежу детали и геометрически разграничивающего зоны вытяжки и отбортовки. При сдвиге граничного радиуса  $r_{гр}$  относительно геометрического в направлении к оси вращения детали на величину от 6% до 13,3% процесс с симметричным профилем инструмента протекает стабильно, перетяжка отсутствует. Для деталей с аэродинамическим профилем перетяжка отсутствует при сдвиге граничного радиуса  $r_{гр}$  относительно геометрического в направлении к оси вращения детали на величину от 3,9% до 17,4%.

5. Теоретически и экспериментально показано, что методом совмещения вытяжки и встречной отбортовки возможно получать кольца с аэродинамическим профилем, при этом контур детали точно повторяет контур пуансона. Для колец с аэродинамическим профилем определена область значений геометрических параметров, при которых отсутствует перетяжка, что позволяет изготавливать детали с соответствующими этой области параметрами без дополнительных мер по предотвращению перетяжки.

6. Разработана методика проектирования совмещенного процесса вытяжки и встречной отбортовки, учитывающая возможность использования данных о стабильности процесса при заданных его параметрах.

7. Внедрение в производство технологического процесса изготовления номенклатуры профильных колец воздухоочистительного аппарата методом совмещения вытяжки и встречной отбортовки обеспечивает сокращение трудоемкости изготовления деталей на 70% и общего веса аппарата на 25% по сравнению с используемой технологией изготовления колец методами обработки резания.

### **Основное содержание диссертации отражено в публикациях**

1. Петрушина М.М., Евсюков С.А. Разработка технологического процесса штамповки профильных колец с двойными стенками методом совмещения вытяжки и отбортовки // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. №8. С. 22-25.

2. Петрушина М.М., Евсюков С.А., Езжев А.С. Исследование стабильности совмещенного процесса вытяжки и отбортовки при штамповке колец с двойными стенками // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. №9. С. 51-57.

3. Петрушина М.М., Евсюков С.А. Исследование стабильности совмещенного процесса вытяжки и встречной отбортовки при штамповке колец с двойными стенками // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 3. DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0313.0541172>

4. Петрушина М.М., Езжев А.С. Разработка и исследование технологического процесса штамповки профильных колец воздухоочистительного аппарата // «Наука и образование: электронное научно – техническое издание». Выпуск №7. 2008. <http://technomag.edu.ru/doc/98224.html>. № 0420800025\0043

5. Петрушина М.М., Езжев А.С. Разработка и исследование технологического процесса штамповки профильных колец воздухоочистительного аппарата // Сб. материалов. М.:МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. С. 74-75.

6. Петрушина М.М., Езжев А.С. Разработка и исследование технологического процесса штамповки профильных колец воздухоочистительного аппарата // Всероссийская научно – техническая конференция «Студенческая научная весна 2008: Машиностроительные технологии». ФГУП НТЦ «Информрегистр». № 0320800609. М.:МГТУ им. Н.Э. Баумана, 7 - 9 апреля 2008.

7. Петрушина М.М., Берестова И.В., Асеев А.С. Разработка и исследование технологического процесса штамповки колец воздухоочистительного аппарата // Студенческий научный вестник: Сборник статей третьей научно-инженерной выставки «ПОЛИТЕХНИКА» (1-4 декабря 2008 г., МГТУ им. Н.Э. Баумана) / Под ред. К.Е.Демихова. М.: НТА «АПФН» (Сер. Проффессионал) , 2008. Т.7. С. 78-84.

8. Петрушина М.М. Исследование процесса вытяжки - отбортовки кольцевых деталей // Будущее машиностроения России: Сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (Москва, 22-25 сентября 2010 г., МГТУ им. Н.Э. Баумана). М.:МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 94.

9. Петрушина М.М., Езжев А.С. Исследование процесса вытяжки - отбортовки кольцевых деталей // Третья Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». ФГУП НТЦ «Информрегистр» №0321001780. М.:МГТУ им. Н.Э. Баумана (22-25 сентября 2010 г.)

10. Петрушина М.М., Езжев А.С., Евсюков С.А. Изготовление кольцевых деталей с U-образной образующей // Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно - прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств: Сборник докладов и материалов X Конгресса «Кузнец-2010». С. 215-222.

11. Петрушина М.М. Исследование совмещенного процесса вытяжки – отбортовки кольцевых деталей // Теоретические и прикладные задачи обработки металлов давлением и автотехнических экспертиз. Винница: ВНТУ, 2011. С. 120-121.