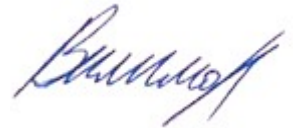


На правах рукописи



**ВИЛИМОК ЯРОСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

**ВЫТЯЖКА ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СТУПЕНЧАТЫХ  
ДЕТАЛЕЙ В ЛЕНТЕ**

Специальность **05.02.09** – Технологии и машины обработки давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тула – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
Ларин Сергей Николаевич.

Официальные оппоненты: Сосенушкин Евгений Николаевич  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Московский государственный  
технологический университет  
СТАНКИН» (г. Москва), профессор ка-  
федры «Системы пластического дефор-  
мирования»;

Булычев Владимир Александрович,  
кандидат технических наук, доцент, АО  
«ЦКБА» (г. Тула), ведущий специалист.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Московский политехниче-  
ский институт» (г. Москва).

Защита диссертации состоится «04» декабря 2018 г. в 14<sup>00</sup> часов на засе-  
дании диссертационного совета Д 212.271.01, созданного на базе ФГБОУ ВО  
«Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, проспект  
Ленина, д. 92, 9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:  
[http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Vilimok\\_YA/](http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Vilimok_YA/)

Автореферат разослан «09» октября 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Черняев  
Алексей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Развитие промышленности страны в значительной мере определяется ростом объема производства металлов, расширением сортамента изделий из металлов и сплавов и повышением их качественных показателей, что в значительной мере зависит от условий пластической обработки. Знание закономерностей обработки металлов давлением помогает выбирать наиболее рациональные режимы технологических процессов. В настоящее время в России активно развиваются машиностроительные производства, в которых применяется много видов ступенчатых осесимметричных деталей различной конфигурации, изготавливаемые операциями вытяжки.

Возможность изготовления вытяжкой малогабаритных ступенчатых деталей различной конфигурации (с диаметром большей ступени до 100 мм) представляет значительный интерес для различных отраслей электротехнической, приборостроительной и машиностроительной промышленности, где в связи с постоянным расширением номенклатуры выпускаемых изделий необходимо совершенствование технологий производства и процессов интеграции. Наиболее эффективным способом изготовления малогабаритных осесимметричных ступенчатых деталей из тонколистовых материалов является вытяжка в ленте. Широкое внедрение вытяжки осесимметричных ступенчатых деталей сдерживается недостаточной изученностью особенностей течения материала при их изготовлении. Большинство существующих рекомендаций носит обобщенный характер: влияние технологических параметров на интенсивность напряжений, интенсивность деформаций, предельную высоту, силу вытяжки при штамповке осесимметричных ступенчатых деталей не оценивалось. В связи с этим выявление закономерностей влияния технологических параметров сократит стоимость и сроки внедрения производства новой номенклатуры осесимметричных ступенчатых деталей.

Теоретическое обоснование рациональных технологических режимов операции вытяжки осесимметричных ступенчатых деталей, обеспечивающих повышение технологичности изготовления, является актуальной задачей.

Работа выполнялась в соответствии с государственными контрактами в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы Минобрнауки РФ, грантами РФФИ, научно-технической программой Министерства образования и науки Российской Федерации «Развитие научного потенциала высшей школы», государственным контрактом Министерства образования и науки РФ.

**Цель работы.** Повышение эффективности изготовления осесимметричных ступенчатых деталей вытяжкой в ленте на основе теоретически и экспериментально обоснованных технологических режимов операций вытяжки и технических решений.

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

- 1 Исследовать предельные возможности формоизменения материалов (стали 12X18H10T и алюминия А5М) в условиях двухосного растяжения по ме-

тоту Эриксона экспериментально и с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов; определить силовые параметры, напряжённое и деформированное состояния, установить зависимости предельной высоты купола от диаметра пуансона для различных толщин материалов и коэффициентов трения; сравнить результаты, полученные экспериментально и с помощью компьютерного моделирования.

2 Выполнить исследования операции вытяжки в ленте с заземлением фланца осесимметричных ступенчатых деталей из стали 12Х18Н10Т и алюминия А5М с выявлением закономерности влияния геометрии инструмента, условий трения на контактных поверхностях заготовки и рабочего инструмента, относительного диаметра ступеней, относительной предельной высоты ступеней, толщины материала на силовые параметры, интенсивность напряжений, интенсивность деформаций, предельные высоты.

3 Провести сравнение и определить закономерности значений глубины вытяжки по методу Эриксона с предельной высотой ступеней осесимметричных деталей из стали 12Х18Н10Т и алюминия А5М при вытяжке в ленте с заземлением фланца для различных вариантов технологии формоизменения.

4 Разработать методику определения технологических переходов операции вытяжки в ленте с заземлением фланца осесимметричных ступенчатых деталей на основе технологических испытаний по методу Эриксона и диаграммы предельной пластичности.

5 Повысить эффективность изготовления осесимметричных ступенчатых деталей вытяжкой в ленте с заземлением фланца путём разработки конструкции штампа последовательного действия, позволяющего осуществлять вытяжку с формовкой фланца в одном штампе.

**Объекты исследования.** Вытяжка осесимметричных ступенчатых деталей.

**Предметы исследования.** Операции вытяжки осесимметричных ступенчатых деталей в ленте в условиях заземления фланца.

**Методы исследования.** Теоретические исследования операций вытяжки осесимметричных ступенчатых деталей выполнены с использованием основных положений теории пластичности для упругопластического, несжимаемого, упрочняющегося материала в программном комплексе «Autoform», основанном на базе МКЭ. Экспериментальные исследования проводились с использованием испытательной машины МТЛ-10Г.

**Автор защищает:**

- установленные количественные зависимости влияния геометрии инструмента, коэффициента трения, относительных диаметров ступеней, толщины материала, силы прижима на силовые параметры, интенсивность напряжений, интенсивность деформаций, предельные высоты операции вытяжки в ленте осесимметричных ступенчатых деталей;

- результаты технологических испытаний на двухосное растяжение по методу Эриксона, полученные экспериментально и путем компьютерного моделирования с использованием метода конечных элементов;

- результаты компьютерного моделирования операций вытяжки осесимметричных ступенчатых деталей в ленте в условиях защемления фланца;

- разработанную методику определения параметров технологического процесса вытяжки ступенчатых деталей в ленте в условиях защемления фланца, основанную на результатах технологических испытаний по методу Эриксона и компьютерного моделирования.

- конструкцию штампа для последовательной вытяжки в ленте, отличающегося от аналогов наличием отражателя локальной силы и возможностью формовки локальных выступов детали в противоположном направлении.

**Научная новизна.** Установлена качественная и количественная корреляция значений глубины вытяжки по методу Эриксона с предельной высотой ступенчатой детали для трех технологических маршрутов изготовления в ленте с защемлением фланца.

Для операций вытяжки осесимметричных ступенчатых деталей в ленте в условиях с защемлением фланца выявлены количественные закономерности изменения предельных высот, силовых параметров, интенсивностей напряжений, интенсивностей деформаций от различных технологических параметров: толщины материала, коэффициента трения, геометрии инструмента, геометрии детали.

**Практическая значимость.** Получены уравнения регрессии, позволяющие устанавливать предельную высоту ступенчатых деталей различной конфигурации при штамповке в ленте в условиях с защемлением фланца; предложена методика определения рационального технологического режима изготовления ступенчатых деталей в ленте в условиях с защемлением фланца; спроектирована штамповая оснастка (патент на полезную модель РФ № 135948); создана 3-D модель штампа; изготовлен, испытан и отлажен штамп.

**Реализация работы.** Разработанные рекомендации по проектированию технологических процессов изготовления осесимметричных ступенчатых деталей заданной конфигурации востребованы на ОАО «ТНИТИ» (г. Тула) при проектировании изделия типа «Крышка».

Внедрение предложенных рекомендаций позволяет повысить эффективность изготовления: сократить сроки подготовки производства, уменьшить металлоемкость заготовок, снизить трудоемкость изготовления деталей и повысить их качество. Отдельные результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров направления 15.07.01 «Машиностроение» и магистров направления 15.04.01 «Машиностроение» профиля «Машины и технология обработки металлов давлением».

**Апробация работы.** Материалы настоящей работы представлены на 15 всероссийских и международных конференциях и выставках, среди которых наиболее значимые: Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, МАТИ, 2012, 2013, 2014 гг.); Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (Тула, ТулГУ, 2012, 2013 гг.); III Международная научно-техническая конференция «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов

давлением» (Тула, ТулГУ, 2014 г.); Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ (г. Тула, 2013, 2014, 2015, 2017 гг.); XVI Московский международный салон изобретений и инновационных технологий «Архимед» (Москва, КВЦ «Сокольники», 2013 г.); IX Международный салон изобретений и новых технологий «Новое время» (Севастополь, 2013 г.). Автор был награжден 4 медалями и 8 дипломами лауреата.

**Публикации.** Материалы проведенных исследований отражены в 12 публикациях: в 7 статьях в изданиях, внесенных в список ВАК, в 5 тезисах международных и всероссийских научно-технических конференций; общим объемом 3,2 п.л.; из них авторских – 2,4 п.л.; получен 1 патент на полезную модель.

Автор выражает глубокую благодарность д-ру. техн. наук, профессору **А.К. Евдокимову**, д-ру. техн. наук, профессору **С.С. Яковлеву** за оказанную помощь при выполнении работы.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения и четырех разделов, заключения, списка использованных источников из 92 наименований, 2 приложений и включает 89 страниц машинописного текста, 64 рисунка и 20 таблиц. Общий объем – 128 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность рассматриваемой в работе задачи, ее научная новизна, практическая ценность, приведены положения, выносимые на защиту, и краткое содержание разделов диссертации.

**В первом разделе** изложено современное состояние теории и технологии изготовления осесимметричных сложнопрофильных, в том числе ступенчатых деталей, вытяжкой из тонколистового металла и в ленте, рассмотрены существующие методы анализа процессов обработки металлов давлением.

Отмечено, что значительный вклад в исследования операций вытяжки внесли А.Ю. Аверкиев, А.А. Бебрис, С.А. Валиев, Е.А. Попов, И.П. Ренне, В.П. Романовский, И.Н. Шубин, С.П. Яковлев, С.С. Яковлев и др., а также зарубежные ученые Г.В. Свифт, П. Эриксен, Л.А. Шофман, У. Джонсон, Р. Хилл, и др. Проведен анализ существующих технологических процессов изготовления осесимметричных ступенчатых деталей из тонколистовых материалов.

Установлено, что большинство существующих исследований выполнены экспериментальными или инженерными методами. Метод конечных элементов способствует повышению эффективности анализа. Использование этого метода для исследования сложного характера пластического течения металла, а также изучения действий на него технологических параметров, напряженного и деформированного состояний и условий трения на контактных границах позволяет разработать наиболее точную, достоверную, универсальную модель деформирования. Проанализированы особенности изготовления осесимметричных ступенчатых деталей. Выяснено, что рекомендации по проектированию технологических процессов и инструмента для изготовления осесимметричных ступенчатых деталей из тонколистовых материалов в ленте носят обобщенный ха-

рактер, влияние технологических параметров на изготовление деталей не оценивалось, сравнение технологических маршрутов изготовления не проводилось.

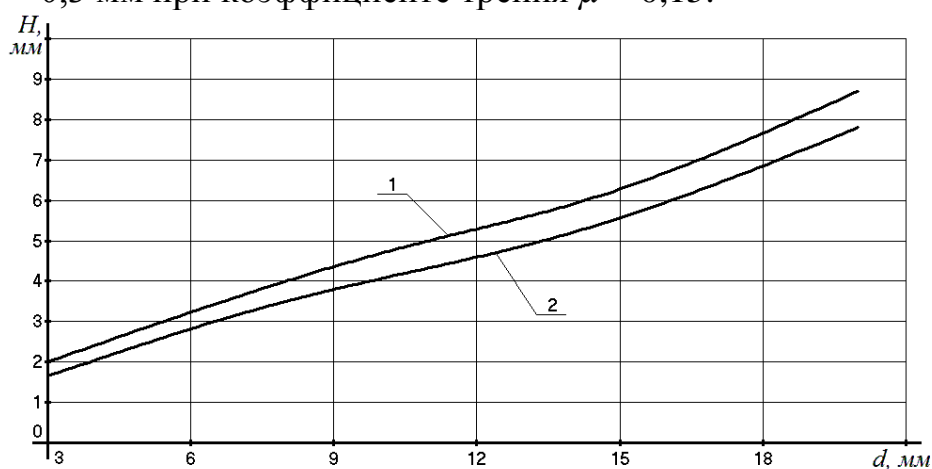
Выявлено, что при штамповке осесимметричных ступенчатых деталей в ленте в условиях защемления фланца схема деформирования ближе всего к схеме двухосного напряженного состояния. В связи с этим большой практический интерес представляет возможность сопоставить результаты испытаний по методу Эриксона с результатами исследований вытяжки осесимметричных ступенчатых деталей, а также выявить зависимости и выразить их через относительные величины.

На основании проведенного обзора выявлена необходимость дальнейших исследований закономерностей и явлений, происходящих при вытяжке осесимметричных ступенчатых деталей. В конце раздела сформулированы задачи исследования.

**Во втором разделе** приведены результаты экспериментальных и компьютерного исследования (методом конечных элементов) испытаний тонколистовой заготовки на двухосное растяжение (по методу Эриксона), а также сравнение результатов исследований с технологическими испытаниями. Отмечены основные уравнения метода конечных элементов, используемые для изучения операций листовой штамповки. Отражены особенности использования метода конечных элементов, а также специального программного обеспечения для операций листовой штамповки.

Испытания на двухосное растяжение проводились путем моделирования методом конечных элементов в соответствии с ГОСТ 10510-80 для алюминия А5М и стали 12Х18Н10Т толщиной 0,2 ... 1 мм, используя пуансоны различного диаметра: 3 мм, 8 мм, 14 мм, 20 мм. Механические и физические свойства материалов задавались близкими к реальным. Трение на контактных поверхностях принималось в диапазоне  $\mu = 0,05 \dots 0,4$ .

Исходя из результатов исследований, выявлены зависимости предельной высоты сферического купола от диаметра пуансона для стали 12Х18Н10Т и алюминия А5М различных толщин. На рисунке 1 приведены зависимости для толщины  $t = 0,3$  мм при коэффициенте трения  $\mu = 0,15$ .



1 – сталь 12Х18Н10Т, 2 – алюминия А5М

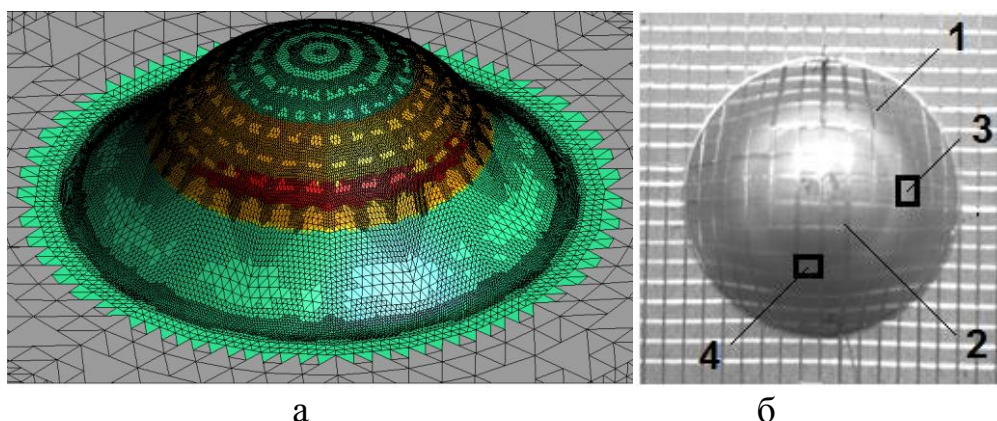
Рисунок 1 – Зависимости предельной глубины от диаметра пуансона

Для определения закономерности влияния толщины материала  $t$  и диаметра пуансона  $d$  на предельную высоту  $H$  были введены следующие величины: относительная толщина  $t_{отн} = t/d$ , относительная высота  $h_{отн} = H/d$ . Методом статистической обработки результатов экспериментов были получены уравнения регрессии. При коэффициенте трения  $\mu = 0,15$  для алюминия А5М уравнение имеет вид:  $h_{отн} = 1,645t_{отн} + 0,362$ , для стали 12Х18Н10Т:  $h_{отн} = 2,062t_{отн} + 0,409$ . Используя полученные уравнения можно прогнозировать предельную высоту сферического купола.

Для оценки достоверности полученных компьютерных результатов выполнено сопоставление их с экспериментальными данными испытаний по методу Эриксона с нанесением делительной сетки на образце.

Испытания проводились по ГОСТ 10510-80 на испытательной машине МТЛ-10Г для алюминия А5М и стали 12Х18Н10Т толщиной  $t = 0,5$  мм при коэффициенте трения  $\mu = 0,15$ . Сравнивалась высота купола, а также главные логарифмические деформации, соответствующие предельной штампуемости плоских образцов (рисунок 2).

Экспериментально установлено, что наибольшее утонение заготовка претерпевает на стыке сферического сегмента 2 с усечённым конусом 1.



а – моделирование с помощью МКЭ; б – экспериментальное испытание  
Рисунок 2 – Образец после испытания на формовку лунки

Для расчета деформаций выбирались ячейки, расположенные либо на сферической 4, либо на конусной 3 части купола образца вблизи образующейся «шейки» (рисунок 2, б). За истинный результат принималось среднестатистическое значение. Сравнительный анализ данных, полученных экспериментальным методом и методом конечных элементов, показывает, что значения отличаются на 7...10 %.

**В третьем разделе** рассмотрено влияние технологических параметров на интенсивности напряжений и деформаций, силовые параметры, предельные высоты при изготовлении осесимметричных ступенчатых деталей в ленте.

Для исследований операций вытяжки осесимметричных ступенчатых деталей методом конечных элементов определены их рассматриваемые габариты: диаметр меньшей ступени  $d_1 = 4...20$  мм, диаметр большей ступени  $d_2 = 6...30$  мм, соотношение диаметров ступеней  $d_1/d_2 = 0,5...0,8$ , соотношение высот



ступеней:  $h_1/h_2 = 0,5 \dots 1,5$ , радиусы закругления инструмента  $r_1, r_2, r_3, r_4 = 0,2 \dots 1$  мм, толщина материала  $t = 0,3 \dots 0,5$  мм, коэффициент трения  $\mu = 0,05 \dots 0,4$ , сила прижима  $Q = 2 \dots 8$  кН. Пример конфигурации детали приведен на рисунке 3, пример моделирования в программном комплексе представлен на рисунке 4.

Осесимметричные ступенчатые детали в ленте можно изготовить различными технологическими маршрутами: 1) последовательной вытяжкой, начиная от меньшей ступени к большей; 2) последовательной вытяжкой, начиная от большей ступени к меньшей; 3) одновременной вытяжкой всех ступеней. Было проведено сравнение данных маршрутов с целью определения наиболее рационального.

Исследования трех технологических маршрутов были выполнены для двухступенчатых и трехступенчатых деталей различных габаритов из алюминиевого сплава А5М и стали 12Х18Н10Т. Критерием сравнительного анализа была выбрана предельная высота. Большой практический интерес также представляет изучение характера распределения интенсивностей деформаций и напряжений в полученной детали. По их распределению можно судить о характере дефектообразования для каждого технологического маршрута.

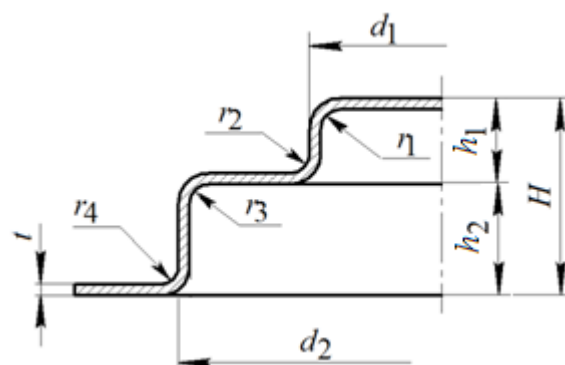


Рисунок 3 – Конфигурация детали

Исходя из результатов исследования методом конечных элементов трех маршрутов изготовления ступенчатых деталей установлено, что первый является наиболее рациональным. Выявлено, что второй и третий маршруты подходят для деталей с меньшей предельной высотой ступеней, а следовательно, и меньшей предельной высотой детали: второй – из-за ограниченного количества металла для последующих операций, а третий – из-за сложной схемы деформирования.

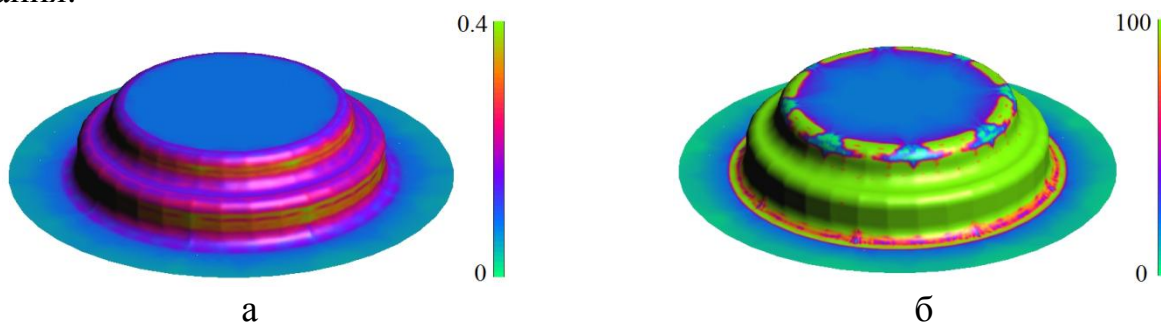


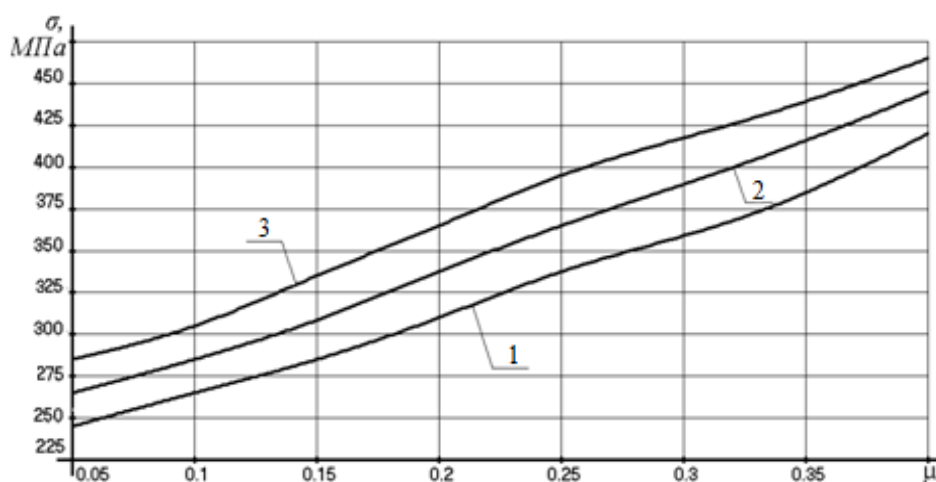
Рисунок 4 – Пример распределения интенсивностей деформаций (а) и интенсивностей напряжений, МПа, (б) в программном комплексе

Было установлено, что для деталей с двумя и более ступенями характер зависимости интенсивностей напряжений и деформаций, силы вытяжки, предельной высоты детали от технологических параметров сохраняется, независи-

мо от числа ступеней, поэтому основные исследования выполнялись для осесимметричных двухступенчатых деталей.

Установлены зависимости значений интенсивностей напряжений, интенсивностей деформаций, силы вытяжки от относительного диаметра  $\bar{d} = d_1/d_2$  и коэффициента трения  $\mu$  на контактных поверхностях матрицы и пуансона для алюминия и стали различных толщин.

На рисунке 5 показано влияние коэффициента трения  $\mu$  на контактных поверхностях на интенсивность напряжений для детали из стали 12X18H10T со следующими технологическими параметрами:  $d_1/d_2 = 0,7$ ,  $h_1/h_2 = 1,5$ ,  $t = 0,3 \dots 0,5$  мм,  $r_1, r_2, r_3, r_4 = 1$  мм,  $Q = 5$  кН.



1 –  $t = 0,5$  мм; 2 –  $t = 0,4$  мм; 3 –  $t = 0,3$  мм

Рисунок 5 – Зависимость интенсивностей напряжений от коэффициента трения

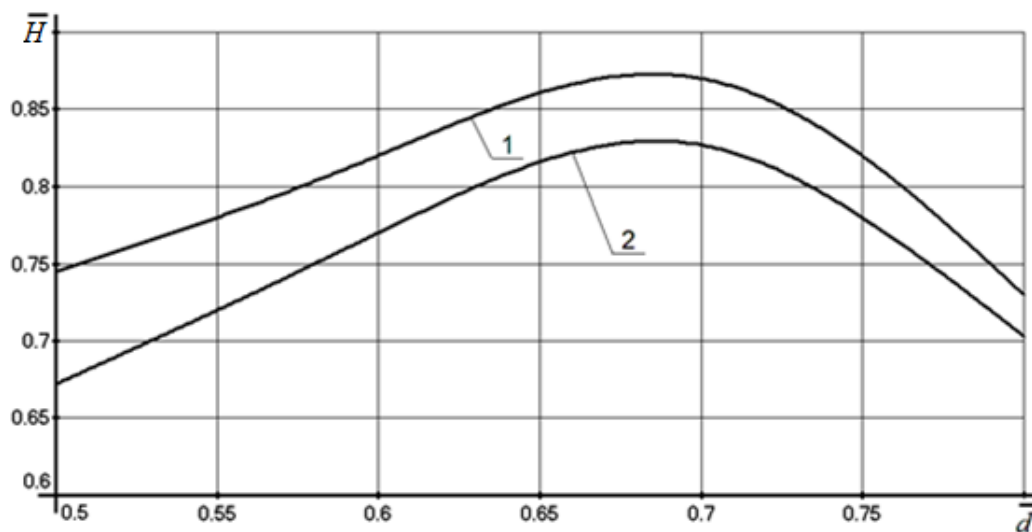
Из графика видно, что максимальная интенсивность напряжений выше для деталей с меньшей толщиной металла. Также следует отметить, что при изменении толщины материала характер зависимостей интенсивности напряжений от трения сохраняется.

Установлены зависимости относительной предельной высоты  $\bar{H}$  от относительного диаметра  $\bar{d} = d_1/d_2$  для каждого технологического маршрута для алюминия А5М и стали 12Х18Н10Т. На рисунке 6 приведены зависимости для первого технологического маршрута для следующих технологических параметров:  $h_1/h_2 = 0,5$ ,  $r_1, r_1, r_1, r_1 = 1$  мм,  $Q = 5$  кН.

Относительная предельная высота представляет собой отношение  $\bar{H} = H_{\text{расч}}/H_{\text{эр}}$ , где  $H_{\text{расч}}$  – предельная высота детали, рассчитанная с помощью метода конечных элементов,  $H_{\text{эр}}$  – предельная высота сферического купола (получаемого по методу Эриксона) диаметра, равного диаметру большей ступени детали, рассчитанная с помощью уравнения регрессии для данного материала и коэффициента трения. Использование относительной высоты  $\bar{H}$  позволяет находить предельную высоту для ступенчатых деталей различных габаритов с различными технологическими параметрами.

Также выявлено, что рациональная величина относительного диаметра  $\bar{d}$  для А5М и стали 12Х18Н10Т находится в диапазоне  $0,7 \dots 0,77$ . При превыше-

нии рационального значения  $\bar{d}$  предельная высота начинает снижаться из-за нехватки металла в очаге деформации.



1 – 12X18H10T, 2 – А5М

Рисунок 6 – Зависимость  $\bar{H}$  от коэффициента  $\bar{d}$

Рассмотрено влияние коэффициента трения на контактных поверхностях матрицы, пуансона и заготовки на предельную глубину вытяжки ступенчатых деталей из алюминия А5М и стали 12X18H10T различной толщины. Анализ полученных результатов показал, что с увеличением коэффициента трения с 0,05 до 0,4 предельная высота детали для алюминия А5М уменьшилась на 38...46 %, для стали 12X18H10T - на 35...42 %. Выявлено, что наибольшее влияние на операции вытяжки ступенчатых деталей оказывает коэффициент трения на пуансоне.

Рассмотрено влияние геометрических характеристик инструмента на предельную глубину вытяжки ступенчатой детали из алюминиевого сплава А5М и стали 12X18H10T. Установлено, что радиусы закругления инструмента существенно влияют на предельную высоту вытяжки ступенчатой детали: при изменении величины радиусов с 0,5 мм до 1 мм предельная высота вытяжки увеличилась на 27 ... 31%. Также выявлено, что наибольшее влияние на предельную высоту оказывает радиус  $r_2$ , наименьшее –  $r_1$ .

По результатам проведенного моделирования вытяжки ступенчатых деталей в ленте с защемлением фланца были получены регрессионные модели с целью определения относительной предельной высоты  $\bar{H}$  и предельной силы вытяжки  $P$  для алюминия А5М:

$$\bar{H} = 0,333 + 0,2016r - 0,1132\bar{h} + 0,406\bar{d};$$

$$P = 0,44265 - 0,043t + 0,00157d_2 - 0,6888\bar{d} + 0,1716td_2$$

и стали 12X18H10T:

$$\bar{H} = 0,3715 + 0,222r - 0,0635\bar{h} + 0,455\bar{d};$$

$$P = 2,98385 - 0,0995t - 0,00267d_2 - 4,776\bar{d} + 1,1983td_2.$$

С помощью данных уравнений можно устанавливать предельную высоту и предельную силу ступенчатой детали при штамповке в ленте с защемлением фланца, зная технологические параметры.

**В четвертом разделе** на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика определения рационального технологического режима изготовления осесимметричных ступенчатых деталей в ленте с защемлением фланца.

Методика включает в себя следующие этапы: оценка детали на технологичность, определение значений относительных высот для трех технологических маршрутов, определение глубины вытяжки по методу Эриксона, определение значений предельных высот ступенчатых деталей для трех технологических маршрутов, выбор способа вытяжки в ленте, расчет диаметра заготовки, расчет и разработка схемы раскроя ленты.

Для ступенчатой детали «Крышка» для электроэлементов (рисунок 7) разработана технологическая схема изготовления в ленте из нержавеющей стали X18H10T толщиной  $t = 0,3$  мм. Габаритные размеры детали: наружный диаметр фланца  $D = 12,8$  мм, высота детали  $H = 3,1$  мм, высота первой и второй ступеней  $h_1 = 1,3$  мм,  $h_2 = 1,5$  мм диаметры ступеней  $d_1 = 3,6$  мм и  $d_2 = 6,4$  мм.

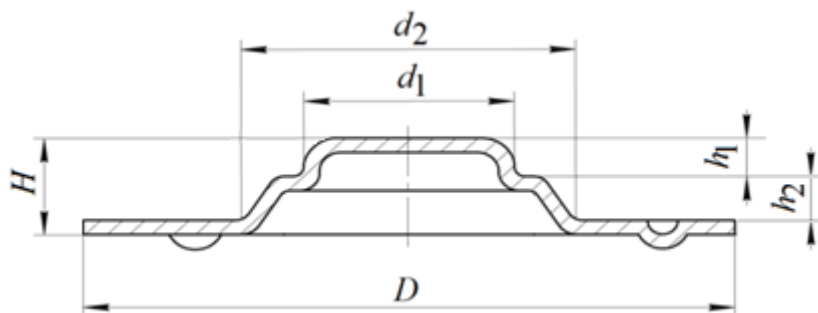


Рисунок 7 – Конфигурация ступенчатой детали

Для данной детали требуемая глубина вытяжки  $H_{выт} = H - t = 2,8$  мм. Определено соотношение диаметров ступеней  $\bar{d} = d_1/d_2 = 0,56$ , далее по уравнению регрессии  $\bar{H} = 0,3715 + 0,222r - 0,0635\bar{h} + 0,455\bar{d}$  найдена относительная высота  $\bar{H} = 0,794$ . По уравнению регрессии при коэффициенте трения  $\mu = 0,15$  для стали  $h_{отн} = 2,062t_{отн} + 0,409$  определена  $h_{отн} = 2,062 \cdot 0,3/6,4 + 0,409 = 0,5057$ . Следовательно, глубина вытяжки по Эриксону будет равна  $H_{эр} = 6,4 \text{ мм} \cdot 0,5057 = 3,24$  мм. Так как  $\bar{H} = H_{расч}/H_{эр}$ , то  $H_{расч} = 0,794 \cdot 3,24 \text{ мм} \approx 2,57$  мм. Данная глубина вытяжки недостаточна, поэтому был скорректирован коэффициент трения:  $\mu = 0,1$ . Используя уравнение регрессии при коэффициенте трения  $\mu = 0,1$  для стали  $h_{отн} = 2,414h_{отн} + 0,443$  после проведения необходимых вычислений была получена  $H_{расч} \approx 2,83$  мм.

Анализ показал, что деталь заданной конфигурации может быть изготовлена в ленте в условиях защемления фланца при соблюдении технологических параметров.

Исходя из выбранного технологического маршрута, диаметра заготовки, а также особенностей конфигурации изделия при штамповке в ленте в условиях

защемления фланца, был предложен следующий порядок операций (рисунок 8): кромку ленты подают в штамп до упора в матрицу шагового ножа 1, затем последовательно выполняют два ортогонально расположенных надреза 2 и 3 для устранения искажения полосы при дальнейшем ее формоизменении, затем производят вырубку бокового отхода для обеспечения точности шага подачи, пробивку отверстия 4, первую вытяжку меньшей ступени 5 и одновременно пробивку отверстий для ловителей, вытяжку второй большей ступени 6, формовку 7, калибровку, вырубку детали 8.

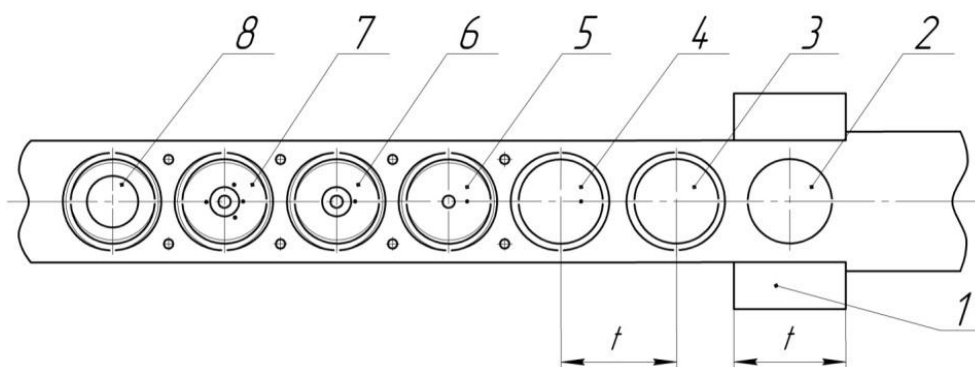


Рисунок 8 – Последовательность операций

На основе разработанной последовательности операций был спроектирован штамп-автомат для изготовления ступенчатых деталей и создана его 3-D модель (рисунок 9). На данный штамп получен патент как на полезную модель «Штамп для последовательной вытяжки в ленте».

Отличительными особенностями штампа являются: формовка выступов в противоположную вытяжке сторону и наличие отражателя локальной силы для компенсации перекосов ленты. Использование штампа позволяет повысить эффективность технологии изготовления детали «Крышка» на одном рабочем месте вместо двух и полностью автоматизировать штамповку.

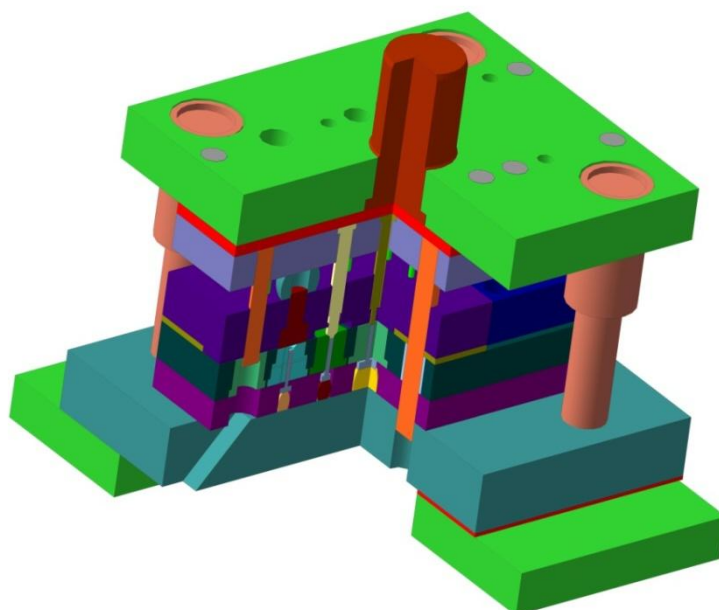


Рисунок 9 – 3-D модель штампа с разрезом

Была изготовлена, испытана и отлажена штамповая оснастка и получены детали заданной конфигурации. На рисунке 10 приведены деталь с дефектом и готовая деталь «Крышка». К основным дефектам при несоблюдении технологических параметров изготавливаемых деталей относятся надрывы при вытяжке первой и второй ступеней.



а



б

Рисунок 10 – Деталь «Крышка» с дефектом (а) и без дефекта (б)

**В заключении** приводятся основные результаты и выводы по выполненной работе.

**В приложениях** содержатся акты внедрения полученных результатов диссертационной работы в промышленности и учебном процессе.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная научно-техническая задача, имеющая значение для различных отраслей промышленности и состоящая в теоретическом обосновании рациональных технологических режимов операции вытяжки осесимметричных ступенчатых деталей в ленте, обеспечивающих снижение брака изделий, трудоемкости изготовления, сокращения сроков подготовки производства.

В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты и сделаны выводы.

1 Проведены испытания на предельную штампуемость при двухосном растяжении для алюминия А5М и стали 12Х18Н10Т толщиной 0,2...1 мм, установлены зависимости предельной высоты купола от диаметра пуансона для различных толщин материала и коэффициентов трения.

Методом статистической обработки результатов получены уравнения регрессии, позволяющие устанавливать предельную глубину вытяжки лунки по методу Эриксона для алюминия А5М и стали 12Х18Н10Т.

В результате сравнительного анализа данных, полученных экспериментальным методом и методом конечных элементов, установлено, что значения предельной глубины вытяжки лунки отличаются на 7...12 %.

2 Выполнены исследования вытяжки в ленте с защемлением фланца методом конечных элементов осесимметричных ступенчатых деталей для алюминия А5М и стали 12Х18Н10Т при различных толщинах и габаритных размерах.

Выявлены закономерности влияния геометрии инструмента, условий трения на контактных поверхностях, относительных диаметров ступеней, относи-

тельной высоты ступеней, толщины материала на интенсивность напряжений, интенсивность деформаций, силовые режимы, предельные высоты при изготовлении ступенчатых деталей в ленте. Установленные зависимости позволяют оценить степень влияния технологических параметров на вытяжку осесимметричных ступенчатых деталей в ленте.

3 Проведен анализ вариантов технологии формоизменения при вытяжке осесимметричных ступенчатых деталей в ленте с защемлением фланца. Установлено, что наиболее рациональным технологическим маршрутом, позволяющим получить наибольшую максимальную высоту, является первый (последовательная вытяжка от меньшей ступени к большей).

4 Проведено сравнение и определены закономерности значений глубины вытяжки по методу Эриксона с предельной высотой ступеней многоступенчатой детали для алюминия А5М и стали 12Х18Н10Т.

Для трех технологических маршрутов получены уравнения регрессии, позволяющие устанавливать высоту ступенчатой детали при известной глубине вытяжки по методу Эриксона.

5 Разработана методика определения рационального технологического режима изготовления осесимметричной ступенчатой детали в ленте в условиях защемления фланца на основе технологических испытаний по методу Эриксона и диаграммы предельной пластичности, позволяющая назначать режимы последовательного формоизменения при штамповке осесимметричных ступенчатых деталей вытяжкой в ленте в зависимости от геометрических соотношений диаметров осесимметричной ступенчатой детали, высот ступеней, толщины материала, коэффициентов трения.

6 Разработана штамповая оснастка для изготовления осесимметричных ступенчатых деталей в ленте в условиях защемления фланца с дополнительной формовкой лунок в противоположные вытяжке стороны, получен патент на полезную модель.

7 Предложенная технологическая схема изготовления осесимметричных ступенчатых деталей была востребована в опытном производстве на ОАО «ТНИТИ» (г. Тула) при проектировании технологических процессов, инструмента и оснастки для изготовления ступенчатых деталей «Крышка» для электроэлементов из стали 12Х18Н10Т толщиной 0,3 мм. Она обеспечивает уменьшение брака, сокращение сроков подготовки производства новых изделий в 1,2...1,3 раза, снижение трудоемкости изготовления деталей в 1,1...1,2 раза, повышение производительности в 2 раза.

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

1 Вилимок Я.А. Напряженное состояние плоских образцов при одноосном и двухосном растяжении / Я.А. Вилимок, К.А. Назаров, А.К. Евдокимов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. – Вып. 11. – С. 388-393.

2 Вилимок Я.А. Сравнительный анализ предельной штампуемости при двухосном растяжении / Я.А. Вилимок, А.К. Евдокимов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 7. – С. 71-75.

3 Вилимок Я.А. Критерий предельной штампуемости при вытяжке ступенчатых деталей из листа / Я.А. Вилимок // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 11. – С. 74-77.

4 Вилимок Я.А. Совершенствование штамповой оснастки для получения сложнопрофильных деталей из тонколистовых материалов / Я.А. Вилимок // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – Вып. 3. – С. 66-71.

5 Вилимок Я.А. Особенности вытяжки ступенчатых деталей / Я.А. Вилимок // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – Вып. 5. – С. 56-61.

6 Вилимок Я.А. Рациональные технологические параметры изготовления ступенчатых деталей из алюминиевого сплава / Я.А. Вилимок, С.Н. Ларин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – Вып. 4. – С. 26-30.

7 Вилимок Я.А. Особенности изготовления ступенчатых деталей из тонколистовых материалов / Я.А. Вилимок, С.Н. Ларин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – Вып. 6. – С. 18-23.

8 Вилимок Я.А. Листовая штамповка сложнопрофильных деталей / Я.А. Вилимок // XXXVIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации»: сборник тезисов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – С.5-7.

9 Вилимок Я.А. Проблемы изготовления сложнопрофильных деталей из листовых материалов / Я.А. Вилимок // VII Региональная молодежная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодежные инновации»: сборник докладов под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. Е.А. Ядыкина: в 3 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Ч. I. – С. 49-50.

10 Вилимок Я.А. Использование моделей при проектировании штамповой оснастки / Я.А. Вилимок // XXXIX ГАГАРИНСКИЕ ЧТЕНИЯ. Научные труды Международной молодежной научной конференции: в 9 т. – М.: МАТИ, 2013. Т.1. – С. 190-191.

11 Вилимок Я.А. Анализ деформированного состояния листовой заготовки при вытяжке ступенчатых деталей / Я.А. Вилимок // Всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации»: сборник тезисов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – С. 4-6.

12 Вилимок Я.А., Евдокимов А.К. Штмп для последовательной вытяжки в ленте // Патент России № 135948. 2013. Бюл. № 36.

Подписано в печать \_\_.\_\_.2018.

Формат бумаги 60 × 84  $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 0,9. Уч.-изд. л. 0,8.

Тираж 100 экз. Заказ \_\_

Тульский государственный университет.  
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ.  
300012, г. Тула, просп. Ленина, 93 а.