

На правах рукописи

Луканова Евгения Олеговна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
КОНИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ СОВМЕЩЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ
ОБЖИМА, РАЗДАЧИ, ВЫТЯЖКИ И ОТБОРТОВКИ**

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

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

Официальные оппоненты: **Сосенушкин Евгений Николаевич**
доктор технических наук, профессор кафедры систем пластического деформирования ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Шпунькин Николай Фомич
кандидат технических наук, профессор кафедры обработки материалов давлением и аддитивных технологий ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Защита состоится « 28 » _____ марта _____ 2023 г. в _____ ч. _____ мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.01 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.01
кандидат технических наук, доцент



Плохих А.И.

Актуальность темы:

В различных отраслях промышленности имеют широкое распространение детали типа конус и конус с раструбом, изготавливаемые методами обработки давлением (например, переходники, которые позволяют осуществлять стыковку труб разного диаметра). Получение подобных деталей последовательными переходами вытяжки требует изготовления большого количества штампов, что связано со значительными экономическими затратами и отличается высокой трудоемкостью. Отдельными операциями раздачи или обжима невозможно получить значительные перепады диаметров. Среди операций совмещения можно выделить способ получения указанных деталей посредством совмещения операций обжима и раздачи трубных заготовок, но данный способ ограничен максимальным формоизменением (в пределах 2). Совмещением трех операций обжима, раздачи и вытяжки максимальное практическое формоизменение достигает 2,8.

Совмещение операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки в одном штамповочном переходе позволяет добиться существенного увеличения формоизменения, что расширяет технологические возможности способа и сокращает затраты на штамповую оснастку.

Литературный обзор показал, что совмещение четырех операций (обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки) в одном штамповочном переходе лишь упоминается как возможный способ интенсификации процессов листовой штамповки, однако никаких теоретических или практических исследований проведено не было, что делает данную тему весьма актуальной.

Цель работы – повышение эффективности изготовления конических пустотелых осесимметричных деталей за счет увеличения максимального коэффициента формоизменения путем совмещения операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки в одном штамповочном переходе, обеспечивающего уменьшение числа переходов штамповки и сокращение затрат на производство.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- разработать технологический процесс изготовления пустотелых конических деталей, включающий совмещение операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки в одном штамповочном переходе;
- установить зависимости для определения напряжений, возникающих в заготовке при осуществлении совмещения операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки в одном штамповочном переходе;
- установить математические зависимости для определения размеров исходной и промежуточной заготовок (высоту и диаметр предварительно вытянутого стакана, а также пробитого в его доньшке отверстия);
- исследовать закономерности формоизменения в совмещенном процессе «обжим – раздача – вытяжка – отбортовка»;
- спроектировать экспериментальную штамповую оснастку и выполнить экспериментальную проверку основных теоретических положений путем физического эксперимента;
- разработать рекомендации по расчету и проектированию совмещенного технологического процесса обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки в одном штамповочном переходе.

Область исследований (по паспорту специальности). Технологии листовой штамповки.

Объектом исследования являются процессы получения тонкостенных конических деталей из листовых заготовок.

Предметом исследования являются условия совмещения операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки в одном штамповочном переходе.

Научная новизна:

1) выявлены закономерности влияния основных технологических параметров на характер деформирования и конечную форму изделия в совмещенном процессе обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки;

2) определены границы применимости процесса совмещения операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки в одном технологическом переходе, при которых процесс не теряет стабильность;

3) получены зависимости для определения геометрических размеров исходной и промежуточной заготовок;

4) проанализированы результаты математического моделирования совмещенного процесса в программном комплексе AutoForm.

Практическая значимость заключается в разработанной методике проектирования и рекомендации по расчету технологических параметров получения пустотелых конических деталей с использованием совмещения операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки в одном технологическом переходе, обеспечивающего интенсификацию процесса штамповки, уменьшение трудоемкости и металлоемкости изготовления подобных деталей.

Реализация работы:

Предложенные рекомендации по расчету технологических параметров совмещения операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки учтены при разработке новых конструкций и технологий изготовления фильтров подготовки воздуха для рельсового транспорта ООО «Производственная компания РУСИН-ВЕСТПРОМ». Использование предложенной технологии при получении пустотелых конических деталей с большим перепадом диаметров позволяет уменьшить число сварных швов, что снижает гидравлические потери.

Методы исследования:

1. Анализ напряженного и деформированного состояний заготовки в совмещенном процессе обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки осуществлен аналитически с помощью инженерного метода и численно методом конечных элементов в специализированном программном комплексе AutoForm.

2. Экспериментальные исследования для практической проверки теоретических зависимостей и адекватности результатов математического моделирования выполнены с использованием испытательной машины INSTRON DX600 и регистрирующей аппаратуры.

Положения, выносимые на защиту:

- полученные зависимости для определения геометрических размеров исходной и промежуточной заготовок;

- выявленные границы применения процесса совмещения операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки;

- выявленные закономерности влияния основных технологических параметров на характер деформирования и конечную форму изделия в совмещенном процессе обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки;

- методика проектирования технологических процессов получения пустотелых конических деталей с использованием совмещения операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки в одном технологическом переходе штамповки.

Степень достоверности:

Для достоверности получения результатов были использованы современные методы исследования, включающие вычислительные эксперименты с применением метода конечных элементов в программном комплексе AutoForm и физические эксперименты, выполненные на кафедре МТ-6 МГТУ им. Н.Э.Баумана на испытательной машине INSTRON DX600. Результаты теоретических исследований качественно и количественно согласовываются с экспериментальными данными.

Личный вклад состоит в:

- постановке задач исследования;

- проведении аналитического обзора российских и зарубежных работ, относящихся к теме исследования;

- разработке технологического процесса изготовления пустотелых конических деталей, включающего совмещение операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки в одном штамповочном переходе;

- выполнении математического моделирования процесса совмещения операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки и определении закономерностей формоизменения в совмещенном процессе в зависимости от технологических параметров процесса;

- разработке методики проектирования совмещенного процесса «обжим – раздача – вытяжка – отбортовка»;

- выполнении экспериментального исследования совмещенного процесса обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки для конических деталей и сопоставлении результатов моделирования и экспериментального исследования;

- в обработке и анализе экспериментальных данных.

Апробация работы:

Результаты исследований доложены на Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна 2012: Машиностроительные технологии» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012), на Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна 2013: Машиностроительные технологии» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013), на 63-й Открытой студенческой научно-технической конференции «СНТК Университета Машиностроения 2013» (Москва МАМИ, 2013), на Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна 2015: Машиностроительные технологии» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015), на Восьмой Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015), на XIII конгрессе «Кузнец-2017» (Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2017), на Одиннадцатой

Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018), на IV Международной научно-производственной конференции, приуроченной ко Дню Российской науки и 35-летию АО «Ульяновский НИАТ» (Ульяновск: УлГТУ, 2019), на Двенадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019).

Публикации

Основное содержание диссертационной работы изложено в 12 научных работах, в том числе 3 изданиях, рекомендованных ВАК РФ, общим объемом 5,86 печ. л.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 167 наименований. Текст диссертации содержит 198 машинописных страниц, включая 19 таблиц и 96 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение включает в себя такие структурные элементы, как актуальность темы исследования, степень ее разработанности, цель и задачи, научная новизна, практическая значимость работы, методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов работы.

В Главе 1 рассмотрено современное состояние теоретических и экспериментальных исследований операций обжима, раздачи и их совмещения, операций вытяжки, отбортовки и их совмещения, а также совмещения вытяжки, обжима и раздачи в одном штамповочном переходе для получения деталей с раструбом. Обоснована постановка задач исследований.

Рассмотрены теоретические и практические подходы к вопросам анализа элементарных операций листовой штамповки, а также их совмещения, таких ученых, как Е.А. Попов, М.Н. Горбунов, Ю.А. Аверкиев, И.Н. Шубин, С.А. Евсюков, С.С. Яковлев, О.В. Попов, В.Н. Фролов, Ю.Г. Розов, А.Г. Овчинников, С.П. Яковлев, В.Г. Ковалев, В.П. Романовский, А.Д. Матвеев, Z. Marciniak и многих других. В работах этих ученых проанализировано напряженное и деформированное состояние заготовок, подвергающихся раздаче, обжиму, вытяжке и отбортовке, проведены исследования данных элементарных операций и их совмещения, даны рекомендации по проектированию производства деталей вышеуказанными способами. Совмещению операций раздачи, обжима и вытяжки в одном штамповочном переходе посвящены работы А.А. Сулеймана, С.А. Евсюкова и И.Н. Шубина.

В Главе 2 проведен анализ напряженного и деформированного состояний заготовки при совмещении операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки инженерным методом. В качестве промежуточной заготовки взят предварительно вытянутый стакан с отверстием в доньшке.

Анализ проводился с точки зрения плоского напряженного состояния с помощью совместного решения упрощенных уравнений равновесия с условием пластичности максимальных касательных напряжений.

На основе анализа напряженного состояния для получения совмещением операций деталей с внутренним цилиндрическим пояском (Рисунок 1) получены зависимости для определения параметров промежуточной заготовки. А именно радиуса стакана R_0 – по формуле (1), высоты стакана H_0 – по формуле (2) и радиуса пробитого в доньшке стакана отверстия r_0 – по формуле (3):

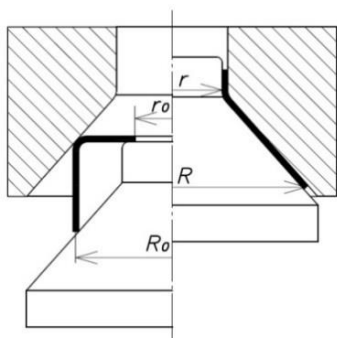


Рисунок 1. Схема для детали с горловиной по меньшему диаметру

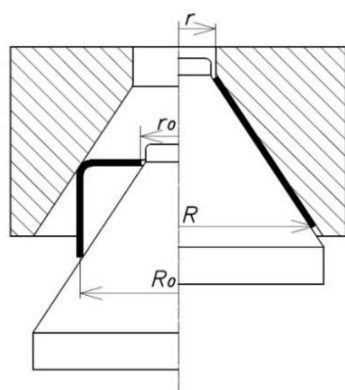


Рисунок 2. Схема для детали без горловины по меньшему диаметру

$$R_0 = 0,125(4R + r + \sqrt{(8R + r) \cdot r}), \quad (1)$$

где R и r – наибольший и наименьший радиусы получаемой совмещением детали соответственно.

$$H_0 = \frac{F_{\text{дет}} - \pi(R_0^2 - r_0^2)}{2\pi R_0}, \quad (2)$$

где $F_{\text{дет}}$ – площадь поверхности получаемой детали.

$$r_0 = r \left[1 - \frac{(1 + \mu \cdot \text{ctg } \alpha)}{(1 + \mu \alpha)} \left(1 - \frac{r}{\sqrt{0,125(4R + r + \sqrt{(8R + r) \cdot r})r}} \right) \right], \quad (3)$$

где μ – коэффициент трения, α – угол раструба получаемой детали.

При анализе напряженного состояния для получения совмещением операций деталей без горловины по меньшему диаметру (Рисунок 2) также были получены зависимости для определения параметров заготовки: радиуса пробитого в доньшке стакана отверстия r_0 – по формуле (4), радиуса стакана R_0 – по формуле (5) и высоты стакана H_0 – по формуле (3):

$$r_0 = r \left[1 - \frac{(1 + \mu \cdot \text{ctg } \alpha)}{(1 + \mu \alpha)} \left(1 - \frac{R_{\text{гр}}^{\text{отб}}}{\sqrt{0,125(4R + R_{\text{гр}}^{\text{отб}} + \sqrt{(8R + R_{\text{гр}}^{\text{отб}}) \cdot R_{\text{гр}}^{\text{отб}} \cdot R_{\text{гр}}^{\text{отб}}})}} \right) \right] \quad (4)$$

где $R_{\text{гр}}^{\text{отб}}$ – радиус границы между областями вытяжки и отбортовки.

$$R_0 = 0,125(4R + R_{\text{гр}}^{\text{отб}} + \sqrt{(8R + R_{\text{гр}}^{\text{отб}}) \cdot R_{\text{гр}}^{\text{отб}}}). \quad (5)$$

С помощью уравнения связи напряжений и приращений деформаций для плоского напряженного состояния были получены зависимости для определения толщины и длины раздаваемой, обжимаемой, вытягиваемой и отбортованной частей как для деталей с горловинами, так и без них.

Также было установлено, что толщина стенки и длина образующей зависят от коэффициента формоизменения, трения и угла конусности детали и практически не зависят от свойств материала заготовки.

Глава 3 посвящена исследованию закономерностей формоизменения в совмещенном процессе «обжим – раздача – вытяжка – отбортовка» и определению границ применимости данного процесса, выполненному методом конечных элементов с помощью программного комплекса для моделирования процессов

листовой штамповки AutoForm. Создание штамповых инструментов и поверхности для вырубки необходимого отверстия проводилось в программе SolidWorks. За основу были взяты детали с внешней и внутренней горловинами и без них из стали DC04 (российский аналог – 08кп) толщиной 1мм.

Рассмотрено получение детали как с цилиндрическими поясками, так и без них.

Для установления основных зависимостей протекания процесса совмещения операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки от различных факторов было проведено моделирование с изменением относительной толщины заготовки, коэффициента трения, технологического зазора между инструментами и с применением различных материалов заготовки.

В качестве одного из варьируемых параметров была взята относительная толщина исходной заготовки $S_{отн} = S_{заг} / D_{заг}$ (где $S_{заг}$ – толщина исходной заготовки, $D_{заг}$ – диаметр исходной круглой заготовки). С помощью моделирования были установлены границы для относительной толщины исходной заготовки, обеспечивающих получение деталей без разрывов: для деталей без цилиндрических поясков – от 0,004 до 0,028; для деталей с цилиндрическими поясками – от 0,005 до 0,028. Рекомендованными толщинами (без зон риска разрывов и появления трещин в процессе формоизменения) являются для деталей без цилиндрических поясков – от 0,009 до 0,019; для деталей с цилиндрическими поясками – от 0,009 до 0,023.

При увеличении относительной толщины исходной заготовки растет сила деформирования (Рисунок 3), необходимая для осуществления формоизменения, увеличивается максимальное относительное утонение $(S_{факт\ min} - S_{заг}) / S_{заг}$ (где $S_{факт\ min}$ – минимальная толщина полученной детали) и снижается максимальное относительное утолщение полученной детали $(S_{факт\ max} - S_{заг}) / S_{заг}$ (где $S_{факт\ max}$ – максимальная толщина полученной детали) (Рисунок 4).



Рисунок 3. Зависимости силы деформирования от относительной толщины исходной заготовки



Рисунок 4. Зависимости максимального относительного утолщения и утонения полученной детали от относительной толщины исходной заготовки

Одним из важных факторов, влияющих на процесс формоизменения в листовой штамповке, является выбор материала. Для сравнения было проведено моделирование процесса совмещения операций раздачи, обжима, вытяжки и отбортовки, используя заготовки из стали DC04 (российский аналог – 08кп), стали AISI 304 (российский аналог – 08X18H10) и алюминиевого сплава 5056 (российский аналог – АМг5). Установлено, что у деталей без цилиндрических поясков для стали 08X18H10 в отличие от стали 08кп диапазон применимых относительных толщин, при которых не образуется зон разрывов, несколько шире – от 0,009 до 0,038. Для деталей с цилиндрическими поясками для стали 08X18H10 диапазон применимых относительных толщин уже, чем для стали 08кп – от 0,008 до 0,023. Рекомендованными относительными толщинами для стали 08X18H10 являются для детали без цилиндрических поясков от – 0,009 до 0,023, для детали с цилиндрическими поясками – от 0,008 до 0,014 (Рисунок 5).

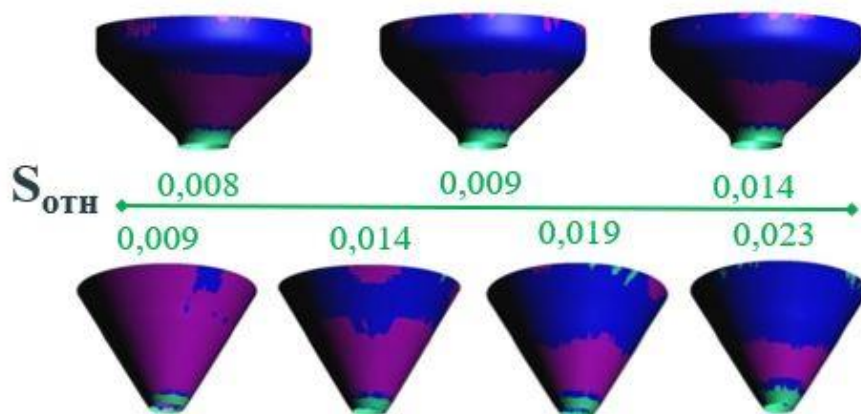


Рисунок 5. Получение деталей из стали 08X18H10

Для деталей без цилиндрических поясков из алюминиевого сплава АМг5 узкий диапазон применимых относительных толщин – от 0,006 до 0,012. Для деталей с цилиндрическими поясками диапазон применимых относительных – от 0,007 до 0,011. Для сплава АМг5 образуются зоны риска на краю заготовки по меньшему диаметру в области отбортовки для любой исходной относительной толщины (Рисунок 6). В данных областях есть опасность возникновения разрыва заготовки. Поэтому применение совмещенной операции для заготовок из сплава АМг5 рекомендуется для получения деталей с перепадом диаметров не более 3.

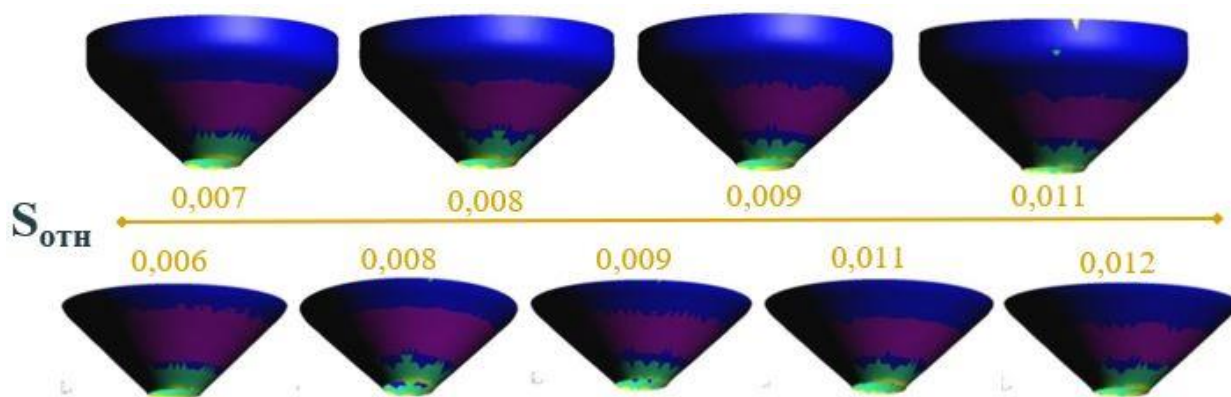


Рисунок 6. Получение деталей из алюминиевого сплава АМг5

Необходимая сила деформирования, как для деталей с цилиндрическими поясками, так и без них, для стали 08Х18Н10 выше, чем для стали 08кп и для сплава АМг5.

Для каждой отдельной операции листовой штамповки существуют свои рекомендации по величине технологического зазора между инструментом. Однако при осуществлении совмещения операций обжим, раздача, вытяжка и отбортовка нельзя дать однозначной рекомендации по данному вопросу без проведения дополнительного исследования. В связи с этим было проведено моделирование совмещенной операции при зазорах, равных $z = s(1 + x)$, где s – толщина заготовки, $x = (0,03 \dots 0,3)$. В ходе моделирования было обращено внимание на изменение толщины заготовки при изменении зазора. Максимальное относительное утолщение находится в зоне обжима и меняется не более, чем на $0,01s$, в зависимости от величины зазора. Для деталей без цилиндрических поясков максимальное относительное утолщение значительно больше, чем для деталей без них. Максимальное относительное утонение отличается до $0,06s$ в зависимости от зазора, что объясняется зоной его возникновения. Максимальное относительное утонение может находиться в области вытяжки или отбортовки для деталей с цилиндрическими поясками, в области отбортовки, раздачи или вытяжки для деталей без цилиндрических поясков (Рисунок 7).

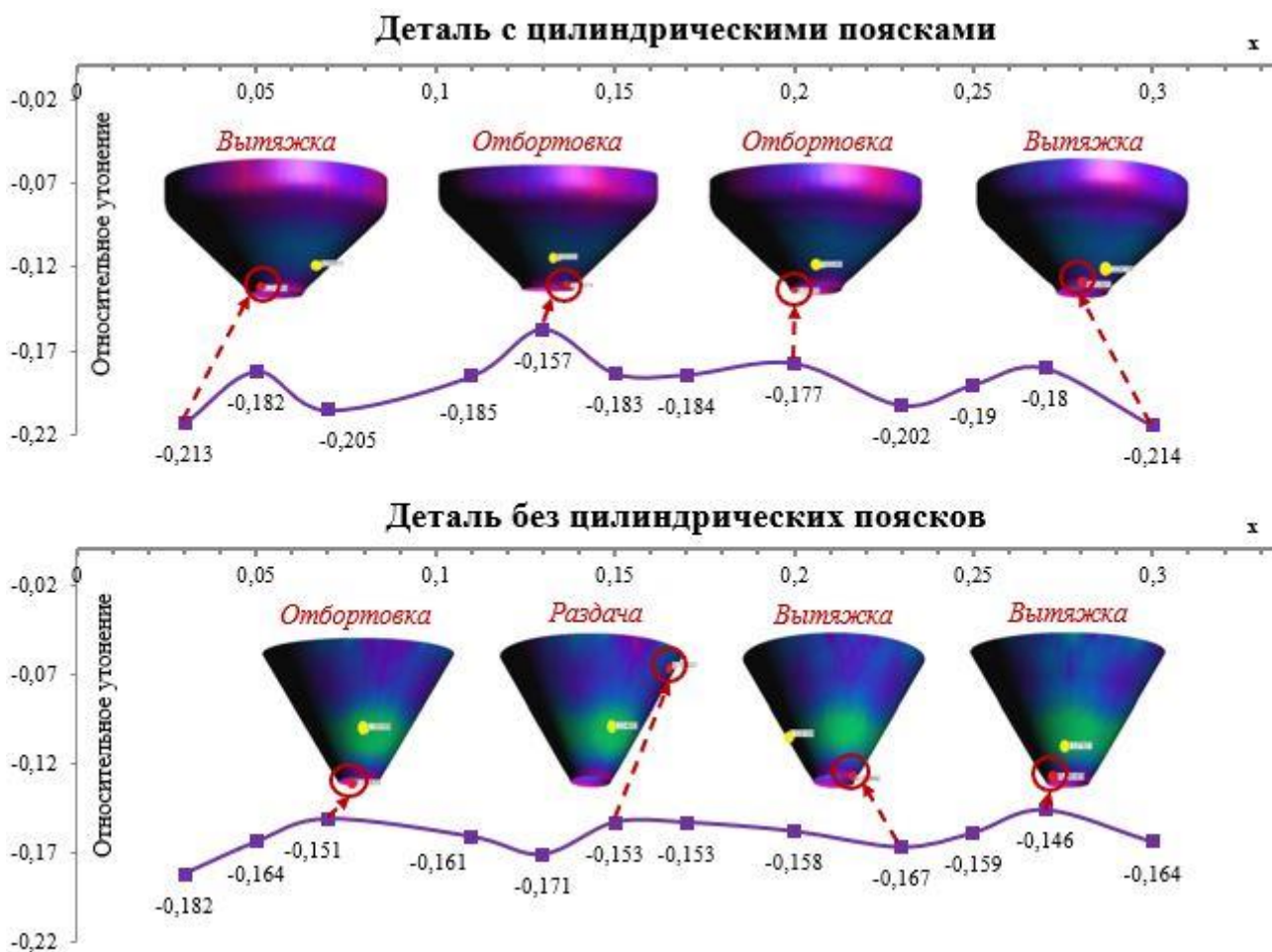


Рисунок 7. Зависимости максимального относительного утонения от величины технологического зазора

Для детали с цилиндрическими поясками максимальная относительная разнотолщинность (перепад между максимальными относительными утолщением и утонением) возникает при технологическом зазоре $1,3s$ и равна $0,25$ (Рисунок 8). Минимальная разнотолщинность образуется при зазоре $1,13s$ и составляет $0,194$. При этом же зазоре возникает минимальное значение наибольшего относительного утонения, которое равно $0,157$, минимальное значение наибольшего относительного утолщения равно $0,029$ и возникает при величине зазора, равной $1,07s$. Для деталей без цилиндрических поясков наибольшая разнотолщинность равна $0,306$ и возникает при зазоре $1,03s$, наименьшие разнотолщинности равны $0,274$ и $0,278$ при зазорах $1,27s$ и $1,15s$ соответственно. С учетом сказанного рекомендуется применять технологический зазор между матрицей и пуансоном в диапазоне от $1,13s$ до $1,15s$.

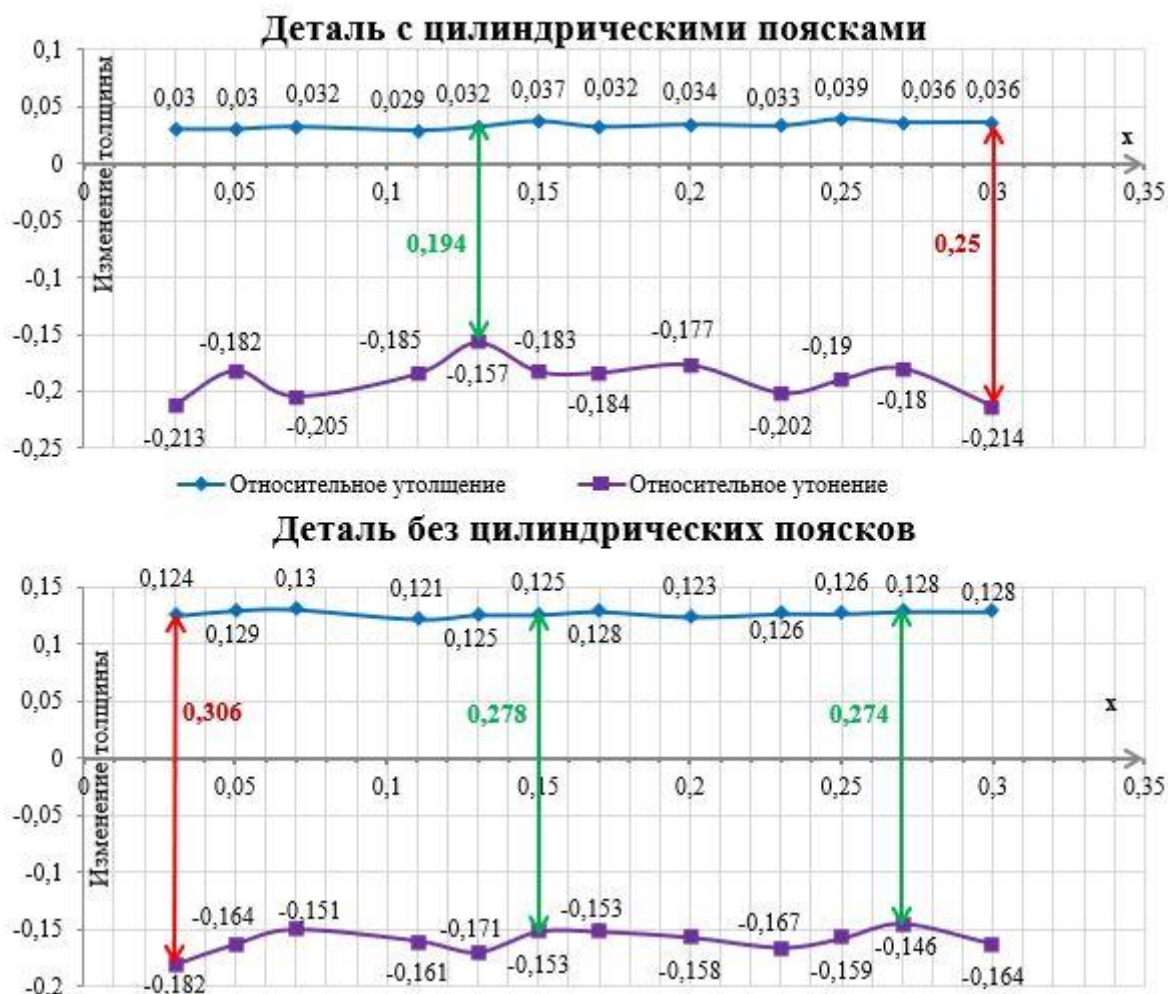


Рисунок 8. Зависимости максимального относительного утонения и утолщения детали от величины технологического зазора

В полученные аналитическим путем зависимости (4) и (5) для определения параметров промежуточной заготовки, из которой происходит получение детали без горловины по меньшему диаметру, входит граничный радиус между областями вытяжки и отбортовки $R_{гр}^{отб}$, для определения которого был проведен ряд моделирований. В результате получен график, показанный на Рисунке 9, где $R_{гр}$ – радиус границы между областями вытяжки и отбортовки, R и r – наибольший и наименьший радиусы полученной совмещением детали соответственно.

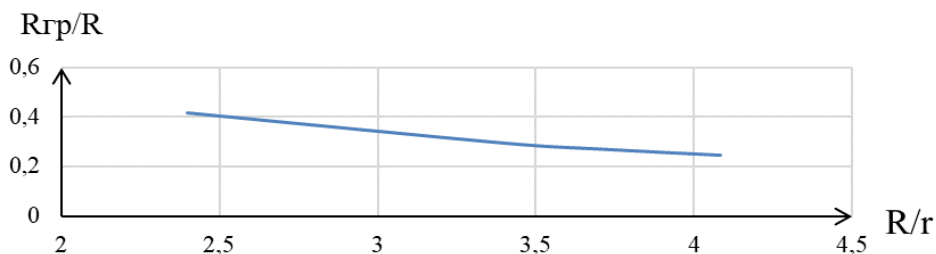


Рисунок 9. Зависимость $R_{гр}/R$ от R/r

Проведенное сравнение расчетов на основе зависимостей, полученных аналитически в главе 2, и моделирования для деталей из стали 08кп, стали

08X18H10, алюминиевого сплава АМг5 показало, что наибольшую максимальную разницу в расчетах составляет диаметр отверстия: для стали 08кп – 12,3%, для стали 08X18H10 – 12,5%, для сплава АМг5 – 12,8% (Рисунок 10).

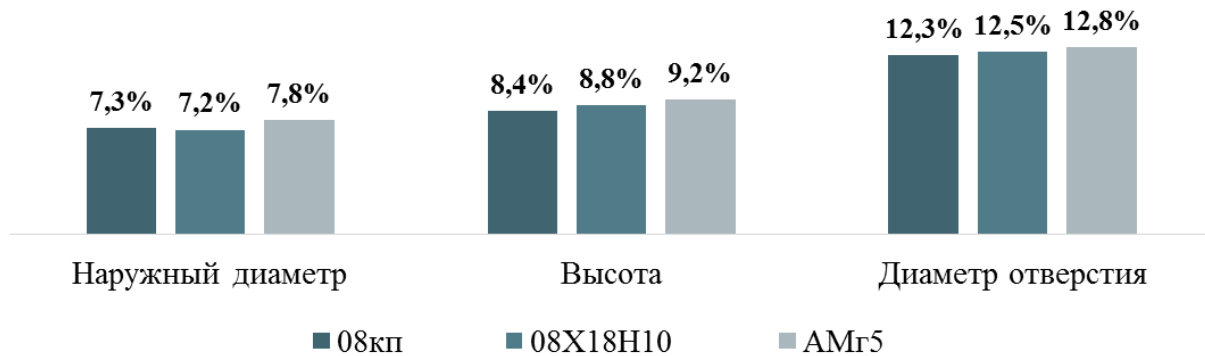


Рисунок 10. Максимальное отклонение результатов моделирования при определении размеров заготовки от аналитического расчета

Максимальное отклонение для высоты предварительно вытянутого стаканчика составляет: для стали 08кп – 8,4%, для стали 08X18H10 – 8,8%, для сплава АМг5 – 9,2%. Наименьшую максимальную разницу составляет наружный диаметр стаканчика: для стали 08кп – 7,3%, для стали 08X18H10 – 7,2%, для сплава

АМг5 – 7,8%. Также установлено, что свойства материала не оказывают значительного воздействия на определение исходных размеров заготовки для совмещенной операции.

В Главе 4 приведены результаты экспериментального исследования совмещенного процесса операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки. Исследование проводилось на гидравлической машине Instron 600DX. Экспериментальный штамп для совмещенной операции показан на Рисунке 11, где 1 – матрица, 2 – пуансон, 3 – обойма, 4 – полученная деталь.

Для вытяжки стаканчика были взяты плоские заготовки из стали 08кп толщиной 1 мм. Экспериментально полученные стаканчики с отверстием в доньшке показаны на Рисунке 12, где стаканчики а и в – с обрезкой торцов, б – без обрезки торцов (высота



Рисунок 11. Экспериментальный штамп

взята средняя). Совмещением в одном переходе операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки из промежуточных заготовок были получены детали, показанные на Рисунке 12. При этом можно отметить, что коэффициенты формоизменения (K_{Σ}) получены следующие: а) 3,2; б) 3,7; в) 3,5.



Рисунок 12. Полученные вытяжкой стаканчики с отверстием в доньшке высотой: а) 24,8 мм; б) 33,4 мм; в) 31 мм и полученные совмещением детали из них

Сравнение результатов эксперимента, моделирования и расчетов по формулам, полученным инженерным методом, для детали, показанной на Рисунке 12а, представлено в Таблице 1. Можно отметить хорошую сходимость результатов физического эксперимента как с моделированием (для полученных размеров максимальная разница составляет 3,6%, для коэффициента формоизменения совмещенной операции – 5,43%), так и с инженерным методом (максимальная разница – 11,02%).

Таблица 1
Сравнение результатов эксперимента с моделированием и расчетами инженерным методом для детали с перепадом диаметров 3,2

	Эксперимент, мм	Моделирование, мм	Разница, %	Аналит. формулы, мм	Разница, %
Стаканчик (после обрезки торцов)					
Наружный диаметр	51,4	-	-	47,3	7,98
Высота	24,8	-	-	24,25	2,22
Диаметр отверстия	11,8	-	-	10,5	11,02

	Эксперимент, мм	Моделирование, мм	Разница, %	Аналит. формулы, мм	Разница, %
Конус					
Наружный диаметр	63,4	64,7	2	-	-
Внутренний диаметр	19,7	19,0	3,6	-	-
Длина образующей	40,4	40,3	0,25	-	-
Коэффициент K_{Σ}	3,22	3,41	5,43	-	-

Для детали, показанной на Рисунке 12б сравнение результатов представлено в Таблице 2. По результатам можно также отметить хорошую сходимость результатов физического эксперимента как с моделированием (для полученных размеров максимальная разница составляет 5,91%, для коэффициента формоизменения совмещенной операции – 6,36%), так и с инженерным методом (максимальная разница – 12,29%). В данном эксперименте получен наибольший коэффициент формоизменения при совмещении операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки – 3,7.

Таблица 2

Сравнение результатов эксперимента с моделированием и расчетами инженерным методом для детали с перепадом диаметров 3,7

	Эксперимент, мм	Моделирование, мм	Разница, %	Аналит. формулы, мм	Разница, %
Стаканчик (без обрезки торцов)					
Наружный диаметр	51,4	-	-	49,4	3,89
Средняя высота	33,43	-	-	30,07	10,05
Диаметр отверстия	11,8	-	-	10,35	12,29
Конус					
Наружный диаметр	68,5	68,75	0,36	-	-
Внутренний диаметр	18,6	17,5	5,91	-	-
Средняя длина образующей	47,5	48,75	2,56	-	-
Коэффициент K_{Σ}	3,68	3,93	6,36	-	-

Для детали на Рисунке 12в сравнение результатов представлено в Таблице 3. По результатам можно отметить наилучшую сходимость результатов физического эксперимента как с моделированием (для полученных размеров максимальная разница составляет 2,5%, для коэффициента формоизменения совмещенной операции – 4,57%), так и с инженерным методом (максимальная разница – 8,31%).

Таблица 3

Сравнение результатов эксперимента с моделированием и расчетами инженерным методом для детали с перепадом диаметров 3,5

	Эксперимент, мм	Моделирование, мм	Разница, %	Аналит. формулы, мм	Разница, %
Стаканчик (после обрезки торцов)					
Наружный диаметр	51,4	-	-	48,86	4,94
Средняя высота	31	-	-	28,76	7,23
Диаметр отверстия	11,8	-	-	10,82	8,31
Конус					
Наружный диаметр	67,25	69	2,5	-	-
Внутренний диаметр	19	18,6	2,11	-	-
Средняя длина образующей	45,75	45,6	0,33	-	-
Коэффициент K_{Σ}	3,54	3,71	4,57	-	-

Максимальная разница для силы деформирования получена при получении детали с перепадом диаметров 3,5 и составляет 14%.

Физические эксперименты показали хорошую сходимость результатов с моделированием и удовлетворительную точность полученных инженерным методом формул для определения размеров промежуточной заготовки, необходимой для последующего получения детали с определенными размерами совмещенной операцией.

В Главе 5 представлена методика проектирования технологического процесса получения деталей совмещением операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки, которая позволяет определять размеры заготовки по переходам без дополнительного математического моделирования.

В соответствии с разработанным алгоритмом сначала задаются исходные данные (материал, размеры детали, которую необходимо получить и т.д.). В зависимости от формы и геометрических размеров получаемой детали определяются размеры промежуточной заготовки по зависимостям (1), (2), (3), (4), (5), полученным инженерным методом.

Далее определяется диаметр исходной круглой заготовки исходя из равенства площадей поверхности промежуточной и исходной заготовок.

Рассчитывается относительная толщина заготовки для принятия решения о применимости процесса совмещения четырех операций в одном штамповочном переходе на основе установленных методом конечных элементов границ применимости процесса.

Определяются исполнительные размеры штамповой оснастки. Затем, ориентируясь на имеющееся в наличии оборудование, расчете необходимой силы деформирования, нормативных данных и т.д., инженер-технолог выбирает тип оборудования для осуществления процесса, инженер-конструктор проектирует

штамповую оснастку, и оформляется соответствующая технологическая документация. При этом технологический зазор между пуансоном и матрицей при проектировании штамповой оснастки задается в рекомендуемом на основе исследования диапазоне.

Общие выводы:

В диссертационной работе изложены научно обоснованные технологические решения, направленные на совершенствование процессов изготовления конических пустотелых осесимметричных деталей путем увеличения максимального коэффициента формоизменения за счет совмещения операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки в одном штамповочном переходе, обеспечивающего уменьшение числа переходов штамповки и сокращение затрат на производство, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие машиностроения.

1. Проведенный анализ современного состояния технологий изготовления конических тонкостенных деталей показал, что основные усилия исследователей были направлены на изучение совмещения двух (в редких случаях трех) операций. Работ, посвященных рассмотрению совмещения операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки в одном штамповочном переходе, не обнаружено, и поэтому закономерности, присущие указанному процессу, не исследованы.

2. Разработанный технологический процесс изготовления пустотелых конических деталей, включающий совмещение операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки в одном штамповочном переходе, позволяет обеспечить коэффициент формоизменения (3,7), что в 1,3 раза превышает формоизменение при совмещении трех операций (раздачи, обжима и вытяжки), для которых максимально полученный коэффициент формоизменения равен 2,8.

3. Полученные с помощью инженерного метода зависимости для напряжений позволили получить формулы для определения высоты, а также радиусов предварительно вытянутого стаканчика и пробитого в нем отверстия, которые обладают достаточной для практики точностью. Максимальная разница для определения геометрических размеров промежуточной заготовки составляет 12,29%.

4. Установлено, что толщина стенки и длина образующей детали, полученной совмещением операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки, зависят от коэффициента формоизменения, трения и угла конусности детали и практически не зависят от свойств материала заготовки.

5. Выявлено, что границы для относительной толщины исходной заготовки, обеспечивающие получение конической осесимметричной пустотелой детали посредством совмещения операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки из стали 08кп без образования дефектов находятся в следующих пределах: для детали без цилиндрических поясков – это от 0,004 до 0,028; для детали с цилиндрическими поясками – от 0,005 до 0,028.

6. Установлено, что с увеличением относительной толщины исходной заготовки увеличивается максимальное относительное утонение и снижается максимальное относительное утолщение полученной детали. Максимальное относи-

тельное утолщение лежит в зоне обжима, а максимальное относительное утонение может находиться в зонах отбортовки, вытяжки или раздачи в зависимости от относительной толщины исходной заготовки.

7. Показано, что у деталей без цилиндрических поясков для стали 08X18H10 в отличие от стали 08кп диапазон применимых относительных толщин, при которых не образуется зон разрывов, несколько шире и составляет от 0,009 до 0,038. Для алюминиевого сплава АМг5 диапазон применимых относительных толщин очень узкий – от 0,006 до 0,012. У деталей с цилиндрическими поясками для стали 08X18H10 диапазон применимых относительных толщин уже, чем для 08кп – от 0,008 до 0,023, для алюминиевого сплава АМг5 – от 0,007 до 0,011.

8. Установлено, что разработанная модель процесса получения конических деталей совмещением операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки в программном комплексе AutoForm обеспечивает при определении геометрических размеров заготовки точность до 5,91%, что позволяет использовать ее для определения допустимых границ применимости процесса совмещения четырех операций в одном технологическом переходе, при которых процесс не теряет стабильность.

9. Разработанная методика проектирования технологического процесса получения пустотелых конических деталей с использованием совмещения операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки позволяет определять размеры заготовки по переходам без дополнительного математического моделирования.

Основное содержание диссертации отражено в публикациях:

1. Яковлева Е.О. (Луканова Е.О.), Евсюков С.А., Артюховская Т.Ю. Влияние толщины исходной заготовки на толщину детали получаемой совмещением операций раздачи, обжима, вытяжки и отбортовки // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. Орел : ОрелГТУ, 2018. № 3(329). С. 94 – 98.

2. Луканова Е.О., Евсюков С.А. Анализ напряженного состояния при совмещении раздачи, обжима, вытяжки и отбортовки // *Известия ТулГУ. Серия Технические науки*. Тула : Изд-во ТулГУ, 2019. Вып. 3. С. 335-342.

3. Луканова Е.О., Евсюков С.А., Артюховская Т.Ю. Методика проектирования технологического процесса изготовления деталей совмещением операций обжима, раздачи, вытяжки и отбортовки // *Заготовительные производства в машиностроении*. М. : ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», 2022. Т. 20, № 12. С. 545-550.

4. Яковлева Е.О. (Луканова Е.О.), Шубин И.Н. Повышение предельного формоизменения за счет совмещения операций обжима, раздачи и вытяжки. [Электронный ресурс] // studvesna.qform3d.ru: Труды Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна 2012: Машиностроительные технологии». М. : МГТУ им. Н.Э Баумана, 2012. URL: studvesna.ru?go=articles&id=656.

5. Яковлева Е.О. (Луканова Е.О.), Шубин И.Н. Технология изготовления капсулы для спекания путем совмещения операций обжима, раздачи и вы-

тяжки. [Электронный ресурс] // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна 2013: Машиностроительные технологии». М. : МГТУ им. Н.Э Баумана, 2013. № гос. регистрации 0321300796. URL: studvesna.qform3d.ru?go=articles&id=791.

6. Яковлева Е.О. (Луканова Е.О.), Шубин И.Н. Разработка тех. процесса изготовления капсулы для спекания // 63-я Открытая студенческая научно-техническая конференция «СНТК Университета Машиностроения 2013»: Сборник работ. М. : МАМИ, 2013. С. 392-402.

7. Яковлева Е.О. (Луканова Е.О.), Евсюков С.А. Обзор и анализ способов получения переходников для труб. [Электронный ресурс] // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 7 – 10 апреля, 2015, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана. М. : ООО «КванторФорм», 2015. № гос. регистрации 0321501427. URL: studvesna.ru?go=articles&id=1265.

8. Яковлева Е.О. (Луканова Е.О.), Евсюков С.А. Способы получения конических переходников // Восьмая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» : сборник докладов. М. : МГТУ им. Н.Э Баумана, 2015. С. 205-208.

9. Яковлева Е.О. (Луканова Е.О.), Евсюков С.А. Совмещения операций раздачи, обжима, вытяжки и отбортовки в одном штамповочном переходе // Состояние и перспектива развития отечественных технологий обработки металлов давлением и оборудования кузнечно-прессового машиностроения: Сборник научных статей и докладов XIII Конгресса «Кузнец-2017». Рязань, 2017. С. 61 – 66.

10. Луканова Е.О. Влияние толщины исходной заготовки на силу деформирования при совмещении операций раздачи, обжима, вытяжки и отбортовки // Одиннадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» 24-27 сентября 2018 г.: сборник докладов. М. : МГТУ им. Н.Э Баумана, 2018. С. 114-116.

11. Луканова Е.О., Евсюков С.А. Влияние толщины исходной заготовки на максимальное фомоизменение при совмещении операций раздачи, обжима, вытяжки и отбортовки // Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России. IV Международная научно-производственная конференция, приуроченная ко Дню Российской науки и 35-летию АО «Ульяновский НИАТ». (Россия, Ульяновск, 7-8 февраля 2019 г.) : сборник научных трудов. Ульяновск: УлГТУ, 2019. С. 55-60.

12. Луканова Е.О. Влияние трения на силу деформирования при совмещении операций раздачи, обжима, вытяжки и отбортовки // Двенадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» 24-27 сентября 2019 г.: сборник докладов. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 183-185.