

На правах рукописи

Поляков Артем Олегович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТОНКОЛИСТОВОЙ  
ШТАМПОВКИ КОЛЬЦЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ СЖАТИЕМ**

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва, 2021

Работа выполнена на кафедре технологий обработки материалов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** Лавриненко Владислав Юрьевич  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** Кухарь Владимир Денисович  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой теоретической механики  
ФГБОУ ВО «Тульский государственный  
университет»

Шпунькин Николай Фомич  
кандидат технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Обработка материалов  
давлением и аддитивные технологии» ФГАОУ  
ВО «Московский политехнический  
университет»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Московский государственный  
технологический университет «СТАНКИН»

Защита состоится « » 2021 г. в часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.04 при ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

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

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан « » 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.04  
кандидат технических наук, доцент



Плохих А.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Тонколистовые кольцевые детали из углеродистых, легированных и коррозионностойких сталей, цветных металлов и сплавов толщиной от 1 мм до 4 мм широко применяют во многих отраслях машиностроения, например, в автомобиле- и авиастроении, транспортном машиностроении. Так, по данным машиностроительного завода «Тонар» (производитель прицепной и полуприцепной техники, карьерных самосвалов и автопоездов) и АО «Демиховский машиностроительный завод» (производитель электропоездов и вагонов) годовая потребность в кольцевых деталях диаметром до 250 мм и толщиной до 4 мм составляет более 50 тыс. шт., а по данным ПАО «ОДК-Сатурн» (российский производитель авиационных двигателей и газотурбинной техники) объем производства деталей типа кольцо широкой номенклатуры из цветных сплавов составляет не менее 30% от общего объема листоштамповочного производства предприятия.

Наиболее часто применяемыми методами изготовления деталей типа кольцо являются: вырубка и пробивка, точение, раскатка и другие операции. В условиях массового производства наиболее часто применяют вырубку и пробивку, а в условиях единичного производства – точение на токарном станке. При этом одной из наиболее существенных статей затрат на производство являются затраты на исходный материал заготовок, особенно для дорогостоящих цветных металлов и сплавов.

Основным недостатком существующих методов изготовления деталей типа кольцо является большой расход металла, низкий коэффициент использования материала (КИМ) и связанные с этим высокие затраты на производство.

Одним из методов изготовления кольцевых деталей, позволяющим снизить расход металла и увеличить КИМ до 1,2 - 1,5 раз при обеспечении требуемого качества изготавливаемых деталей типа кольцо, является метод сжатия исходных овальных заготовок в штампе. Ранее профессором Е.И. Семеновым показана принципиальная возможность изготовления тонколистовых кольцевых деталей из углеродистых сталей сжатием овальной заготовки, при котором происходит гибка на ребро прямолинейных и радиусных участков заготовки (разгибка).

Вместе с тем, в настоящее время применение данного метода для изготовления кольцевых деталей ограничено отсутствием рекомендаций по изготовлению колец с различными геометрическими параметрами из различных материалов, отсутствием сведений об особенностях формоизменения заготовок при сжатии и их математическом описании, отсутствием формул для определения размеров исходных овальных заготовок и силовых параметров процесса сжатия, отсутствием методик проектирования технологических процессов изготовления деталей типа кольцо сжатием.

В связи с этим разработка научно обоснованных технических решений, направленных на повышение коэффициента использования материала и сни-

жение затрат в условиях единичного и мелкосерийного производства тонколистовых кольцевых деталей является актуальной. При этом исследования особенностей формоизменения, напряженного и деформированного состояния, силовых параметров при гибке овальных заготовок на ребро позволяют провести их математическое описание и разработать методику проектирования технологических процессов и конструкции универсальных промышленных штампов для изготовления кольцевых деталей сжатием.

**Целью работы** является повышение коэффициента использования материала и снижения затрат в условиях мелкосерийного и единичного производства кольцевых деталей требуемого качества методом сжатия.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Анализ существующих способов изготовления деталей типа кольцо и анализ существующих исследований особенностей формоизменения, напряженного и деформированного состояния при гибке на ребро.

2. Проведение теоретических исследований процесса изготовления кольцевых деталей методом сжатия для определения особенностей формоизменения, напряженно-деформированного состояния и силовых параметров. Построение математических моделей процесса изготовления кольцевых деталей сжатием и определение зависимостей для расчета геометрических параметров исходных заготовок.

3. Разработка методики и проведение экспериментальных исследований процесса изготовления кольцевых деталей методом сжатия.

4. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления кольцевых деталей сжатием.

5. Разработка конструкций промышленных универсальных штампов для изготовления кольцевых деталей сжатием.

6. Разработка технологических процессов изготовления деталей «Фланец» и «Кольцо упорное».

**Объект исследования:** листовая штамповка кольцевых деталей сжатием.

**Предмет исследования:** формоизменение, напряженное и деформированное состояние, силовые параметры при изготовлении кольцевых деталей методом сжатия.

**Методы исследований.** *Теоретические исследования* особенностей формоизменения, напряженного и деформированного состояния, силовых параметров при сжатии овальных заготовок (гибке на ребро) выполнены с использованием существующих положений теории обработки металлов давлением, компьютерного моделирования процессов листовой штамповки в программном комплексе PAM-STAMP 2G и численных расчетов в программном комплексе MathCad.

*Экспериментальные исследования* выполнены с использованием современной универсальной испытательной машины (УИМ) ИПЭ-1000, спроектированной штамповой оснастки и инструмента, высокопроизводительных ком-

пьютеров. Обработку полученных результатов проводили с использованием методов математической статистики и теории многофакторного планирования эксперимента, реализованных в разработанном специализированном программном комплексе многофакторного планирования и обработки информации.

**Положения выносимые на защиту:**

- результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса изготовления кольцевых деталей методом сжатия, показывающие особенности формоизменения, напряженно-деформированного состояния и силовые параметры;
- методика проектирования технологических процессов изготовления кольцевых деталей сжатием, применение которой обеспечивает повышение коэффициента использования материала и снижение затрат в условиях единичного и мелкосерийного производства;
- конструкции промышленных универсальных штампов для изготовления кольцевых деталей сжатием;
- разработанные технологические процессы изготовления деталей «Фланец» и «Кольцо упорное».

**Достоверность** полученных результатов теоретических исследований подтверждена их высокой сходимостью с экспериментальными данными с расхождением менее 10%.

**Научная новизна** заключается:

- в полученных формулах для определения геометрических параметров ( $r$ , – радиус заготовки,  $A$  – длина прямолинейного участка заготовки) исходных овальных заготовок для изготовления из них кольцевых деталей сжатием;
- в полученном диапазоне рационального использования метода сжатия для изготовления кольцевых деталей в зависимости от геометрических параметров детали ( $D$  – диаметр,  $B$  – ширина);
- в установленных зависимостях между особенностями формоизменения (относительное утонение наружной  $S_{\text{нар}}/S$  и внутренней поверхности кольцевой детали  $S_{\text{вн}}/S$ , отклонение от круглости наружного  $\sigma_{\text{нар}}$  и внутреннего диаметров  $\sigma_{\text{вн}}$ ) и силовых параметров (максимальная сила деформирования  $P_{\text{max}}$ ) и геометрическими параметрами кольцевой детали и исходной овальной заготовки на основе полученных математических моделей процесса изготовления деталей типа кольцо.

**Практическая значимость работы** заключается:

- в методике проектирования технологических процессов изготовления кольцевых деталей сжатием, обеспечивающей повышение коэффициента использования материала и снижение затрат в условиях единичного и мелкосерийного производства до 1,5 раз;
- в конструкциях промышленных универсальных штампов для изготовления деталей типа кольцо методом сжатия;
- в технологических процессах изготовления деталей «Фланец» и «Кольцо упорное» сжатием.

**Личный вклад автора.** Личный вклад автора состоит в проведении теоретических и экспериментальных исследований процесса изготовления кольцевых деталей сжатием, получении формул для определения геометрических параметров исходных овальных заготовок, получении математических моделей процесса изготовления деталей типа кольцо в виде уравнений регрессий, в определении диапазона рационального использования метода сжатия, в разработке методики проектирования технологических процессов изготовления кольцевых деталей сжатием, в разработке конструкций промышленных универсальных штампов и разработке технологических процессов изготовления деталей «Фланец» и «Кольцо упорное».

**Реализация работы.** Разработанная методика проектирования технологических процессов изготовления кольцевых деталей сжатием, конструкции промышленных универсальных штампов и технологические процессы изготовления деталей «Фланец» и «Кольцо упорное» планируются к применению в производственных условиях АО «Демиховский машиностроительный завод» и ПАО «ОДК-Сатурн».

На конструкцию штампа для изготовления плоских колец сжатием подана заявка на патент №2020138167 от 20.11.2020 г.

Результаты работы используются в учебном процессе кафедры технологии обработки материалов МГТУ им. Н.Э. Баумана при проведении дисциплин «Учебно-технологический практикум», «Технология конструкционных материалов», при выполнении курсовых проектов и выпускных квалификационных работ, а также в научно-исследовательской работе студентов и аспирантов.

**Апробация работы.** Основные положения и материалы работы доложены на Международной научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем», (Севастополь, 2018, 2019, 2020 г.г.), Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Севастополь, 2018, 2019, 2020 г.г.), Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры технологий обработки материалов МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 2019 г.), V-й Международной научно-технической конференции «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением», посвященной 85-летию д.т.н., проф. Яковлева С.П. и 80-летию кафедры «Механика пластического формоизменения» (Тула, 2019 г.), Международном XIV Конгрессе «Кузнец-2019» «Состояние и перспективы развития технологических процессов обработки металлов давлением и оборудования кузнечно-прессового машиностроения в современных условиях» (Рязань, 2019 г.), III Всероссийской научно-практической конференции «Современная металлургия нового тысячелетия», посвященной 10-летию Металлургического института ЛГТУ (Липецк, 2020 г.), научных семинарах кафедры технологий обра-

ботки материалов МГТУ им. Н.Э. Баумана, на совещаниях технических советов АО «Демиховский машиностроительный завод» и ПАО «ОДК-Сатурн».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе: 2 статьи в изданиях, входящих в базы Web of Science и Scopus, 4 статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, 1 свидетельство на программу для ЭВМ, 2 статьи в различных сборниках научно-технических трудов. Общий объем –1,8 п. л., авторский вклад –1,3 п. л.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав основного текста, основных выводов по работе. Общий объем диссертации составляет 141 страница. Диссертация содержит 94 рисунка, 21 таблицу и список литературы из 108 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность рассматриваемой в работе научно-технической проблемы, сформулированы цель и задачи работы, методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, достоверность, научная значимость, практическая ценность и реализация работы, приведены данные об апробации работы, публикациях, структуре и объеме диссертационной работы.

**В первой главе** проведен анализ существующих методов изготовления деталей типа кольцо, анализ существующих исследований особенностей формоизменения, напряженного и деформированного состояния при гибке на ребро.

К деталям типа кольцо относят детали с отношением толщины  $S$  к наружному диаметру  $D$  менее 0,5 с различными значениями внутреннего диаметра  $d$  и ширины  $B$ .

Отмечено, что одним из главных недостатков существующих методов изготовления кольцевых деталей (вырубка и пробивка, точение, раскатка и др.) является большой расход металла, низкий коэффициент использования материала (КИМ) и связанные с этим высокие затраты на производство.

Одним из перспективных методов изготовления тонколистовых кольцевых деталей является метод сжатия исходных овальных заготовок в штампе, описанный в работах Е.И. Семенова и В.А. Демина и позволяющий снизить расход металла и увеличить КИМ до 1,2 - 1,5 раза при обеспечении требуемого качества изготавливаемых деталей. При сжатии исходной овальной заготовки радиусные участки заготовки подвергаются разгибке, а прямолинейные участки – гибке на ребро.

Исследования особенностей формоизменения, напряженного и деформированного состояния, а также энергосиловых параметров при гибке на ребро проводили: Хилл Р., Ренне И.П., Давыдов В.И., Малинин Н.Н., Мошинин Е.Н., Попов Е.А., Романовский В.П., Семёнов Е.И., Дёмин В.А., Жуков М.Б., Ростовцев Д.В. и другие исследователи. Отмечено, что при гибке на ребро узкой полосы напряженное состояние принимают плоским, а деформированное – объемным.

Однако процессы гибки и разгиба на ребро исходной овальной заготовки, происходящие одновременно при ее сжатии, являются малоизученными, при этом недостаточность и ограниченность литературных данных не позволяет рассматривать их в качестве достаточной основы для разработки методики проектирования технологических процессов изготовления деталей типа кольцо сжатием.

В результате проведенного анализа существующих методов исследования процессов листовой штамповки отмечено, что для исследования особенностей формоизменения, напряженно-деформированного состояния и силовых параметров при изготовлении кольцевых деталей сжатием целесообразно использовать компьютерное моделирование в программном комплексе PAM-STAMP 2G, обеспечивающем достаточную точность расчета и требующий минимальных затрат. Программный комплекс PAM-STAMP 2G основан на методе конечных элементов и позволяет изучить формоизменение заготовки на различных этапах деформирования, а также описать явления, происходящие в очаге пластической деформации.

Обоснована постановка задач исследования.

**Вторая глава** посвящена теоретическим исследованиям процесса получения кольцевых деталей из исходных овальных заготовок методом сжатия для определения особенностей формоизменения, напряженно-деформированного состояния и силовых параметров.

Расчетная схема процесса сжатия исходных овальных заготовок для получения кольцевых деталей представлена на Рис. 1.

Для определения геометрических размеров исходной овальной заготовки были приняты следующие допущения:

1. В начале процесса сжатия заготовки нейтральный слой деформаций расположен на середине ширины заготовки  $B/2$ . После окончания процесса сжатия нейтральный слой деформаций в радиусном участке смешается к внешней стороне кольца на величину  $B \cdot x$  к сжатым слоям, в линейном к внутренней стороне кольца на величину  $B \cdot x$  также к сжатым слоям.

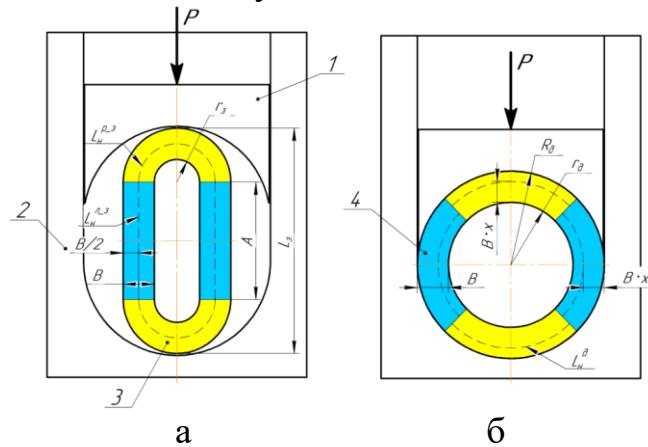


Рис. 1. Расчетная схема процесса сжатия исходных овальных заготовок для получения кольцевых деталей: а – начало процесса; б – окончание процесса; 1 – пуансон, 2 – матрица, 3 – исходная овальная заготовка, 4 – кольцевая деталь

2. Длины нейтрального слоя деформаций радиусных и линейных участков заготовки равны:

$$L_h^{p-3} = L_h^{l-3} \quad (1)$$

где  $L_h^{p-3}$  – длина нейтрального слоя деформаций радиусного участка заготовки,  $L_h^{l-3}$  – длина нейтрального слоя деформаций линейного участка заготовки.

3. Длины нейтрального слоя деформаций радиусных участков равны половине длины нейтрального слоя деформаций детали:

$$L_h^{p-3} = \frac{L_h^\delta}{2} \quad (2)$$

где  $L_h^\delta$  – длина нейтрального слоя деформаций детали.

4. Длины нейтрального слоя деформаций линейных участков равны половине длины нейтрального слоя деформаций детали:

$$L_h^{l-3} = \frac{L_h^\delta}{2} \quad (3)$$

Рассмотрена разгибка радиусного участка заготовки, где минимально допустимый радиус разгиба (Рис. 2) должен обеспечивать отсутствие разрушения в опасной точке  $C$  с учетом пластических свойств материала заготовки  $\delta$ .

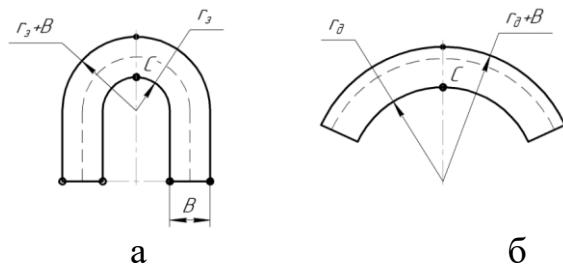


Рис. 2. Радиусный участок заготовки до (а) и после деформации (б)

На основании этого определен минимально допустимый радиус овальной заготовки в точке  $C$ :

$$r_{\min\_C} = \frac{r_\delta}{2 \cdot (\delta + 1)} \quad (4)$$

где  $r_\delta$  – внутренний радиус детали,  $\delta$  – относительное удлинение материала.

Определен радиус овальной заготовки  $r_3$  с учетом допущения (1) и (2):

$$r_3 = \frac{r_\delta + B(x-1)}{2} \quad (5)$$

где  $x$  – коэффициент смещения нейтрального слоя деформаций,  $B$  – ширина детали.

При этом должно выполняться следующее условие:

$$r_3 \geq r_{\min\_C} \quad (6)$$

С учетом допущений (3) и (4) получена формула для нахождения длины прямолинейного участка заготовки  $A$ :

$$A = \frac{\pi \cdot (R_o + B \cdot (x-1))}{2} \quad (7)$$

Для проверки адекватности выведенных формул (5) – (7), в программном комплексе PAM-STAMP 2G было проведено компьютерное моделирование процесса получения тонколистовых кольцевых деталей сжатием ( $B = (3 \dots 30)$  мм,  $r_3 = (3,2 \dots 79)$  мм,  $A = (14,8 \dots 295,3)$  мм,  $r_o = (7 \dots 85)$  мм,  $S = 2$  мм и 3 мм), данный диапазон размеров соответствует номенклатуре кольцевых деталей машиностроительного завода «Тонар», АО «ДМЗ» и ПАО «ОДК-Сатурн».

Основные исходные данные для моделирования: конечные элементы hex8 размером 1 мм. Материал заготовок – сталь 08пс (ГОСТ 9045-93) и алюминиевый сплав АМг3 (ГОСТ 13726-97). Скорость движения пуансона 120 мм/мин, коэффициент трения – 0,12.

В результате был определен диапазон рационального использования метода сжатия для изготовления кольцевых деталей для исследуемого интервала геометрических параметров деталей типа кольцо (Рис. 3).

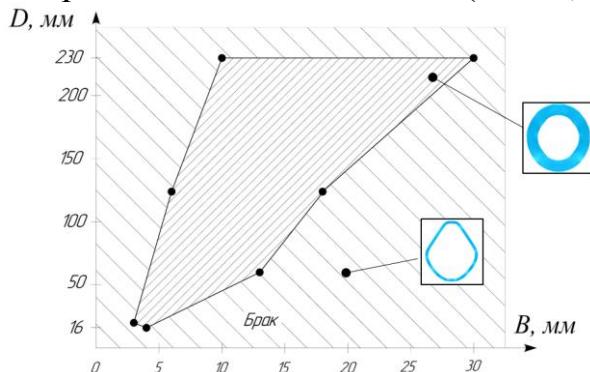


Рис. 3. Диапазон рационального использования метода сжатия для изготовления кольцевых деталей

Также на основе результатов компьютерного моделирования была определена зависимость коэффициента смещения нейтрального слоя деформации  $x$  при сжатии кольцевых деталей от относительной ширины заготовки  $B/S$ :

$$x(B) = 0.89 - 0.098 \cdot \frac{B}{S} + 0.0125 \cdot \left( \frac{B}{S} \right)^2 \quad (8)$$

Данную зависимость можно использовать для расчета геометрических параметров исходной овальной заготовки по формулам (5) и (7).

Для исследования особенностей формоизменения заготовки при сжатии при использовании метода многофакторного планирования была составлена матрица плана эксперимента. В качестве независимых факторов были приняты следующие величины:  $X_1$  – относительная ширина детали  $B/S = 1; 2,66; 4,33$ ;  $X_2$  – относительная длина заготовки  $A/r_o = 2,17; 2,41; 2,65$ ;  $X_3$  – относительный радиус заготовки  $R_3/r_o = 0,31; 0,35; 0,4$ . Для сокращения количества опытов и времени было решено воспользоваться дробным факторным экспериментом  $3^{3-1}/9$ . Основные геометрические размеры исходных овальных заготовок определены по формулам (4) – (8).

Некоторые результаты моделирования процесса получения кольцевых деталей из стали 08пс сжатием приведены на Рис. 4, из алюминиевого сплава АМг3 на Рис. 5.

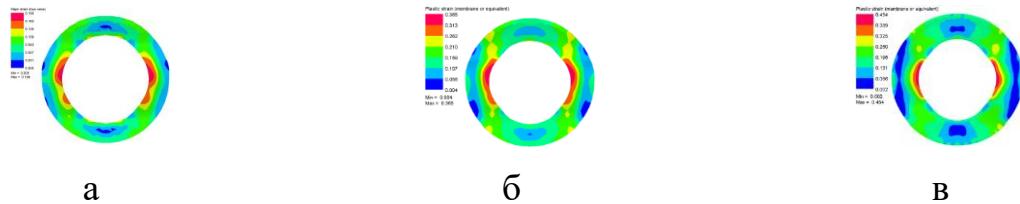


Рис. 4. Кольцевые детали из стали 08пс: а)  $D = 20$  мм,  $B = 3$  мм; б)  $D = 40$  мм,  $B = 7$  мм; в)  $D = 60$  мм,  $B = 11,5$  мм

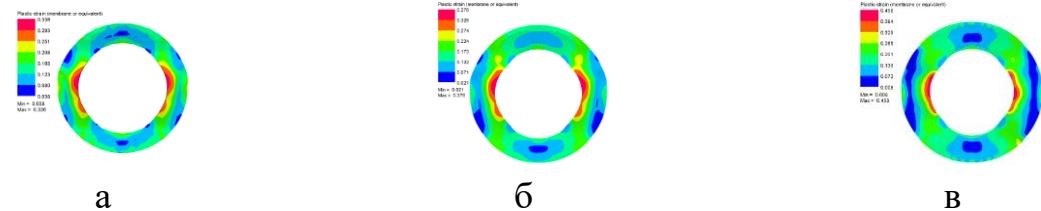


Рис. 5. Кольцевые детали из алюминиевого сплава АМг3: а)  $D = 20$  мм,  $B = 3$  мм; б)  $D = 40$  мм,  $B = 7$  мм; в)  $D = 60$  мм,  $B = 11,5$  мм

В Таблице 1 приведены значения среднеквадратичного отклонения от круг-лости наружного и внутреннего диаметров  $\sigma_{\text{нар}}$  и  $\sigma_{\text{вн}}$ , значения относительного утонения со стороны внутреннего диаметра  $S_{\text{вн}}/S$  в точке С (Рис.3) и относительного утонения со стороны наружного диаметра  $S_{\text{нар}}/S$ , а также максимальной силы деформирования  $P_{\text{max}}$ , полученные по результатам компьютерного моделирования в программе PAM-STAMP 2G.

Таблица 1.  
Результаты компьютерного моделирования в программе PAM-STAMP 2G

№	$\sigma_{\text{нар}}, \text{мм}$	$\sigma_{\text{вн}}, \text{мм}$	$S_{\text{вн}}/S$	$S_{\text{нар}}/S$	$P_{\text{max}}, \text{kH}$
1	0,03	0,16	0,94	1,08	9,42
2	0,05	0,25	0,94	1,09	13,81
3	0,05	0,63	0,96	1,11	23,75
4	0,06	0,29	0,93	1,08	15,16
5	0,04	0,35	0,91	1,10	22,00
6	0,05	0,69	0,90	1,09	24,20
7	0,03	0,60	0,93	1,10	26,70
8	0,04	0,75	0,91	1,09	28,83
9	0,03	0,86	0,90	1,10	28,24

Кроме этого, на основании данных компьютерного моделирования была получена эмпирическая формула для определения максимальной силы деформирования  $P$  при сжатии овальных заготовок из различных материалов:

$$P_{\text{max}} = S \cdot D \cdot \sigma_B \cdot k \quad (9)$$

где  $\sigma_B$  – предел прочности материала заготовки,  $S$  – толщина заготовки,  $D$  – диаметр кольцевой детали,  $k$  – коэффициент, зависящий от отношения ширины к толщине заготовки  $B/S$ .

Также был проведен анализ напряженного и деформированного состояний овальной заготовки при моделировании процесса сжатия в программном комплексе PAM-STAMP 2G. На стадии разгиба наибольшие накопленные деформации локализуются в зоне I – зоне растяжения. При окончательном сжатии максимальные деформации находятся в зоне II – зоне сжатия, что в свою очередь ведет к возникновению деформаций в промежуточной зоне III при увеличении ширины детали  $B$  (Рис. 6).

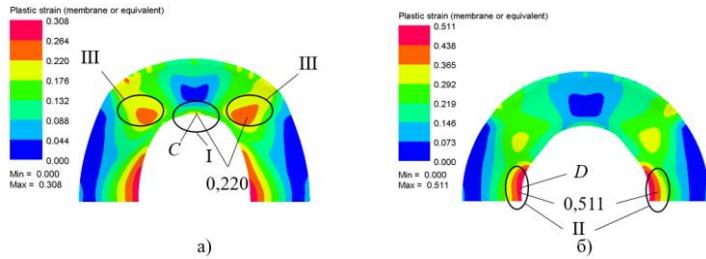


Рис. 6. Интенсивность деформаций при разгибе (а) и окончательном сжатии (б) на примере детали  $D=60$  мм  $B=13$  мм из стали 08пс

Наибольшие напряжения на этапе разгиба находятся в зоне I. Наибольшие напряжения на этапе окончательном сжатии находятся в зоне II и III (Рис. 7). В этих зонах возможна потеря устойчивости, и образование гофр, складок, что может привести к отбраковке детали.

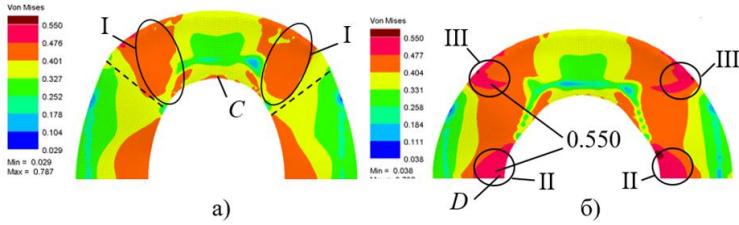


Рис. 7. Интенсивность напряжений по Мизесу в детали при разгибе (а) и окончательном сжатии (б) из стали 08пс, ГПа

Анализ напряженного и деформированного состояний овальной заготовки из алюминиевого сплава АМг3 при моделировании сжатия в программном комплексе PAM-STAMP 2G, показал качественную идентичность распределению напряжений и деформаций при сжатии заготовок из стали 08пс.

В третьей главе была проведена обработка результатов компьютерного моделирования с помощью статистических методов, реализованная в разработанном и запатентованном программном комплексе многофакторного планирования и обработки информации измерительных датчиков для электронно-вычислительной машины (ЭВМ) (свидетельство РФ №2020610823).

В результате были построены математические модели процесса изготовления кольцевых деталей сжатием в виде уравнений регрессий, показывающие зависимости между относительным утонением наружной ( $S_{\text{нар}}/S$ ) и внутренней поверхности кольцевой детали ( $S_{\text{вн}}/S$ ), отклонением от круглости наружного ( $\sigma_{\text{нар}}$ ) и внутреннего диаметров ( $\sigma_{\text{вн}}$ ) и геометрическими параметрами исходной овальной заготовки ( $r_o, A$ ) и кольцевой детали ( $D, B, S$ ):

$$\sigma_{\text{нар}} = 0,042 + 0,0012 \cdot \left( \frac{B}{S} - 2,663 \right) - 0,015 \cdot \left( \frac{A}{r_o} - 2,417 \right) + 0,05 \cdot \left( \frac{r_o}{r_o} - 0,42 \right) \quad (10)$$

$$\sigma_{\text{вн}} = 0,509 + 0,113 \cdot \left( \frac{B}{S} - 2,663 \right) + 0,565 \cdot \left( \frac{A}{r_{\delta}} - 2,417 \right) + 1,25 \cdot \left( \frac{r_{\frac{3}{2}}}{r_{\delta}} - 0,42 \right) \quad (11)$$

$$\frac{S_{\text{вн}}}{S} = 0,924 - 0,0042 \cdot \left( \frac{B}{S} - 2,663 \right) - 0,05 \cdot \left( \frac{A}{r_{\delta}} - 2,417 \right) - 0,175 \cdot \left( \frac{r_{\frac{3}{2}}}{r_{\delta}} - 0,42 \right) \quad (12)$$

$$\frac{S_{\text{нап}}}{S} = 1,093 + 0,004 \cdot \left( \frac{B}{S} - 2,663 \right) + 0,006 \cdot \left( \frac{A}{r_{\delta}} - 2,417 \right) + 0,075 \cdot \left( \frac{r_{\frac{3}{2}}}{r_{\delta}} - 0,42 \right) \quad (13)$$

Данные зависимости можно использовать при разработке технологии изготовления сжатием колец из материалов с  $\delta \geq 15\ldots20\%$ .

**В четвертой главе** изложены результаты экспериментальной проверки полученных формул и закономерностей процесса сжатия исходных овальных заготовок из стали 08пс и алюминиевого сплава АМг3.

Для проведения экспериментальных исследований был спроектирован и изготовлен штамп для изготовления кольцевых деталей сжатием (Рис. 8).

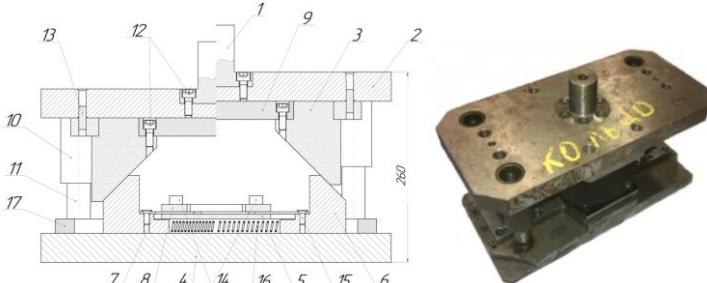


Рис. 9. Штамп сжатия для изготовления кольцевых деталей: 1 – цилиндрический хвостовик; 2 – плита верхняя; 3 – упоры; 4 – плита нижняя; 5 – плита опорная; 6 – подвижные упоры; 7 – элементы сжатия (пуансоны); 8 – крышка прижимная; 9 – плита установочная; 10 – втулка направляющая; 11 – направляющая нижней плиты; 12 – винты крепления элементов штампа; 13 – штифт; 14 – винты крепления прижимной крышки; 15 – винт крепления пуансона; 16 – пружина возврата; 17 – плита подвижных упоров

Экспериментальные исследования процесса сжатия овальных заготовок проводили на универсальной испытательной машине (УИМ) ИПэ-1000 с номинальной силой 1 МН. Некоторые результаты экспериментов по сжатию заготовок из стали 08пс приведены на Рис. 9.



Рис. 9. Кольцевые детали из стали 08пс: а)  $D = 20$  мм,  $B = 3$  мм; б)  $D = 40$  мм,  $B = 7$  мм; в)  $D = 60$  мм,  $B = 11,5$  мм

В Таблице 2 приведены значения среднеквадратичного отклонения от круглости наружного и внутреннего диаметров  $\sigma_{\text{нап}}$  и  $\sigma_{\text{вн}}$ , значения относительного утонения со стороны внутреннего диаметра  $S_{\text{вн}}/S$  в точке  $C$  (Рис. 2) и относительного утонения со стороны наружного диаметра  $S_{\text{нап}}/S$ , а

также максимальной силы деформирования  $P_{max}$ , полученные по результатам экспериментальных исследований.

Таблица 2.

Результаты экспериментальных исследований

№	$\sigma_{нар.э.}, \text{мм}$	$\sigma_{вн.э.}, \text{мм}$	$S_{вн.э.}/S$	$S_{нар.э.}/S$	$P_{э.}, \text{кН}$
1	0,048	0,299	0,961	1,071	9,88
2	0,039	0,525	0,962	1,079	14,25
3	0,039	0,714	0,958	1,075	24,50
4	0,051	0,282	0,950	1,063	15,93
5	0,046	0,494	0,951	1,082	22,72
6	0,037	0,751	0,944	1,074	25,13
7	0,050	0,533	0,963	1,073	27,61
8	0,044	0,701	0,946	1,082	29,53
9	0,039	0,879	0,933	1,083	30,10

**В пятой главе** проведено сравнение полученных теоретических и экспериментальных значений отклонения от круглости наружного  $\sigma_{нар}$  и внутреннего  $\sigma_{вн}$  диаметра деталей типа кольцо, относительного утонения  $S_{вн.э.}/S$  и относительного утолщения  $S_{нар.э.}/S$  деталей типа кольцо.

В результате проведенного сравнения была установлена высокая сходимость полученных данных теоретических и экспериментальных исследований с расхождением результатов менее 10%.

**В шестой главе** представлена разработанная методика проектирования технологических процессов изготовления кольцевых деталей сжатием, разработанная на основании полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований и включающая следующие этапы:

1. Анализ технологичности формы и выбор технологии изготовления детали.
2. Определение возможности применения метода сжатия в соответствии с диапазоном рационального применения (Рис. 3).
3. Определение основных геометрических размеров исходной овальной заготовки ( $r_3, A$ ) по формулам (5) – (8) при выполнении условия (6).
4. Определение величины среднеквадратичного отклонения от круглости внутреннего  $\sigma_{вн}$  и наружного диаметра  $\sigma_{нар}$  по уравнениям (10) и (11).
5. Определение относительной толщины детали в опасном сечении с внутренней  $S_{вн}$  и наружной  $S_{нар}$  стороны получаемой детали по уравнениям (12) и (13).
6. Определение максимальной силы деформирования по формуле (9).
7. Проектирование технологической оснастки и оформление технологической документации.
8. Опытная проверка технологии изготовления деталей типа кольцо.
9. Запуск в производство.

Также были разработаны технологические процессы изготовления деталей «Фланец» (Рис. 10, а) из меди марки М3 ГОСТ 1173-2006 и для «Кольцо упорное» (Рис. 10, б) из алюминиевого сплава АМг3 ГОСТ 13726-97.

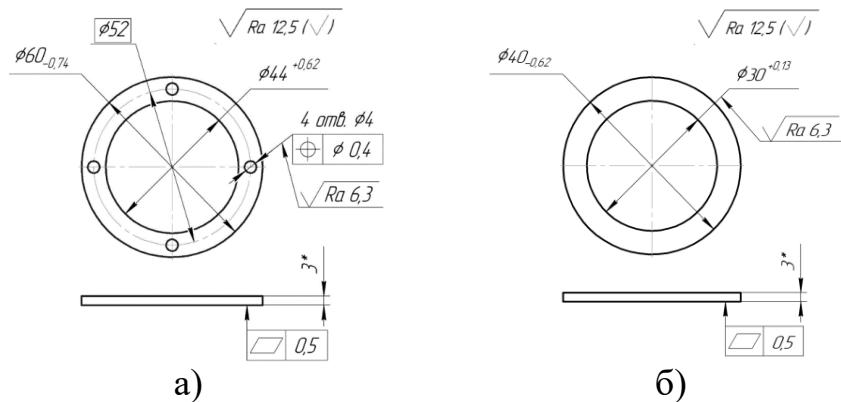


Рис. 10. Чертежи кольцевых деталей: а - «Фланец»; б - «Кольцо упорное»

Согласно существующих технологий изготовления детали «Фланец» и «Кольцо упорное» получают с помощью операций вырубки и пробивки, КИМ при этом составляет 0,35 и 0,32 соответственно.

В соответствии с разработанной методикой были определены основные технологические параметры процесса изготовления кольцевых деталей сжатием и выбрано необходимое оборудование. При этом значения КИМ для новых технологических процессов изготовления деталей «Фланец» и «Кольцо упорное» сжатием составили 0,45 и 0,42 соответственно, таким образом, применение метода сжатия позволит повысить КИМ в 1,28 и 1,31 раза соответственно.

Разработаны маршрутно-технологические карты процесса изготовления деталей «Фланец» и «Кольцо упорное». К основным операциям изготовления детали «Фланец» относятся лазерная резка, сжатие в штампе, контрольные операции, с последующей механической обработкой. Для детали «Кольцо упорное» маршрутно-технологическая карта состоит из аналогичных операций до момента получения кольцевой детали и дополнительной операции калибровки для обеспечения требуемой точности внутреннего отверстия детали.

Для повышения размерной точности отверстия деталей типа кольцо, изготавливаемых сжатием, была разработана конструкция калибровочного штампа (Рис. 11).

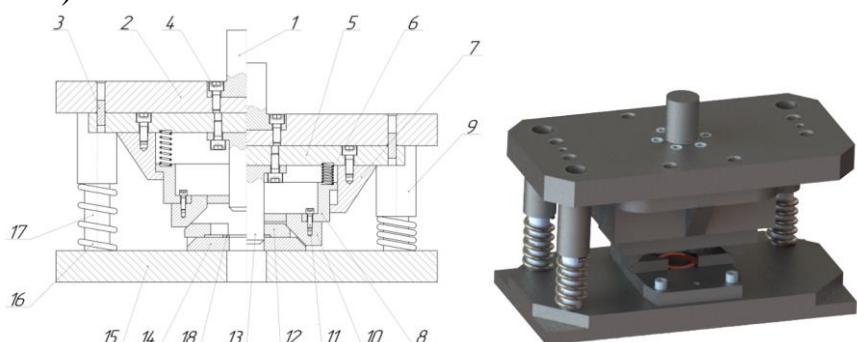


Рис. 11. Штамп для калибровки кольцевых деталей: 1 – цилиндрический хвостовик; 2 – плита верхняя; 3 – штифт; 4, 11 – винты крепления элементов штампа; 5 – плита опорная; 6 – пружина; 7 – корпус верхний; 8 – корпус нижний; 9 – втулка направляющая; 10 – упор; 12 – упор подвижный; 13 – пуансон калибровочный; 14 – плита подвижных упоров; 15 – плита нижняя; 16 – пружина возврата; 17 – направляющая нижней плиты; 18 – деталь типа кольцо

Коэффициент использования материала  $K_u$  при вырубке и пробивке кольцевых деталей можно определить по формуле:

$$K_{u\_kp} = \frac{\pi \cdot B \cdot (2R_o - B)}{(R_o + 2 \cdot z)^2} \quad (14)$$

а коэффициент использования материала  $K_u$  при вырубке и пробивке исходной овальной заготовки и последующем сжатии для получения кольцевой детали можно определить по формуле:

$$K_{u\_ob} = \frac{\pi \cdot B \cdot (2 \cdot r_3 + B) + 2 \cdot A \cdot B}{4((r_3 + B) + z)^2 + 2A \cdot ((r_3 + B) + z)} \quad (15)$$

где  $z$  – перемычка для вырубки, мм;  $B$  – ширина кольца, мм;  $R_o$  – наружный радиус детали, мм;  $r_3$  – внутренний радиус овальной заготовки;  $A$  – длина прямолинейного участка овальной заготовки, мм.

При этом размеры кольцевых деталей соответствуют диапазону рационального применения метода сжатия (Рис. 3).

Таким образом, применение разработанной методики проектирования технологических процессов изготовления кольцевых деталей сжатием позволяет повысить коэффициент использования материала до 1,5 раз и снизить затраты в условиях единичного и мелкосерийного производства при обеспечении требуемого качества изготавливаемых деталей.

**В заключении** приведены основные результаты и выводы по работе.

**Приложения** содержат отдельные результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований, сборочные чертежи разработанных конструкций универсальных штампов для изготовления кольцевых деталей сжатием.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе изложены научно обоснованные технические решения, направленные на повышение коэффициента использования материала и снижение затрат в условиях единичного и мелкосерийного производства кольцевых деталей, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие машиностроительной отрасли промышленности.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования позволили получить следующие основные результаты и сделать выводы:

1. На основе проведенного анализа существующих способов изготовления деталей типа кольцо выявлено, что основным недостатком существующих способов изготовления деталей типа кольцо является большой расход металла, низкий коэффициент использования материала (КИМ) и связанные с этим высокие затраты на производство.

Одним из перспективных методов изготовления кольцевых деталей является метод сжатия исходных овальных заготовок в штампе, позволяющий снизить расход металла и увеличить КИМ при обеспечении требуемого качества изготавливаемых деталей. При этом также будут снижены затраты на производство и себестоимость изготовления кольцевых деталей.

Вместе с тем, процессы гибки и разгиба на ребро, происходящие при изготовлении кольцевой детали сжатием являются малоизученными, отсутствуют также методики проектирования технологических процессов изготовления деталей типа кольцо сжатием, что ограничивает применение данного метода для изготовления кольцевых деталей.

2. Проведенные теоретические исследования особенностей формоизменения, напряженно-деформированного состояния и силовых параметров при изготовлении кольцевых деталей методом сжатия при компьютерном моделировании в программном комплексе PAM-STAMP 2G позволили:

- получить формулы для определения геометрических параметров ( $r_3, A$ ) исходных овальных заготовок для изготовления из них кольцевых деталей сжатием;
- получить диапазон рационального использования метода сжатия для изготовления кольцевых деталей в зависимости от геометрических параметров детали ( $D$  и  $B$ );

- разработать математические модели процесса изготовления кольцевых деталей сжатием в виде уравнений регрессий, показывающие зависимости между коэффициентом смещения нейтрального слоя деформаций ( $x$ ), относительным утонением наружной ( $S_{\text{нар}}/S$ ) и внутренней поверхности кольцевой детали ( $S_{\text{вн}}/S$ ), отклонением от круглости наружного ( $\sigma_{\text{нар}}$ ) и внутреннего диаметров ( $\sigma_{\text{вн}}$ ), максимальной силой деформирования ( $P_{\text{max}}$ ) и геометрическими параметрами исходной овальной заготовки ( $r_3, A$ ) и кольцевой детали ( $D, B, S$ ).

Проведенный анализ напряженного и деформированного состояния исходных овальных заготовок из углеродистой стали 08пс и алюминиевого сплава АМг3 при сжатии позволил установить 2 стадии процесса – разгибку радиусной части заготовки и окончательное сжатие (гибка прямолинейной части) заготовки. При этом на стадии разгибки заготовки наибольшие интенсивность деформации и интенсивность напряжений имеют место в зоне растяжения заготовки, при окончательном сжатии заготовки - в зоне сжатия II. Для различных материалов характер распределения интенсивности деформаций и интенсивности напряжений качественно идентичен.

3. Разработана методика экспериментальных исследований процесса изготовления кольцевых деталей методом сжатия, включающая расчет геометрических параметров исходных овальных заготовок из углеродистой стали 08пс и алюминиевого сплава АМг3, проектирование штампа и инструмента для изготовления кольцевых деталей сжатием, выбор прессового оборудования.

Проведенные на основе разработанной методики исследования особенностей формоизменения (относительное утонение наружной  $S_{\text{нар}}/S$  и внутренней поверхности кольцевой детали  $S_{\text{вн}}/S$ , отклонение от круглости наружного  $\sigma_{\text{нар}}$  и внутреннего диаметров  $\sigma_{\text{вн}}$ ), а также силовых параметров (максимальная сила деформирования  $P_{\text{max}}$  при изготовлении кольцевых деталей методом сжатия) позволили подтвердить результаты теоретических исследований процесса

сжатия кольцевых деталей. При этом можно отметить высокую сходимость теоретических и экспериментальных данных с расхождением менее 10%.

Кроме этого, показана возможность одновременного изготовления двух и более кольцевых деталей методом сжатия в одном штампе, что позволяет пропорционально повысить производительность.

4. Разработана методика проектирования технологических процессов изготовления кольцевых деталей сжатием, обеспечивающая повышение коэффициента использования материала до 1,5 раз и снижение затрат в условиях единичного и мелкосерийного производств при обеспечении требуемого качества изготавливаемых деталей.

5. Разработаны конструкции и подготовлена конструкторская документация на промышленные универсальные штампы для изготовления кольцевых деталей: штамп для сжатия и штамп для окончательной калибровки кольцевых деталей.

6. Разработаны технологические процессы изготовления деталей «Фланец» из меди марки М3 и «Кольцо упорное» из алюминиевого сплава АМг3, применение которых позволяет повысить КИМ в 1,28 и 1,31 раза соответственно.

Разработанные методика проектирования технологических процессов изготовления кольцевых деталей сжатием, конструкции промышленных универсальных штампов и технологические процессы изготовления деталей «Фланец» и «Кольцо упорное» планируются к применению в производственных условиях АО «Демиховский машиностроительный завод» и ПАО «ОДК-Сатурн».

Результаты работы используются в учебном процессе кафедры технологий обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана при проведении дисциплин «Учебно-технологический практикум», «Технология конструкционных материалов», при выполнении курсовых проектов и выпускных квалификационных работ, а также в научно-исследовательской работе студентов и аспирантов.

Разработанный программный комплекс многофакторного планирования и обработки информации измерительных датчиков для электронно-вычислительной машины (ЭВМ) защищен свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ №2020610823.

Разработанная конструкция промышленного универсального штампа для сжатия (заявка на патент №2020138167 от 20.11.2020 г.) может быть использована в листоштамповочных цехах машиностроительных предприятий РФ для повышения КИМ и снижения затрат на производство.

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

1. Vladislav Lavrinenko, Anastasiya Polyakova, Artyom Polyakov. Analysis of the applicability of die pressing method for ring-shaped parts fabrication // MATEC Web of Conferences 224, 02074 (2018) (0,169 п. л./0,101 п. л.).
2. V. Yu. Lavrinenko, A.O. Polyakov, T.A. Mirvelyan. Development of the stamp design for ring-shaped parts manufacturing by compression method// Materials Today: Proceedings, volume 19, part 5, 2019, Pages 2106-2108 (0,219 п.л./0,150 п. л.).
3. Лавриненко В.Ю., Поляков А.О. Область рационального использования метода сжатия для получения кольцевых деталей // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. № 9 С. 397-400 (0,217 п. л. / 0,142 п. л.).
4. Лавриненко В.Ю., Поляков А.О., Мирвелян Т.А. Проектирование конструкции штампа для изготовления кольцевых деталей методом сжатия// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. № 4-1 (336). С. 105-109 (0,177 п. л. / 0,095 п. л.).
5. Поляков А.О., Лавриненко В.Ю. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления деталей типа кольцо сжатием // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 4-2 (342). С. 61-68 (0,270 п. л. / 0,186 п. л.).
6. Поляков А.О. Исследование напряженно-деформированного состояния деталей типа «кольцо» получаемых методом сжатия // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.8. 2020. С.26-31.
7. Поляков А.О., Лавриненко В.Ю. Инновационная технология изготовления кольцевых деталей методом сжатия // Сборник научных статей и докладов XIV Международного Конгресса «Кузнец-2019». Рязань, 2019. С.62-68 (0,185 п. л. / 0,131 п. л.).
8. Поляков А.О., Лавриненко В.Ю. Ресурсосберегающая технология получения деталей типа кольцо методом сжатия сжатия // сб. науч. тр. III Всеросс. (с международным участием) науч.-практ. конф., 21-23 октября 2020 г., Липецк.–Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2020 . С.62-67 (0,256 п. л. / 0,192 п. л.).
9. Потапов К. Г., Комшин А. С., Сережкин М. А., Лавриненко В. Ю., Поляков А. О., Сырицкий А. Б. Программный комплекс многофакторного планирования и обработки информации измерительных датчиков. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020610823 заяв. 30.12.2019, опубл. 20.01.2020 (0,142 п. л. / 0,031 п.л.).