

На правах рукописи



НИЗМЕЕВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ РАДИАЛЬНОГО
ОБЖАТИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЗАГОТОВОК В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Специальность 2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева».

**Научный
руководитель:**

Дорохов Даниил Олегович,

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиноведения, мехатроники и робототехники ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» (г. Орел).

**Официальные
оппоненты:**

Сосенушкин Евгений Николаевич,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой композиционных материалов ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (г. Москва).

Белокуров Олег Александрович,

кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-6 «Технологии обработки давлением» ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (г. Москва).

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (г. Самара).

Защита состоится «14» апреля 2026 г. в **13 ч. 30 мин.** на заседании диссертационного совета 24.2.353.02 ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское ш., д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и в фундаментальной библиотеке по адресу: 302028, г. Орёл, пл. Каменская, д.1.

Автореферат разослан «_____» 2026 г. Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и на официальном сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (<https://vak.gisnauka.ru/adverts-list/advert>).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, в двух экземплярах просим направлять в диссертационной совет по адресу:

*302026, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская д. 95., тел. +79102668598,
email: okozhus@mail.ru.*

Ученый секретарь диссертационного совета

24.2.353.02, к.т.н.

О.Г. Кожус

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Валы и оси с небольшими перепадами диаметров ступеней получили широкое распространение в электротехнике, авиастроении, транспортном и сельскохозяйственном машиностроении. Традиционные способы получения заготовок таких деталей в серийном производстве, такие как штамповка на горизонтально-ковочных машинах и на кривошипных горячештамповочных прессах требуют расходов на изготовление специальной технологической оснастки, поэтому их применение экономически целесообразно только при больших программах выпуска. Применение штучных заготовок из проката характеризуется низкой производительностью и большими припусками на механическую обработку.

Среди перспективных способов обработки металлов давлением для производства заготовок подобных изделий следует выделить радиальное обжатие, применение которого позволяет уменьшить, а иногда и вовсе исключить последующий объем механической обработки. Основная область применения – изготовление точных осесимметричных заготовок ступенчатых валов, осей и втулок для нужд машиностроения.

Выполненный аналитический обзор публикаций, посвященный обжимному инструменту, показал, что авторами уделяется недостаточное внимание совершенствованию обжимного инструмента и влиянию профиля рабочей части на энергосиловые параметры радиального обжатия. В настоящее время отсутствует единая методика назначения геометрических элементов обжимных бойков для реализации технологического процесса обжатия с наибольшей эффективностью. Кроме того, применяемые методики расчета силы и мощности могут быть использованы только для определения энергосиловых параметров радиального обжатия бойками с неизменным (постоянным) углом заходного конуса. Использование современных металлорежущих станков с компьютеризированными устройствами числового программного управления (систем CNC и “САМ-систем”) открыло значительные перспективы совершенствования технологии радиального обжатия путем применения современных конструкций обжимных бойков и разработке математических моделей радиального обжатия бойками с различной конфигурацией профиля заходного участка. Таким образом, выбранная тема исследований является актуальной и значимой для различных отраслей машиностроения.

Степень разработанности проблемы исследования. Вопросами технологии радиального обжатия и сходных процессов занимался ряд отечественных и зарубежных ученых, среди которых можно выделить Тимергалиева Р.М., Сапуткина Е.П., Макарова А.И., Тюрина В.А, Радюченко Ю.С., Троицкого В.П., Деордиева Н.Т., Поспелова И.А., Голенкова В.А., Унксову Е.П., Павлова И.М., Любвина В.И., Могильного Н.И., Радченко С.Ю., Бородина Н.М., Рудакова Б.П., Степанова Е.В., Новикова В.М., Мошнина Е.Н., Филимонова Ю.Ф., Kalpaksioglu S., Packham C.L., Yang D.Z.,

Zhang B.Y., Cui Y.X., Shao W.Z. и многих других ученых.

Значительное внимание проектированию обжимных бойков уделили такие ученые как Тимергалеев Р.М., Сапуткин Е.П., Макаров А.И., Тюрин В.А., Радюченко Ю.С., Троицкий В.П., Деордиев Н.Т., Трофимов И.Г., Боев В.Л., Меркулов А.М.

Несмотря на достаточно широкую проработку в литературе указанной темы в настоящее время отсутствуют единые рекомендации и методика выбора геометрических элементов обжимных бойков.

Цель работы: повышение эффективности технологии радиального обжатия и качества изделий путем сокращения энергозатрат процесса за счет оптимизации формы заходного участка деформирующего инструмента.

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

1. Выполнить анализ существующих разработок в области конструктивных элементов радиально-обжимных бойков, определить влияние геометрических элементов на показатели процесса радиального обжатия.

2. Провести теоретическое исследование радиального обжатия, предложить математическую модель процесса и на основе ее анализа:

– разработать методику расчета энергосиловых параметров при деформировании бойками с различной геометрией заходного конуса;

– установить влияние угла заходного конуса бойка на энергосиловые параметры процесса обжатия.

3. Выполнить экспериментальные исследования, направленные на проверку полученных результатов математического моделирования и оценки эффективности применения бойков с переменным углом заходного конуса.

4. Разработать практические рекомендации по повышению эффективности технологий радиального обжатия путем применения бойков с переменным углом заходного конуса.

Объект исследования: процесс холодного радиального обжатия сплошных цилиндрических заготовок, используемых в машиностроении.

Предмет исследования: влияние геометрии заходного участка обжимных бойков на энергосиловые параметры процесса радиального обжатия и качество получаемых изделий.

Методы исследования. Теоретические исследования в диссертационной работе базируются на основных положениях теории обработки металлов давлением, основных законах пластической деформации и научных работах ученых по вопросам радиального обжатия заготовок из различных материалов. Основой для разработки математической модели является численное интегрирование по методу наименьших квадратов, с помощью которого выражена математическая зависимость угла заходного конуса бойка от диаметра обжимаемой заготовки.

Эксперимент осуществлялся в лабораторных условиях. При выполнении экспериментальной части исследований использовался метод критериев подобия, а при обработке результатов эксперимента использовались известные

методы математической статистики. Обработка данных моделирования и результатов эксперимента производилась с помощью программ статистического и математического анализа. Проверка воспроизводимости эксперимента подтверждается критерием Кохрена, а адекватность математического описания экспериментальных данных – критерием Фишера.

Обоснованность и достоверность результатов исследований обеспечивается применением современных методов теоретических исследований и анализа, большим объемом лабораторных и опытно-промышленных экспериментов, выполненных по общепризнанным методикам; достаточной сходимостью результатов аналитических решений с результатами лабораторных исследований, использованием методов математической статистики.

Автор защищает:

1. Результаты теоретических исследований радиального обжатия, которые позволили выявить закономерности изменения энергосиловых параметров по стадиям процесса.

2. Методику расчета энергосиловых параметров радиального обжатия бойками с переменным углом заходного конуса, в которой учитывается изменение угла заходного конуса бойка и предела текучести обрабатываемого материала.

3. Результаты экспериментов по обжатию цилиндрических заготовок бойками с различным профилем заходного участка.

4. Пути совершенствования технологии радиального обжатия путем применения бойков с переменным углом заходного конуса.

5. Результаты применения бойков с переменным углом заходного конуса гиперболического профиля для производства поковки вала колонки в условиях действующего производства.

Научная новизна исследования:

1. Разработана и исследована математическая модель холодного радиального обжатия сплошных цилиндрических заготовок с помощью пошагового интегрирования по методу наименьших квадратов, численно учитывая изменение угла заходного конуса бойка и предела текучести обрабатываемого материала по стадиям деформирования. На основе анализа математической модели:

– установлена закономерность изменения контактных и энергосиловых параметров радиального обжатия по стадиям процесса, при этом в основной стадии наблюдается установившийся характер деформирования, который характеризуется постоянством длины контакта заготовки с рабочей частью инструмента, объемом обжимаемого металла и равномерным нагружением заходного конуса бойка;

– установлено, что при увеличении угла заходного конуса бойка снижается сила деформирования до 42%, мощность – до 31,6% в зависимости от профиля заходного участка за счет сокращения площади контакта заходного участка бойка с поверхностью заготовки и максимального переноса работы

формоизменения в основную стадию с установившимся процессом.

2. На основе результатов моделирования:

- научно обоснована методика расчета энергосиловых параметров радиального обжатия бойками с переменными углами заходного конуса;
- доказано, что применение бойков с переменным углом заходного конуса, имеющих выпуклый профиль, позволяет снизить требуемую силу деформирования до 42%, мощность – до 31,6% в зависимости от формы заходного участка по сравнению с бойками базового исполнения, имеющие постоянный угол заходного конуса.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается корректным использованием математического аппарата, согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований, аprobацией результатов на практике и внедрением результатов в производство.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

1. Результаты теоретических исследований радиального обжатия позволили:

- разработать методику расчета энергосиловых параметров, которая позволяет рассчитать параметры процесса при деформировании бойками с любой геометрией заходного участка;
- доказать эффективность применения бойков с переменным углом заходного конуса при деформировании сплошных цилиндрических заготовок.

2. Разработаны практические рекомендации по совершенствованию технологии радиального обжатия при получении сплошных цилиндрических заготовок, реализация которых позволила:

- повысить эффективность радиального обжатия за счет снижения расходов электроэнергии до 33% на самых энергозатратных переходах деформирования заготовки вала;
- использовать результаты на действующем предприятии АО «Навлинский завод «Промсвязь» для производства заготовки детали «Вал колонки» и получить снижение себестоимости заготовки на 5,67% по сравнению с обжатием бойками базового исполнения с постоянным углом заходного конуса.

Аprobация результатов работы. Основные результаты диссертации доложены и одобрены на следующих научных конференциях: Международная научно-техническая конференция «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем» (г. Севастополь, 2025 г.); VIII международная заочная научная конференция «Форум молодых ученых: мир без границ», приуроченная ко Дню народного единства (г. Донецк, 2021 г.); VI международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (г. Алчевск, 2021 г.); VIII заочная всероссийская научно-практическая конференция с международным участием имени академика А.Г. Шипунова (г. Ливны, 2021 г.); II международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых»

(г. Алчевск, 2021 г.); IV международная научно-практическая конференция «Материаловедение XXI века» (г. Луганск, 2021 г.); VI международная заочная научная конференция «Форум молодых ученых: мир без границ», приуроченная ко Дню народного единства (г. Донецк, 2020 г.); V международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (г. Алчевск, 2020 г.); Всероссийская научно-практическая конференция для аспирантов, студентов и молодых ученых «Современные технологии: проблемы и перспективы» (г. Севастополь, 2020 г.); Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых» (г. Алчевск, 2020 г.); IV международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (г. Алчевск, 2019 г.).

Публикации. Материалы проведенных исследований отражены в 20 работах, из которых 4 статьи опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 8 статей в научных журналах, 8 докладов на научных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 105 источников, четырех приложений и включает 171 страницу машинописного текста, содержит 57 рисунков, 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, определены объект и предмет исследования, изложена научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, а также положения, выносимые на защиту.

В первом разделе «Анализ состояния вопроса и постановка задач исследования» выполнен анализ существующих разработок в области совершенствования конструкций радиально-обжимных бойков.

Установлено, что непосредственно на процесс радиального обжатия оказывают влияние две группы факторов: режимы обработки и геометрические характеристики обжимного инструмента. Рассмотрены технические требования, предъявляемые к радиально-обжимным бойкам. Отмечено, что к основным геометрическим элементам бойков относятся (рис. 1):

- угол заходного конуса бойка α , °;
- угол охвата заготовки бойками θ , °;
- длина заходного конуса l_k , мм;
- длина калибрующего участка ручья l_u , мм (цилиндрический участок);
- радиусы сопряжения профиля ручья с плоскостью разъема бойков r_u и r_k , мм;
- радиус сопряжения конического и цилиндрического участков профиля ручья r_n , мм.

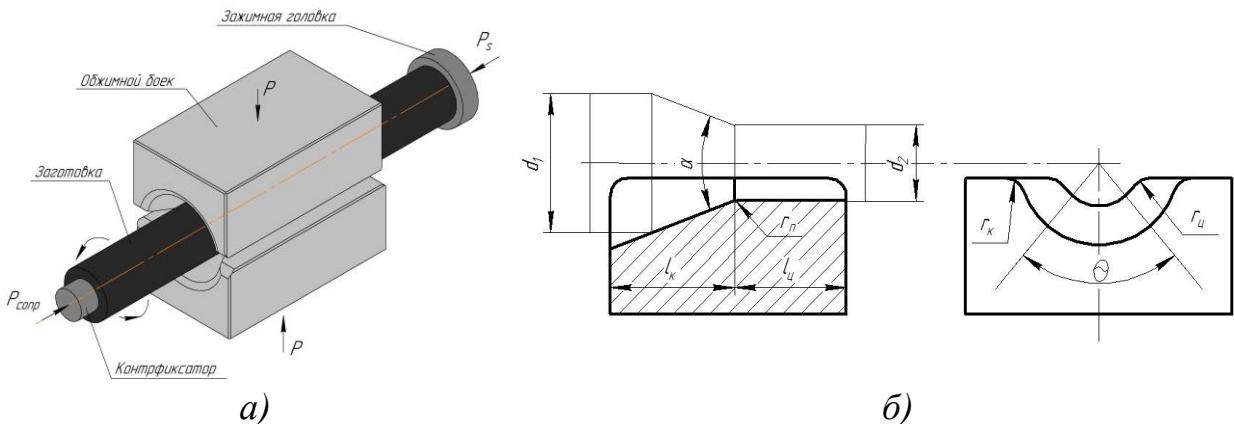


Рисунок 1 – Процесс радиального обжатия: а) схема приложения сил; б) основные геометрические элементы радиально-обжимных бойков

Затем выполнен анализ влияния геометрических элементов бойков на основные показатели процесса радиального обжатия, в результате которого определено, что именно угол заходного конуса α оказывает наибольшее влияние на энергосиловые параметры.

На сегодняшний день разработка новых конструкций обжимных бойков является одним из актуальных направлений совершенствования технологии радиального обжатия. Однако перспективы модернизации инструмента неразрывно связано с теоретическими и экспериментальными исследованиями, направленными на разработку методик расчета энергосиловых параметров модифицированными бойками с различной конфигурацией рабочего профиля. Поэтому применение новых конструкций инструментов требует совершенствования методик расчета расходуемой силы и мощности деформирования.

Производственный опыт показывает, что применение бойков с переменным углом заходного конуса способствует уменьшению энергозатрат и повышению стойкости самих бойков. Однако обзор источников показал, что несмотря на широкую проработку вопроса в литературе, в настоящее время не существует единых рекомендаций по назначению геометрических элементов бойков и методик расчета энергосиловых параметров процесса радиального обжатия бойками, в которых угол заходного конуса бойка изменяется в каждой точке профиля. На сегодняшний день отсутствуют математические модели, описывающие изменение угла заходного конуса бойка в зависимости от длины заходного участка или абсолютного обжатия заготовки, что обуславливает необходимость поиска новых подходов и методов. Учитывая это, в работе сформулированы и решены задачи исследования, способствующие достижению поставленной цели.

Второй раздел «Теоретические исследования процесса радиального обжатия» посвящен теоретическому исследованию радиального обжатия и разработке методики расчета энергосиловых параметров при деформировании бойками с различной геометрией заходного конуса.

Анализ работ показал, что одним из недостатков базовой конструкции

обжимных бойков, в которых заходный участок выполнен в форме усеченного конуса с определенным углом, является возрастание неравномерности деформаций обрабатываемого материала по мере его приближения к калибрующему участку, что приводит к повышенной нагрузке и износу конечного участка заходной части инструмента.

В авторском свидетельстве № 233412 Радюченко Ю.С. и Деордиев Н.Т. предложили профиль заходной части бойка, который разбит на несколько усеченных конусов, который позволяет в процессе обжатия более равномерно распределить объемы деформируемого металла на всей длине рабочего участка. Однако недостатком данной конструкции является дискретное изменение углов конусности, что приводит к возникновению концентраторов напряжений, которыми являются места сопряжений конусов с разными углами, и повышенному износу входной зоны бойка в процессе эксплуатации. Для устранения этого недостатка в авторском свидетельстве № 1590187 коллектив авторов во главе с Трофимовым И.Г. предложил конструкцию бойков, профиль заходного участка которых выполнен в виде части тора и образован вращением дуг окружности вокруг оси рабочей полости. В отличие от базовых бойков, где угол заходного конуса постоянный на всей длине ($\alpha=const$), в предложенных бойках угол заходного конуса изменяется от нуля в начале участка до максимального α_{max} в конце, т.е. угол α является переменным на всей длине входной зоны.

Материал заготовки в зону с максимальным углом α_{max} поступает предварительно деформированным, что дает более равномерное распределение деформаций в объеме металла на заходном участке. Из представленного конструктивного решения можно сделать вывод, что плавное изменение угла заходного конуса позволит:

1. Повысить качество поковок за счет получения большей равномерности деформаций в объеме деформируемого металла.

2. Повысить стойкость обжимного бойка путем устранения концентраторов напряжений, которыми являются места сопряжения конусов с разными углами.

3. Уменьшить силу и требуемую мощность деформирования за счет более равномерного протекания процесса деформирования, т.е. сократить энергозатраты процесса.

Однако конструкция бойков, в которых угол заходного конуса в начале участка равен нулю ($\alpha_{min} = 0$), нецелесообразно использовать для деформирования материалов средней и высокой твердости с $HB > 163$, т.к. это приводит к снижению стойкости инструмента и ухудшению условий захвата заготовки. Использование бойков, угол заходного конуса которых изменяется от минимального значения отличного от нуля в начале профиля ручья до максимального в конце, позволит устранить данный недостаток и деформировать заготовки средней и высокой твердости. Под радиально-обжимным бойком с переменным углом заходного конуса условимся понимать боек, образующая заходного участка которого выполнена в виде кривой с

изменяющимся углом α в каждой точке профиля. Исходя из производственных рекомендаций, в данной работе будут рассматриваться радиально-обжимные бойки с переменным углом заходного конуса выпуклого профиля. В таких бойках заходная часть имеет выпуклую форму и выполнена в виде плавной кривой с постепенным увеличением угла от минимального $\alpha_{min} > 0$ в начале конусного участка до максимального α_{max} в конце.

В работе выбор формы заходного участка определен с помощью решения следующей задачи: какая поверхность вращения, проходящая через две точки $P_1(x_1; y_1)$ и $P_2(x_2; y_2)$ в плоскости xOy , образованная вращением кривой $y = f(x)$ вокруг оси Ox , имеет наименьшую возможную площадь. Исходя из решения поставленной задачи и анализа опыта проектирования инструментов, на основании которого рекомендуется принимать такую форму поверхности входной зоны, которая имела бы плавное изменение диаметра и могла быть выражена простым математическим выражением, наиболее целесообразными функциями, описывающими профиль заходного конуса бойков будут являться:

квадратичная вида $y=0,5x^2$, функция обратной пропорциональности $y = \frac{1}{x}$ и

функция натурального логарифма $y=\ln x$. Кривые данных функций имеют достаточно простое математическое выражение, и профиль заходного участка бойка может быть получен механической обработкой на токарных станках с числовым программным управлением. Далее в работе для простоты понимания полученные профили инструментов будем называть параболический, гиперболический и логарифмический соответственно, а бойки, входная зона которых представлена в виде усеченного конуса с постоянный углом, – базовыми.

В процессе деформирования заходный участок подвергается неравномерной нагрузке вследствие различной относительной степени деформации ε на длине очага формоизменения. Такой характер нагружения обусловлен непостоянством объемов смещаемого металла по мере приближения заготовки к калибрующему участку. Далее в работе исследованы закономерности изменения контактных и силовых характеристик радиального обжатия по стадиям процесса, результаты которых использованы для разработки методики расчета энергосиловых параметров при обжатии бойками с переменным углом заходного конуса.

В настоящее время для определения энергосиловых параметров радиального обжатия используется методика Радюченко Ю.С. Однако в применяемой методике вывод расчетной формулы усилия основан на допущении постоянного предела текучести σ_m , равному среднему напряжению цикла деформирования. В действительности же предел текучести σ_m изменяется и не равен постоянному среднему значению в связи с изменением относительной степени деформации ε . К тому же, при обжатии бойками, профиль ручья которых представлен в виде кривой, угол заходного конуса также не будет постоянным, т.е. $\alpha \neq const$. В данной методике отсутствует выраженная зависимость угла заходного конуса бойка от какого-либо

параметра процесса. То есть это приводит к тому, что расчет энергосиловых параметров по такой методике будет справедлив только при обжатии бойками базового исполнения с постоянным углом заходного конуса α для основной стадии без возможности исследования закономерностей изменения параметров процесса в начальной и конечной стадии. Следовательно, при разработке методики необходимо вывести зависимость угла заходного конуса α и предела текучести материала заготовки σ_m от любого параметра процесса. Для более точных вычислений необходимо выполнять расчеты по стадиям деформирования с постепенным приращением обжимаемого диаметра на определенный шаг, что даст возможность исследовать закономерности изменения энергосиловых параметров по стадиям.

Для расчета и исследования энергосиловых параметров радиального обжатия по стадиям деформирования применено пошаговое интегрирование по методу наименьших квадратов. После того как выражены зависимости угла от обжимаемого диаметра $\alpha = f(d)$ и предела текучести от относительной степени деформации $\sigma_m = f(\varepsilon)$ по методу наименьших квадратов, корректируются расчетные формулы энергосиловых параметров с учетом переменных величин α_{w_i} и $\sigma_{m_{w_i}}$ на каждом шаге. Затем производится расчет энергосиловых параметров радиального обжатия по стадиям процесса. Блок-схема расчета энергосиловых параметров радиального обжатия в зависимости от угла заходного конуса бойка приведена на рисунке 2 (переменные величины обведены рамкой).

Предлагаемая методика позволит не только рассчитать энергосиловые параметры радиального обжатия с учетом изменения угла заходного конуса применяемых бойков и упрочнения материала заготовки, но и исследовать закономерности их изменения по стадиям процесса, а также установить влияние угла заходного конуса бойка на энергосиловые параметры деформирования.

Третий раздел «Экспериментальные исследования процесса радиального обжатия» посвящен экспериментальным исследованиям процесса радиального обжатия бойками с различным профилем заходного конуса, сравнении и статистической обработке полученных результатов.

Для проведения эксперимента было изготовлено четыре комплекта радиально-обжимных бойков из стали 5ХНВ ГОСТ 5950–2000: один базового исполнения с постоянным углом заходного конуса, и три с переменными – параболическим, гиперболическим и логарифмическим профилем. Эксперименты по деформированию проведены с применением специальной технологической оснастки, позволяющей осуществить имитацию процесса радиального обжатия на гидравлическом прессе П–125 (рис. 3).

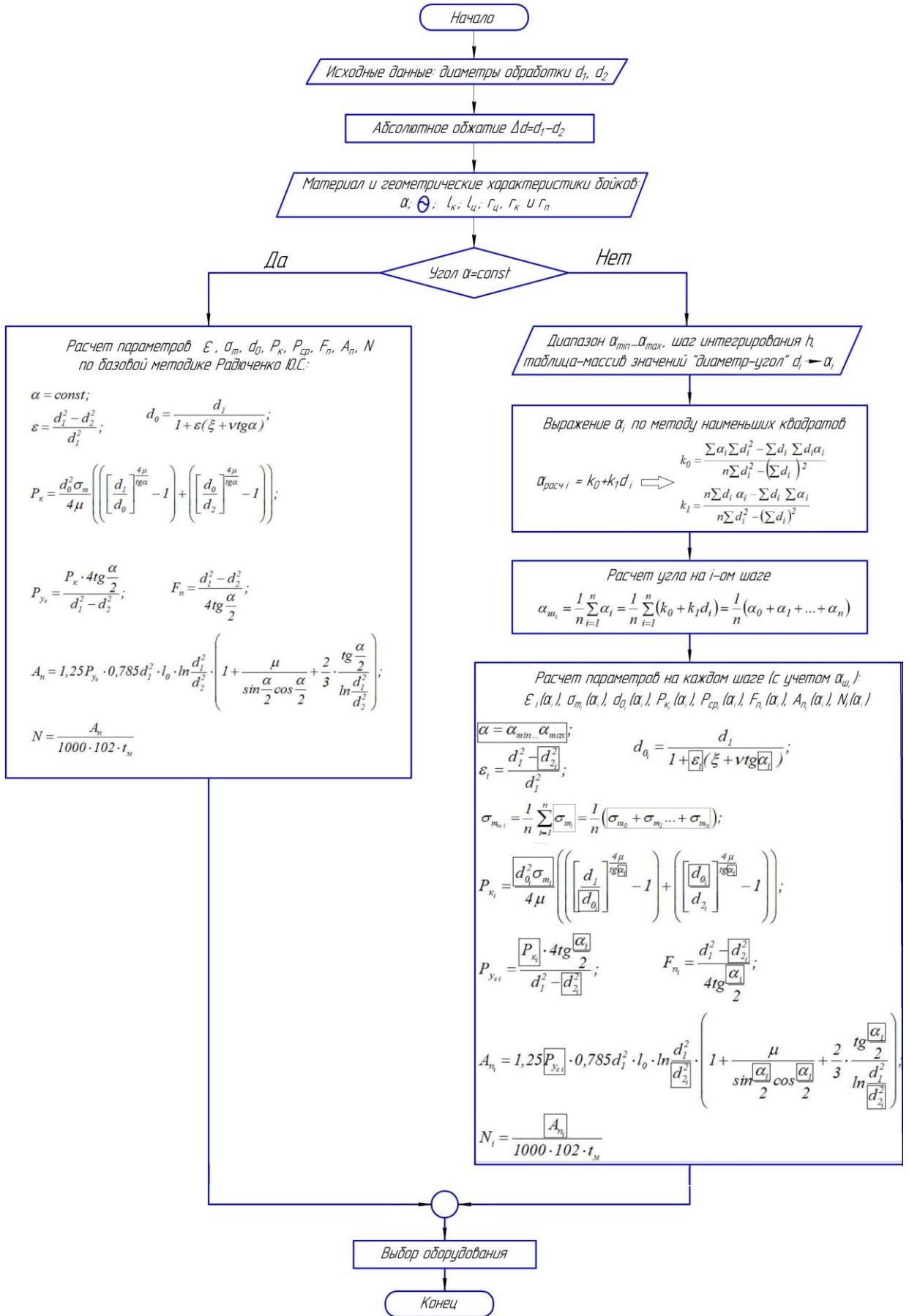


Рисунок 2 – Алгоритм расчета энергосиловых параметров в зависимости от угла заходного конуса применяемых бойков

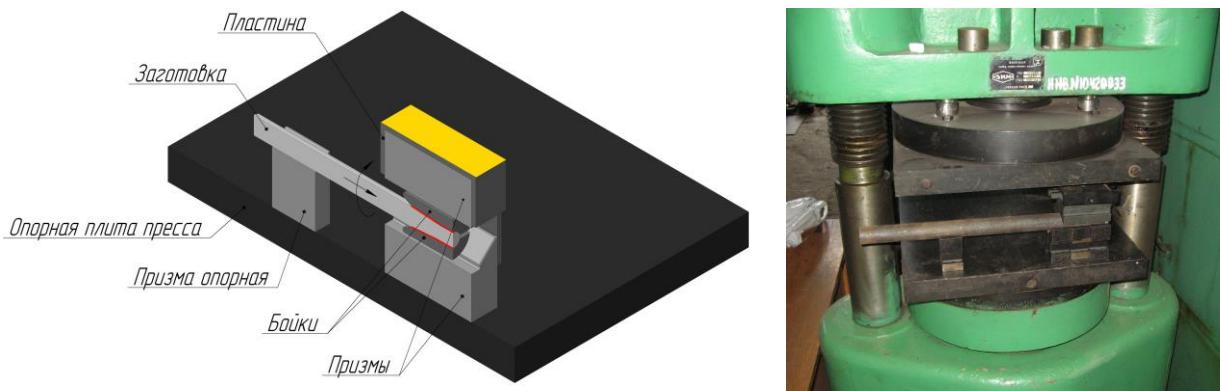


Рисунок 3 – Трехмерная модель технологической оснастки и внешний вид приспособления, установленного на опорную плиту пресса П–125

Технологическая оснастка представляет собой простое по конструкции приспособление, состоящее из двух призм, исполнительные поверхности которых контактируют с наружными поверхностями бойков, внутри которых находится обжимаемая заготовка. Пластина фиксирует положение призм и бойков, а призма опорная служит для базирования заготовки. Призмы устанавливаются на опорную плиту пресса. При опускании траверсы верхняя плита контактирует с плоской поверхностью пластины, передавая усилие на заходный конус бойка.

Обжатие образца осуществлялось по циклам деформирования, при каждом из которых осуществлялся подъем траверсы пресса, ручная подача заготовки на 10 мм с проворотом на угол $45^\circ \pm 5^\circ$ с целью исключения недеформированных участков. Материал образцов – сталь 45 ГОСТ 1050–2013.

Для выявления характера изменения силы деформирования и последующего сравнения результатов, было проведено четыре параллельных эксперимента в аналогичных условиях бойками различного профиля. В качестве результата каждого опыта принималось развиваемое усилие пресса на каждом цикле.

Затем проведена обработка экспериментальных значений методами математической статистики. Проверка адекватности выполнена по критерию Фишера, проверка воспроизводимости эксперимента – по критерию Кохрена. Далее по имеющимся экспериментальным значениям усилий выполнен расчет остальных энергосиловых параметров радиального обжатия по разработанной методике.

Полученные результаты позволили установить:

1. Экспериментальные значения усилий принадлежат нормальному распределению для всех профилей бойков.
2. Воспроизводимость эксперимента подтверждается критерием Кохрена при уровне значимости 0,05. Максимальная граница погрешности математического описания, рассчитанные по дисперсии адекватности при уровне значимости 0,05, составила $\pm 4,6\%$.

3. Адекватность математического описания опытным данным подтверждается критерием Фишера при доверительной вероятности 0,95.

4. При обжатии бойками с переменным углом заходного конуса выпуклого профиля наблюдается снижение силы деформирования. Наибольшее снижение силы и мощности деформирования достигается при обжатии бойками с гиперболическим профилем, при этом сила снижается на 23,6%, а мощность – на 17,1% по сравнению с бойками базового исполнения, имеющих конусный профиль с постоянным углом. Это можно объяснить тем, что при деформировании такими бойками, которые имеют наибольший диапазон изменения угла заходного конуса, достигается максимальное снижение площади контакта заходного участка бойков с заготовкой, что позволяет в процессе обжатия сконцентрировать силовые нагрузки в очаге меньшего объема и сократить потери на трение поверхности инструмента с заготовкой. К тому же достигается максимальный перенос работы деформирования в основную стадию с установленнымся процессом.

Таким образом, математическая модель, описывающая изменение угла заходного конуса и предела текучести обрабатываемого материала, может быть признана адекватной. Результаты эксперимента подтверждают итоги математического моделирования. Разработанная методика расчета допустима для определения энергосиловых параметров при обжатии бойками с переменными углами заходного участка с погрешностью, не превышающей допускаемую, которая в методике Радюченко Ю.С. принята равной 15%.

В четвертом разделе «Практическая реализация теоретических и экспериментальных исследований» разработаны практические рекомендации по повышению эффективности технологий радиального обжатия путем применения бойков с переменным углом заходного конуса.

Практическая реализация полученных результатов использована при изготовлении в условиях предприятия АО «Навлинский завод «Промсвязь» заготовки детали «Вал колонки», входящей в состав рулевого механизма трактора. Материал детали – сталь 45 ГОСТ 1050-2013. На основе анализа базовой технологии изготовления заготовки (табл. 1) принято решение: заменить комплект бойков, который используется на двух самых энергозатратных переходах деформирования.

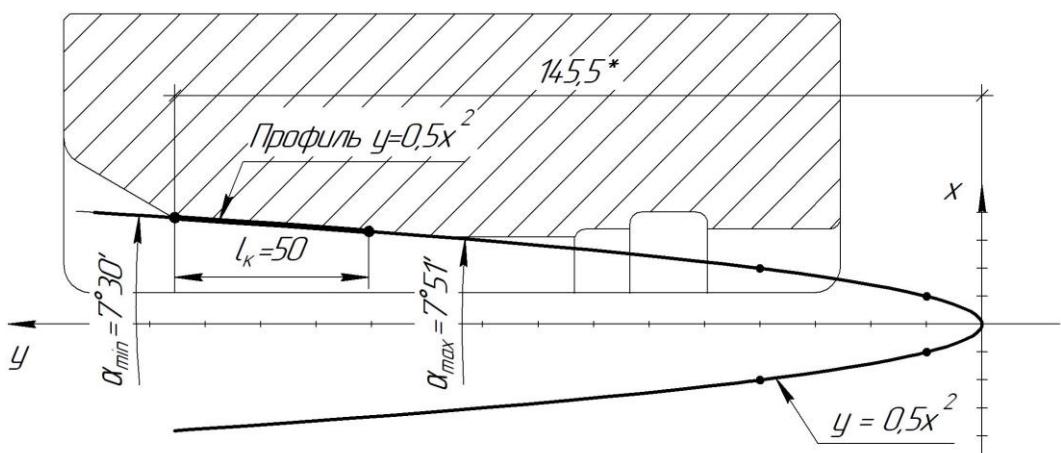
Таблица 1 – Режимы процесса деформирования

<i>Параметр процесса</i>	<i>Значение</i>
Начальный диаметр заготовки d_1 , мм	37
Конечный диаметр заготовки d_2 , мм	31
Применяемое оборудование	Ротационно-обжимная машина В2226
Шаг подачи заготовки S , мм на обжатие	0,8
Число оборотов обоймы сепаратора обжимного механизма n , об/мин	40

Окончание таблицы 1

Число опорных роликов в сепараторе обжимного механизма, <i>шт.</i>	12
Коэффициент трения между поверхностью заготовки и инструментом μ	0,15
Коэффициент скольжения сепаратора с обоймой обжимного механизма f	1,0
Материал бойков	Сталь 5ХНВ ГОСТ 5950–2000
Обрабатываемый материал	Сталь 45 ГОСТ 1050–2013
Предел текучести стали 45 в состоянии поставки σ_m , MPa	355
Относительная степень деформации на переходе ε	0,3
Площадь контакта заходной части бойков с поверхностью заготовки S , mm^2	3926
Угол заходного конуса бойков, α	$7^{\circ}30'$

Пользуясь базовой конструкцией радиально-обжимных бойков, спроектированы бойки с параболическим, гиперболическим и логарифмическим профилем заходного конуса для обжатия заготовок вала с диаметра 37 мм до 31 мм. Конструктивно разработанные бойки отличаются от базовых лишь геометрией заходного участка на одинаковой длине l_k , равной 50 мм. Угол заходного конуса для всех типов бойков в начальной точке принимается таким же, как и для бойков базового исполнения $\alpha_{min} = 7^{\circ}30'$ (рис. 4).



a)

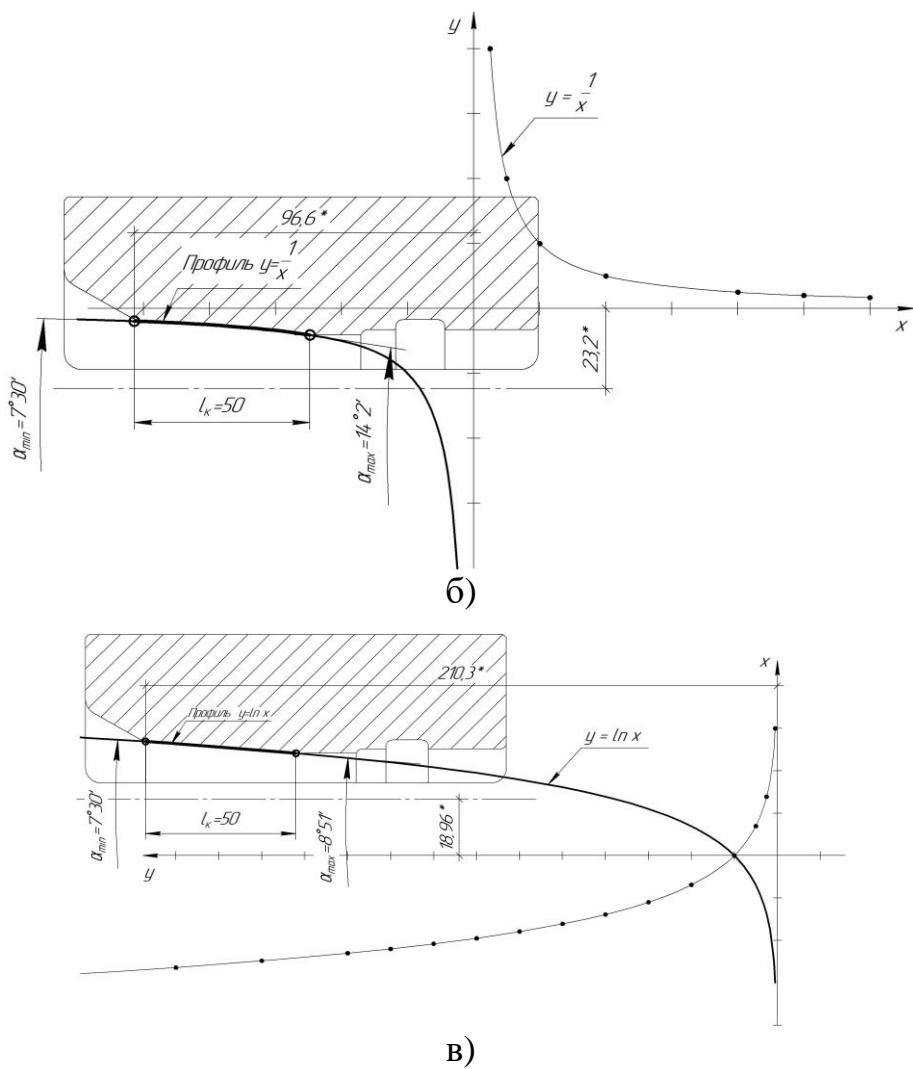


Рисунок 4 – Участки кривых, образующих профиль заходных участков бойков
 $\alpha_{min} = 7^{\circ}30'$, $l_k = 50$ мм: $d_2 = 31$ мм
 а) параболический; б) гиперболический; в) логарифмический

Материал бойков – сталь 5ХНВ ГОСТ 5950–2000, твердость рабочей поверхности HRC 55...64. Эскиз спроектированных бойков в общем виде представлен на рисунке 5, а основные конструктивные элементы – в таблице 2.

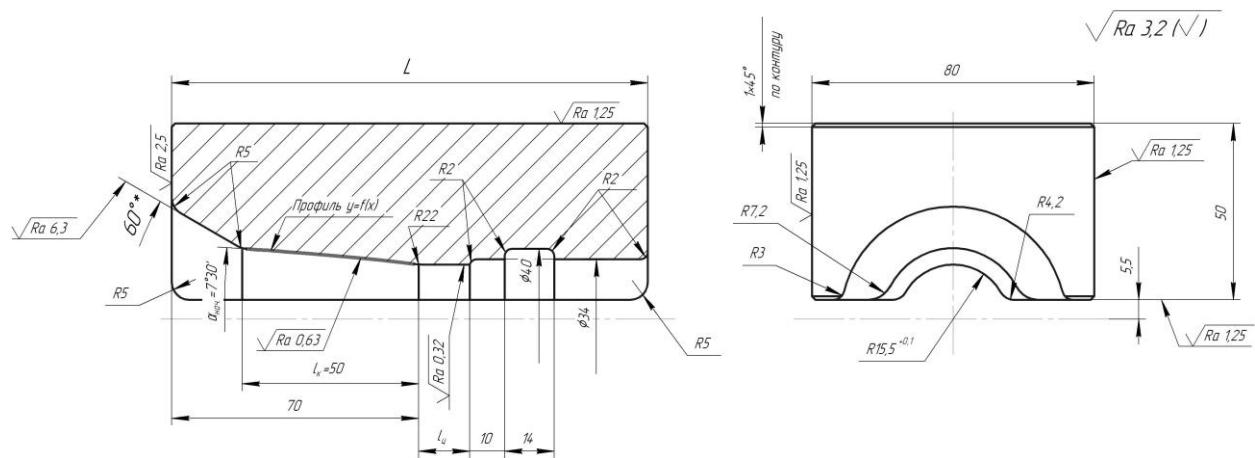


Рисунок 5 – Эскиз бойка с переменным углом заходного конуса

Таблица 2 – Основные конструктивные элементы бойков

Характеристика	Профиль бойка	Профиль рабочей части		
		Параболический	Гиперболический	Логарифмический
Длина заходного конуса l_k , мм		50		
Угол заходного конуса в начальной точке α_{min}		7°30'		
Угол заходного конуса в конечной точке α_{max}	7°50'37"	14°8'	8°51'	
Длина контакта заготовки с заходным конусом бойка $L_{конт}$, мм	44,7	29,4	41,4	
Длина калибрующего участка l_u , мм	22	22	20	
Соотношение длин $\frac{l_u}{l_k}$	0,49	0,49	0,48	
Диапазон угла заходного конуса, непосредственно контактирующий с заготовкой, $\alpha_{конт}$	7°32'4"… 7°50'37"	9°24'… 14°2'	7°42'…8°51'	
Площадь контакта заходной части бойков с поверхностью заготовки, $мм^2$	3838	2634	3574	
Общая длина бойка L , мм	140	135	140	

Затем выполнен расчет и сравнение энергосиловых параметров процесса обжатия при деформировании бойками различного профиля по разработанной методике. Результаты показали, что бойки с гиперболическим профилем заходного конуса дают наибольшую эффективность: усилие снижается на 42%, а мощность – на 31,6% по сравнению с бойками с постоянным углом конуса без потери точности и качества получаемых заготовок.

Наибольшее снижение энергосиловых параметров процесса деформирования наблюдается при обжатии бойками с гиперболическим профилем за счет:

1. Рационального профиля заходного участка с наибольшим диапазоном изменения угла α . Выбранный диапазон совпадает с производственными рекомендациями. Расчеты и моделирование показывают снижение площади проекции очага деформации, при этом мощность процесса снижается примерно так же, как и площадь контакта заходного участка бойка с заготовкой. Таким образом, снижение площади контакта положительно сказывается на концентрации деформаций в очаге.

2. Максимального переноса работы деформирования в основную стадию с установленнымся характером деформирования.

3. Сокращения неравномерности деформаций в начальной и конечной стадии.

В работе приведены рекомендации по выбору профиля заходных участков радиально-обжимных бойков. При этом кривые, описываемые

квадратичной функцией вида $y = 0,5x^2$, функцией обратной пропорциональности $y = \frac{1}{x}$ и функцией натурального логарифма $y = \ln x$ позволяют добиться наиболее плавного увеличения угла α к концу заходного участка бойка.

Базовая методика расчета энергосиловых параметров получила усовершенствование и может быть использована для расчета показателей при обжатии бойками с любой геометрией входной зоны.

Определен экономический эффект от замены базовых бойков на бойки с гиперболическим профилем на двух самых энергозатратных переходах радиального обжатия при производстве поковки вала колонки. Сила деформирования снижается на 42%, мощность – на 31,6% по сравнению с обжатием бойками базового исполнения, а общая себестоимость заготовки – на 5,67% с базовой технологией.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная задача, которая заключается в повышении эффективности технологии радиального обжатия и качества изделий путем сокращения энергозатрат процесса за счет оптимизации формы заходного участка деформирующего инструмента. В результате проведения теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты и сделаны выводы:

1. Выполнен анализ существующих разработок в области конструктивных элементов радиально-обжимных бойков, определено влияние их геометрических элементов на показатели процесса радиального обжатия. В результате установлено, что геометрические элементы бойков оказывают значительное влияние на характер протекания процесса и энергосиловые параметры радиального обжатия, при этом угол заходного конуса оказывает наибольшее влияние на процесс деформирования и его энергосиловые параметры.

2. Разработана и исследована математическая модель холодного радиального обжатия сплошных цилиндрических заготовок с помощью пошагового интегрирования по методу наименьших квадратов, численно учитывая изменение угла заходного конуса бойка и предела текучести обрабатываемого материала по стадиям деформирования. Результаты моделирования позволили разработать научно обоснованную методику расчета энергосиловых параметров радиального обжатия бойками с переменными углами заходного конуса, которая позволяет рассчитать энергосиловые параметры процесса при деформировании заготовок бойками с различной геометрией заходного конуса.

3. Проведены экспериментальные исследования, направленные на проверку полученных результатов математического моделирования. Результаты показывают, что при использовании бойков с переменными углами

заходного конуса снижается сила и мощность деформирования по сравнению с обжатием бойками базового исполнения с постоянным углом заходного участка. При этом наибольшая эффективность достигается при обжатии бойками с гиперболическим профилем: усилие снижается на 23,6%, а мощность – на 17,1%. Результаты подтверждаются критериями Кохрена и Фишера и подлежат нормальному распределению для всех типов бойков.

4. Разработаны практические рекомендации по повышению эффективности технологий радиального обжатия путем применения бойков с переменным углом заходного конуса выпуклого профиля. Доказано, что применение данных бойков позволяет снизить усилие и мощность деформирования за счет рациональной геометрии входной зоны, в результате чего сокращается площадь контакта заходного участка бойка с поверхностью заготовки, что положительно сказывается на концентрации деформаций в очаге. При обжатии данными бойками сокращается длительность начальной и конечной стадий с неустановившимся характером деформирования и наблюдается максимальный перенос работы формоизменения в основную стадию.

5. Испытаны и внедрены в производство радиально-обжимные бойки с гиперболическим профилем заходного конуса для производства заготовки вала колонки, которые позволяют снизить расходы электроэнергии на 33,3% на двух самых энергозатратных переходах формоизменения и снизить общую себестоимость заготовки на 5,67% по сравнению с базовой технологией радиального обжатия.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

Публикации в изданиях по списку ВАК:

1. Низмеев, А.А. Пути совершенствования оборудования для радиального обжатия / А.А. Низмеев // Вестник Брестского государственного технического университета. — 2019. — №4 (117). — С. 76–78.
2. Низмеев, А.А. Предварительная обработка цилиндрических деталей перед сваркой с помощью радиального обжатия в единичном производстве / А.А. Низмеев, Д.О. Дорохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. — 2025. — №4 (372). — С. 55–61.
3. Низмеев, А.А. Применение радиально-обжимных бойков для концевой заделки тросов методом опрессовки / А.А. Низмеев, Д.О. Дорохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. — 2025. — №5 (373). — С. 174–179.
4. Низмеев, А.А. К вопросу выбора геометрии инструмента для деформирования осесимметричных изделий / А.А. Низмеев, Д.О. Дорохов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. — 2025. — №6 (374). — С. 22–26.

Статьи в научных журналах:

5. Оценка эффективности радиального обжатия для получения заготовок ходовых винтов / А.А. Низмеев, И.Л. Бабичев, С.Н. Кучма, С.Ю. Стародубов // Сборник научных работ студентов ДонГТУ. Вып. 10 Часть I. — Алчевск: ГОУВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. — С.157–162.
6. Оценка эффективности ротационного обжатия для получения заготовок рычагов / Я.В. Грузин, А.А. Низмеев, С.Н. Кучма, С.Ю. Стародубов // Сборник научных работ студентов ДонГТУ. — 2019.— Вып. 12. Часть I. — С. 230–240.
7. Дрючан, А.В. Анализ эффективности ротационного и радиального обжатия для получения заготовки детали «Винт опоры» / А.В. Дрючан, А.А. Низмеев, С.Н. Кучма // Сборник научных работ студентов Донбасского государственного технического университета. Выпуск 13. Часть I. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. — С. 183–193.
8. Гутько, Ю.И. Анализ влияния геометрических элементов бойков на технологические показатели радиального обжатия / Ю.И. Гутько, А.А. Низмеев // Сборник статей всероссийской научно-практической конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные технологии: проблемы и перспективы» (19-22 мая 2020 г.). — Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2020. — С. 111–116.
9. Гутько, Ю.И. Моделирование процесса радиального обжатия бойками с переменным углом заходного конуса / Ю.И. Гутько, А.А. Низмеев // Вестник «Луганский государственный университет имени Владимира Даля». — 2020. — №11 (41). — С. 138–132.
10. Гутько, Ю.И. Анализ типовых конструкций радиально-обжимных бойков / Ю.И. Гутько, А.А. Низмеев // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием имени академика А.Г. Шипунова: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (26 марта 2021 г., г. Ливны). — Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева, 2021. — С. 42–45.
11. Гутько, Ю.И Методика расчета силовых параметров холодного радиального обжатия бойками с переменным углом заходного конуса / Ю.И. Гутько, А.А. Низмеев // Ресурсосберегающие технологии в металлургии и машиностроении: сборник научных трудов №1 (34) 2021 — Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2021. — С. 10–19.
12. Низмеев, А.А. Проектирование инструмента для производства заготовки детали «Вал колонки» холодным радиальным обжатием / А.А. Низмеев // Ресурсосберегающие технологии в металлургии и машиностроении: сборник научных трудов №1 (38) 2022 — Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2022. — С. 21–29.

Доклады на научных конференциях:

13. Гутько, Ю.И. Анализ влияния геометрических параметров бойков на

технологические показатели процесса радиального обжатия / Ю.И. Гутько, А.А. Низмеев // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: Сб. тезисов докл. IV Междунар. науч.-тех. конф. / Под общ. ред. В.А. Козачишина. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2019. — С.50–52.

14. Низмеев, А.А. Методы повышения стойкости бойков для радиального обжатия / А.А. Низмеев, Ю.И. Гутько // Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых: сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции (19 марта 2020 г.) / под общ. ред. С.В. Куберского. — Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. — С. 8–10.

15. Гутько, Ю.И. Применение бойков с переменным углом заходного конуса для радиального обжатия / Ю.И. Гутько, А.А. Низмеев // Сб. тезисов докл. V Междунар. науч.-тех. конф. / Под общ. ред. В.А. Козачишина. — Алчевск: ГОУ ВО ЛНР ДонГТИ, 2020. — С. 71–73.

16. Низмеев, А.А. Моделирование процесса радиального обжатия бойками с переменным углом заходного конуса / А.А. Низмеев, Ю.И. Гутько // Сборник материалов VI Международной заочной научной конференции «Форум молодых ученых: мир без границ», приуроченной ко Дню народного единства (15 октября – 25 декабря 2020 г.), в 8 ч. Ч. 1. Секции 1, 2 / Под общ. ред. В.А. Зубкова, С.А. Игнатенко. — Донецк: ДОНМАН, 2020. — С. 385–388.

17. Низмеев, А.А. Определение усилия холодного радиального обжатия при деформировании заготовок бойками с переменным углом заходного конуса / А.А. Низмеев // Материаловедение XXI века: материалы IV международной студенческой научно-практической конференции 5 февраля 2021 г., г. Луганск. — Луганск: Изд-во «ЛГУ им. В. Даля», 2021. — С. 31–32.

18. Низмеев, А.А. Анализ технических требований, предъявляемых к бойкам для радиального обжатия / А.А. Низмеев, Ю.И. Гутько // Актуальные проблемы современной науки: взгляд молодых ученых: сборник тезисов докладов II международной научно-практической конференции (18 марта 2021 г.). — Алчевск: ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2021. — С. 117–118.

19. Гутько, Ю.И. Исследование процесса радиального обжатия по стадиям деформирования / Ю.И. Гутько, А.А. Низмеев, А.Б. Таровик // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: сб. тезисов докл. VI Междунар. науч.-тех. конф. / Под общ. ред. В.А. Козачишина. — Алчевск: ГОУ ВО ЛНР ДонГТИ, 2021. — С.64–67.

20. Низмеев, А.А. Выбор рационального профиля ручья радиально-обжимных бойков с переменным углом заходного конуса / А.А. Низмеев, Ю.И. Гутько // Сборник материалов VIII Международной заочной научной конференции «Форум молодых ученых: мир без границ», приуроченной ко Дню народного единства (18 октября – 24 декабря 2021 г.), в 7 ч. Ч. 1. Секции 1, 2 / Под общ. ред. В.А. Зубкова, Т.П. Тимченко. — Донецк: ДОНМАН, 2022. — С. 323–325.