

На правах рукописи



Посалина Анастасия Евгеньевна

**РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ХОЛОДНОЙ
ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ
КРЕПЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛЕЙ С УЧЕТОМ ИХ
ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ**

Специальность 2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2026

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

Научный руководитель: Лавриненко Владислав Юрьевич
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Шibaков Владимир Георгиевич
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры машиностроения
Набережночелнинского института (филиала)
ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский)
федеральный университет»

Галкин Виктор Иванович
доктор технических наук, профессор,
профессор Образовательного центра института
«Новые материалы и производственные
технологии» ФГБОУ ВО «Московский
авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет»

Защита состоится « » _____ 2026 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д 24.2.331.01 при ФГАОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана
по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

Телефон для справок 8-499-263-66-33, доб. 36-28

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.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.01
кандидат технических наук, доцент



Плохих А.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Крепежные изделия – одни из самых многочисленных компонентов различных механизмов и машин, во многом определяющие их надежность и качество. Их число в современных машинах составляет до 30...40% от общего количества используемых деталей. В настоящее время в различных отраслях промышленности (в автомобилестроении, строительстве, мостостроении и др.) увеличивается тенденция к применению высокопрочных стержневых крепежных изделий (болты, винты и шпильки) классов прочности 8.8 и выше, изготавливаемых по требованиям ГОСТ и ТУ.

Применяемые производственные процессы изготовления высокопрочных стержневых крепежных изделий из углеродистых и низколегированных сталей включают следующие основные этапы: подготовка исходного металла для холодной объемной штамповки (сфероидизирующий или рекристаллизационный отжиг, фосфатирование, волочение), холодная объемная штамповка (ХОШ) и накатка резьбы; завершающая упрочняющая термическая обработка готовых изделий (термоулучшение - закалка и отпуск); нанесение защитного покрытия, контроль, сортировка и упаковка. Наиболее затратными этапами (до 30...40% энергопотребления и трудоемкости от общих производственных затрат) являются подготовка исходного металла перед холодной объемной штамповкой, а также окончательная упрочняющая термическая обработка отштампованных крепежных изделий.

Одним из путей снижения производственных затрат, сокращения трудоемкости изготовления и повышения качества высокопрочных стержневых крепежных изделий является применение углеродистых и низколегированных сталей с двухфазной феррито-мартенситной структурой. Данные стали имеют повышенную (при заданной прочности) пластичность и обеспечивают требуемый уровень механических и эксплуатационных свойств изготавливаемых крепежных изделий только за счет интенсивного деформационного упрочнения в процессе ХОШ без завершающего термоулучшения.

Ранее в разработанных технологиях изготовления высокопрочных крепежных изделий прочности 8.8 из сталей марок 08Р, 12Г1Р и 06ХГР с учетом деформационного упрочнения без завершающего термоулучшения имела место проблема разнопрочности изделий типа болт по длине, связанная с различным деформационным упрочнением головки и стержня болта при ХОШ.

Кроме этого, в настоящее время для изготовления высокопрочных крепежных изделий широкое применение находят углеродистые и низколегированные борсодержащие стали марок 20, 20Г2Р, 30Г1Р. Однако применение данных марок сталей для изготовления высокопрочных стержневых крепежных деталей без окончательной упрочняющей термической обработки ограничено отсутствием сведений о рациональных режимах получения предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ и научно-обоснованной методики проектирования технологических процессов ХОШ высокопрочных стержневых крепежных деталей.

Таким образом, разработка ресурсосберегающих технологий холодной объемной штамповки высокопрочных стержневых крепежных изделий из сталей 20, 20Г2Р, 30Г1Р с учетом их деформационного упрочнения, обеспечивающих снижение производственных затрат, сокращение энергопотребления и трудоемкости изготовления изделий, является актуальной задачей для современного машиностроения.

Целью работы является снижение энергозатрат и трудоемкости производства высокопрочных стержневых крепежных изделий холодной объемной штамповкой из сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р с учетом их деформационного упрочнения.

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

1. Анализ существующих технологических процессов изготовления высокопрочных крепежных стержневых деталей холодной объемной штамповкой (ХОШ) и анализ существующих исследований процессов холодного деформирования сталей с учетом деформационного упрочнения.

2. Разработка методики и проведение экспериментальных исследований влияния предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ на механические свойства сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р с учетом деформационного упрочнения.

3. Разработка конструкции автоматизированного комплекса предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ в виде бунтов из углеродистых и легированных сталей.

4. Проведение теоретических исследований процессов ХОШ высокопрочных стержневых крепежных изделий с учетом деформационного упрочнения для определения особенностей формоизменения, напряженно-деформированного состояния и силовых параметров.

5. Разработка методики проектирования технологических процессов ХОШ высокопрочных стержневых крепежных деталей классов прочности 8.8 и 10.9 из углеродистых и легированных сталей с учетом деформационного упрочнения.

6. Разработка ресурсосберегающих технологических процессов ХОШ детали «Шпилька М16х500» из стали 20, деталей «Шпилька М8» и «Болт колесный» из стали 20Г2Р с учетом деформационного упрочнения.

Объект исследования: холодная объемная штамповка высокопрочных стержневых крепежных изделий из сталей с учетом их деформационного упрочнения.

Предмет исследования: режимы предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ, напряженно-деформированное состояние и силовые параметры при ХОШ высокопрочных стержневых крепежных изделий из сталей с учетом деформационного упрочнения.

Методы исследований. Теоретические исследования особенностей формоизменения, напряженно-деформированного состояния, силовых параметров при ХОШ выполнены с использованием существующих положений теории обработки металлов давлением и компьютерного моделирования

процессов обработки металлов давлением в программном комплексе QForm ver.11.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием современных универсальных испытательных машин Galdabini QUASAR 1000 и Instron 650DX, спроектированной штамповой оснастки и инструмента, муфельной нагревательной печи СНОЛ, металлографического микроскопа Olympus Color View и высокопроизводительных компьютеров. Обработку полученных результатов проводили с использованием методов математической статистики и в разработанной специализированной подпрограмме для определения твердости изделий после ХОШ в программном комплексе QForm ver.11.

Автор защищает:

- результаты экспериментальных и теоретических исследований процессов предварительной обработки исходных заготовок и ХОШ высокопрочных крепежных изделий из сталей 20, 20Г2Р, 30Г1Р с учетом деформационного упрочнения, показывающие зависимости механических свойств и микроструктуры исходных заготовок от режимов их предварительной обработки, а также особенности формоизменения, напряженно-деформированное состояние и силовые параметры процесса штамповки. (соответствует п. 1, 3, 4 паспорта научной специальности 2.5.7);

- методику проектирования технологических процессов ХОШ высокопрочных стержневых крепежных деталей класса прочности 8.8 и 10.9 из сталей 20, 20Г2Р, 30Г1Р с учетом деформационного упрочнения;

- ресурсосберегающие технологические процессы ХОШ детали «Шпилька М16х500» класса прочности 8.8 из стали 20, деталей «Шпилька М8» и «Болт колесный» класса прочности 10.9 из стали 20Г2Р с учетом деформационного упрочнения;

- конструкцию автоматизированного комплекса предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ в виде бунтов диаметром 10...18 мм и массой до 1500 кг из углеродистых и низколегированных сталей для получения требуемых стабильных механических свойств исходных заготовок для ХОШ.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается применением современного испытательного оборудования и методов анализа, сходимостью теоретических и экспериментальных результатов исследований с расхождением менее 6...8%, а также промышленной апробацией результатов исследований.

Научная новизна заключается:

- в полученных режимах предварительной обработки исходных заготовок из сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р (предварительная термическая обработка - нагрев до температур 720...760°C, охлаждение в воде, отпуск 300...350°C и предварительная деформация - волочение со степенью обжатия 5...20%) для ХОШ высокопрочных стержневых крепежных изделий требуемого класса прочности с учетом деформационного упрочнения;

- в разработанных математических моделях процессов ХОШ высокопрочных стержневых крепежных изделий из сталей 20, 20Г2Р, 30Г1Р с учетом

деформационного упрочнения, позволяющих определять твердость полученных изделий, напряженно-деформированное состояние и силовые параметры процесса деформирования.

Практическая значимость заключается:

- в разработанной методике проектирования технологических процессов ХОШ высокопрочных стержневых крепежных деталей типа болт/винт и шпилька классов прочности 8.8 и 10.9 из сталей 20, 20Г2Р, 30Г1Р с учетом деформационного упрочнения, обеспечивающей повышение качества изготавливаемых изделий, снижение энергопотребления и сокращение трудоемкости изготовления изделий;

- в разработанных ресурсосберегающих технологических процессах ХОШ детали «Шпилька М16х500» класса прочности 8.8 из стали 20 и деталей «Шпилька М8», «Болт колесный» класса прочности 10.9 из стали 20Г2Р с учетом деформационного упрочнения, обеспечивающих получение требуемых механических свойств изделий без завершающей упрочняющей термической обработки и снижение затрат на производство;

- в разработанной конструкции автоматизированного комплекса предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ в виде бунтов диаметром 10...18 мм и массой до 1500 кг из углеродистых и низколегированных сталей для получения требуемых механических свойств и микроструктуры заготовок для последующей ХОШ с учетом деформационного упрочнения.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в проведении экспериментальных и теоретических исследований влияния режимов предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ на механические свойства, деформационное упрочнение и микроструктуру сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р; исследований процессов ХОШ высокопрочных стержневых крепежных изделий из сталей с учетом их деформационного упрочнения для определения особенностей формоизменения, напряженно-деформированного состояния и силовых параметров; разработке ресурсосберегающих технологических процессов изготовления детали «Шпилька М16х500» деталей «Шпилька М8», «Болт колесный» из сталей с учетом деформационного упрочнения; разработке конструкции автоматизированного комплекса предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ в виде бунтов из углеродистых и легированных сталей.

Реализация работы. Разработанные ресурсосберегающие технологические процессы изготовления деталей «Шпилька М16х500», «Шпилька М8» и «Болт колесный» из сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р с учетом их деформационного упрочнения прошли промышленную апробацию и признаны перспективным для внедрения в производство на АО «БЕЛЗАН» (г. Белебей) и ООО «ОСПАЗ» (г. Орел).

Разработанная методика проектирования технологических процессов ХОШ высокопрочных стержневых крепежных деталей классов прочности 8.8 и 10.9 из сталей 20, 20Г2Р, 30Г1Р с учетом их деформационного упрочнения и автоматизированный комплекс предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ в виде бунтов диаметром 10...18 мм и массой до 1500 кг из

углеродистых и низколегированных сталей могут быть использованы на предприятиях – производителях крепежных изделий (АО «БЕЛЗАН», ООО «ОСПАЗ», ОАО «ММК-МЕТИЗ», ООО «Параллель», ООО ЗВК «Бервел» и др.) для повышения качества изготавливаемых изделий, снижения энергопотребления и трудоемкости изготовления изделий.

Разработанный технологический процесс изготовления детали «Колесный болт» защищен патентом РФ на изобретение № 2845806 и планируется к применению в производственных условиях АО «БЕЛЗАН» (г. Белебей).

Апробация работы. Основные положения и материалы работы доложены на Международной научно-технической конференции «МашТех - 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении». М., 2022; XX Международной научно-технической конференции, посвящённой 165-летию со дня рождения основоположника космонавтики, создателя теории межпланетных сообщений, Константина Эдуардовича Циолковского. Рязань, 2022; Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии, оборудование и материалы заготовительных производств в машиностроении». М., 2022; XXI Международной научно-технической конференции, посвящённой 35-летию полета орбитального корабля-ракеты многоразовой транспортной космической системы «Буран». Рязань, 2023; Международной научно-технической конференции «Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2024 (ICMSSTE 2024)». Ялта, 2024; XII конференция молодых специалистов по перспективам развития металлургических технологий, посвященной 115-й годовщине со дня рождения Александра Павловича Гуляева. М., 2023; VIII Всероссийском молодежном научном форуме «Наука будущего – наука молодых». Орел, 2023; Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ в области инженерных и гуманитарных наук, посвященный 170-летию В. Г. Шухова М., 2023; XV Международной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии в машиностроении». М., 2023; научных семинарах кафедры технологий обработки материалов МГТУ им. Н.Э. Баумана; на совещаниях технических советов АО «БЕЛЗАН» и ООО «ОСПАЗ».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, 6 статьи в сборниках трудов научно-технических конференций, а также получен 1 патент на изобретение. Общий объем – 2,6 п. л., авторский вклад – 1,6 п. л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав основного текста, основных выводов и заключения по работе, приложений. Общий объем диссертации составляет 152 страницы. Диссертация содержит 52 рисунка, 30 таблиц и список литературы из 101 наименования.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА 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 главе 1 проведен анализ существующих технологических процессов изготовления высокопрочных стержневых крепежных деталей холодной объемной штамповкой (ХОШ) и анализ существующих исследований процессов холодного деформирования углеродистых и легированных сталей с учетом их деформационного упрочнения.

Отмечено, что применяемые в настоящее время производственные процессы изготовления высокопрочных стержневых крепежных изделий из углеродистых и низколегированных сталей включают подготовку исходных заготовок для ХОШ (отжиг, фосфатирование, волочение), ХОШ изделий и накатку резьбы; завершающую упрочняющую термическую обработку готовых изделий (закалку и отпуск); нанесение покрытий; контроль, сортировку и упаковку готовых изделий.

Одним из путей снижения производственных затрат и энергопотребления, сокращения трудоемкости изготовления и повышения качества высокопрочных стержневых крепежных изделий является применение углеродистых и низколегированных сталей с двухфазной феррито-мартенситной структурой (ДФМС). Исследования и разработку технологии для ХОШ крепежных изделий из сталей с ДФМС проводили С.А. Голованенко, Н.М. Фонштейн, М.В. Бобылев, Ю.А. Лавриненко, В.Е. Гринберг, Королева Е.Г., Л.П. Лебедев и др.

В 1980-1990-х годах на заводе «Автономаль» (в настоящее время АО «БЕЛЗАН», г. Белебей) были проведены опытные работы по изготовлению высокопрочных изделий типа болт и шпилька методом холодной объемной штамповки без завершающего термического упрочнения с достижением класса прочности 8.8 из сталей 08P, 12Г1Р и 06ХГР с двухфазной феррито-мартенситной структурой. Однако в настоящее время данные стали для изготовления крепежных изделий не используют. Кроме этого, имела место существенная разнородность изделий типа болт по длине, связанная с различным деформационным упрочнением головки и стержня детали при ХОШ.

Также отмечено, что существующие конструкции промышленных установок для предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ в виде бунтов не позволяют обеспечить требуемые механические свойства и микроструктуру заготовок для последующей ХОШ с учетом деформационного упрочнения.

Глава 2 посвящена разработке методики экспериментальных исследований влияния предварительной обработки исходных заготовок на механические свойства сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р. Разработанная методика включает выбор оборудования и режимов предварительной обработки, а также обработку результатов экспериментальных исследований.

Предварительная обработка исходных заготовок для ХОШ включает термическую обработку образцов из горячекатаного проката из сталей марок 20, 20Г2Р и 30Г1Р и предварительную деформацию. Термическая обработка состояла из нагрева заготовок в муфельной печи SNOL 10/1300 LSM01 до температур $T_{\text{н}}=720...760$ °С и последующего охлаждения в воде. Для обеспечения необходимых пластических свойств далее проводили низкотемпературный отпуск заготовок при температурах $T_{\text{отп}} = 250...350$ °С с последующими охлаждением на воздухе. После термической обработки проводили предварительную деформацию - волочение заготовок со степенью обжатия до 20% на обжимном станке СР 360.

После предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ проводили их металлографические исследования с использованием микроскопа Микромед МЕТ-3. Травление микрошлифов производили в 4%-м спиртовом растворе азотной кислоты. В Таблице 1 приведена микроструктура (двухфазная феррито – мартенситная) заготовок из сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р после предварительной обработки (нагрев заготовок до температур 740 и 750 °С, охлаждение в воде, отпуск при температуре 300 °С, без волочения).

Таблица 1.

Микроструктура сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р после предварительной подготовки по некоторым режимам

Температура нагрева, °С	Марка стали		
	20	20Г2Р	30Г1Р
Нагрев 740 °С, охлаждение в воде, отпуск 300 °С, без волочения			
Нагрев 750 °С, охлаждение в воде, отпуск 300 °С, без волочения			

Для определения механических свойств и построения кривых деформирования сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р после предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ проводили испытания на растяжение и сжатие по ГОСТ 1497-2023 и ГОСТ 25.503-97 на испытательных машинах УТС-250 и «Instron 600DX». Торцовые выточки на образцах для сжатия (осадки) заполняли смазкой «Longterm 2 Plus». Скорость нагружения при осадке - 50 мм/мин. В таблице 2 приведены механические свойства исходных заготовок для ХОШ после исследуемой предварительной обработки по различным режимам и после стандартной предварительной обработки (сфероидизирующего отжига).

На Рисунке 1 приведены кривые деформирования сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р, построенные по результатам испытаний на сжатие образцов после предварительной обработки по различным режимам. Полученные кривые деформирования были аппроксимированы степенной зависимостью (по закону Холломоны) в виде $\sigma = K \cdot \varepsilon^n$ (σ - напряжение текучести, ε - относительная деформация, K - коэффициент, n - показатель деформационного упрочнения).

Было установлено, что показатель n для сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р после стандартной предварительной обработки (сфероидизирующего отжига) находится в пределах 0,1...0,13, а после предлагаемой предварительной обработки показатель n увеличился до 0,2...0,4, что показывает повышенную способность к деформационному упрочнению исходных заготовок при последующей ХОШ.

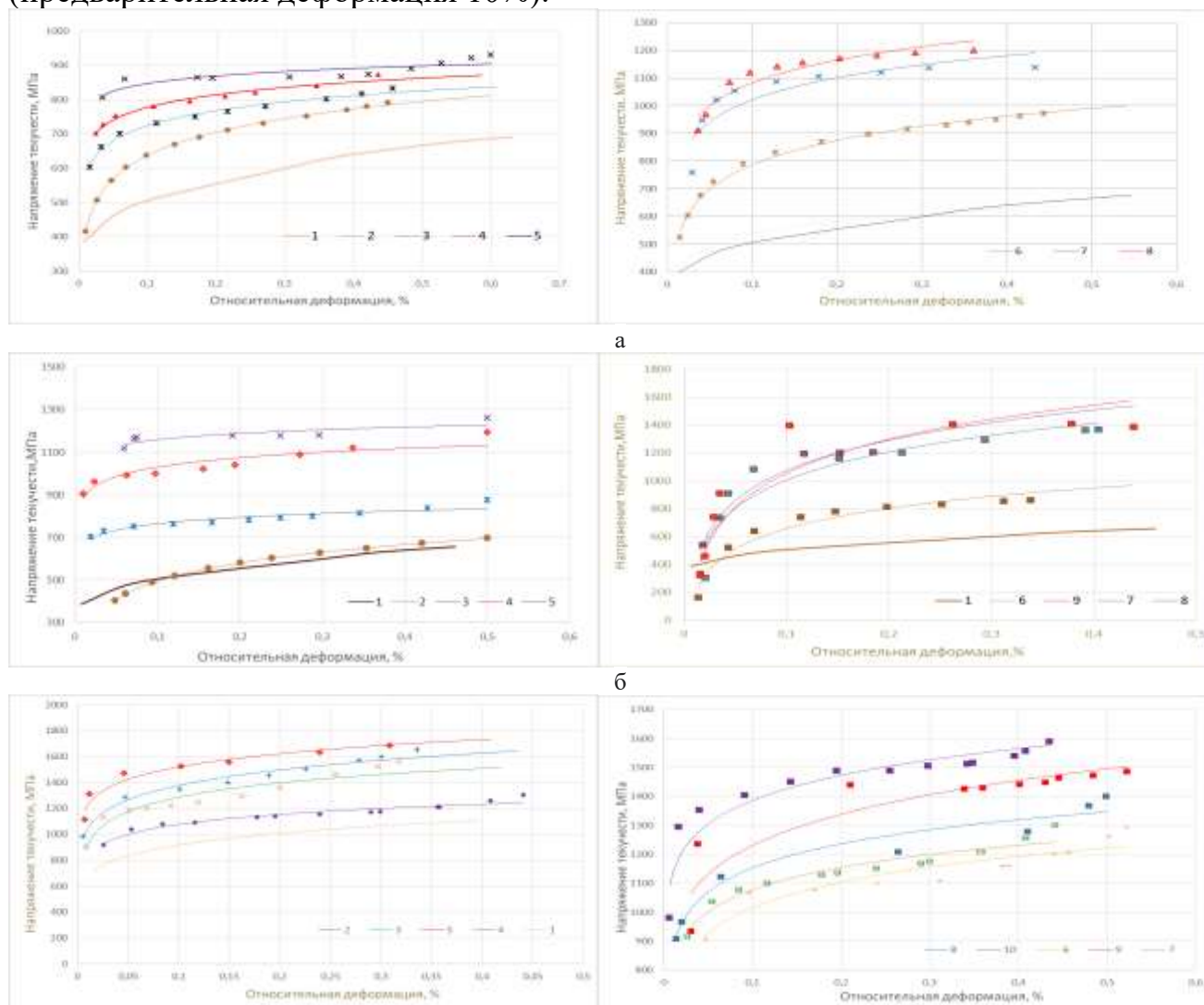
Таблица 2.

Механические свойства исходных заготовок для ХОШ из сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р после предварительной обработки по различным режимам

Номер режима предварительной обработки ($T_{\text{н}}$ / $T_{\text{отп}}$ / степень обжатия при волочении)	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ψ , %	НВ
Сталь 20				
После сфероидизирующего отжига	330	26	57	130
6 (740 °С / 300 °С, без волочения)	593	23	55	175
10 (740 °С / 300 °С, 5%)	620	19	50	220
11 (740 °С / 300 °С, 10%)	715	18	48	241
12 (740 °С / 300 °С, 15%)	795	16	46	267
14 (750 °С / 300 °С, 10%)	730	18	47	245
15 (750 °С / 300 °С, 15%)	802	15	45	267
Сталь 20Г2Р				
После сфероидизирующего отжига	495	22	54	153
18 (720 °С / 350 °С, без волочения)	625	20	52	264
25 (720 °С / 300 °С, 5%)	650	18	48	275
26 (720 °С / 300 °С, 10%)	715	18	48	295
28 (740 °С / 300 °С, 5%)	780	17	47	309
29 (740 °С / 300 °С, 10%)	815	14	44	313
Сталь 30Г1Р				
После сфероидизирующего отжига	525	20	51	173
35 (730 °С / 300 °С, без волочения)	650	19	50	264
36 (730 °С / 300 °С, 5%)	712	18	49	285
37 (730 °С / 300 °С, 10%)	800	14	43	315
39 (740 °С / 300 °С, 5 %)	790	15	44	307
40 (740 °С / 300 °С, 10%)	820	14	43	325

По результатам проведенных исследований были определены наиболее рациональные режимы предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ, рекомендуемые для разработки технологических процессов ХОШ высокопрочных крепежных изделий класса прочности 8.8 и выше из сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р с учетом деформационного упрочнения.

Кроме этого, были проведены экспериментальные исследования зависимости твердости образцов из стали 20Г2Р после предварительной обработки. В результате были получены линейные зависимости твердости HRC от степени деформации: $HRC = 31,373\varepsilon + 28,5$ (без предварительной деформации); $HRC = 54,902\varepsilon + 28,5$ (предварительная деформация 5%) и $HRC = 84,314\varepsilon + 28,5$ (предварительная деформация 10%).



В

Рисунок 1. Кривые деформирования сталей 20 (а), 20Г2Р (б) и 30Г1Р (в) после предварительной обработки

Глава 3 посвящена разработке конструкции промышленного автоматизированного комплекса предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ в виде бунтов диаметром 10...18 мм и массой до 1500 кг из углеродистых и низколегированных сталей, состоящего из разматывающего устройства, правильно-толкающего устройства, двухсекционного индукционного нагревателя для нагрева заготовок, трубчатого спрейера для охлаждения заготовок, сматывающего устройства и колпаковой футерованной термокамеры для проведения отпуска заготовок, а также встроенных пирометров для контроля температуры заготовок на всех этапах предварительной обработки.

На разработанную конструкцию автоматизированного комплекса подготовлена заявка на патент на изобретение.

Глава 4 посвящена теоретическим исследованиям процессов ХОШ высокопрочных стержневых крепежных изделий из исходных заготовок после предварительной обработки для определения особенностей формоизменения, напряженного – деформированного состояния и силовых параметров путем компьютерного моделирования в программном комплексе QForm ver.11.

В качестве исходных данных использовали существующие технологические переходы ХОШ детали «Колесный болт» (по данным АО «БЕЛЗАН») с диаметром исходной заготовки 14,8 мм, а также кривые деформирования стали 20Г2Р с 3 вариантами предварительной подготовки по режимам 21, 25 и 26 (Рисунок 1). Технологические переходы включали прямое выдавливание стержневой части, высадку головки, выдавливание углубления в головке, выдавливание наружного шестигранника головки и окончательное формирование головки детали. Для оценки равномерности распределения механических свойств (твердости HRC) по длине изделия после ХОШ использовали ранее экспериментально полученные линейные зависимости твердости HRC от степени деформации и реализованные в виде подпрограммы «Твердость HRC» к программному комплексу QForm ver.11.

В результате компьютерного моделирования установлено, что при использовании существующих переходов ХОШ детали «Колесный болт» из исходных заготовок из стали 20Г2Р после предварительной обработки по 3 вариантам имеет место различное деформационное упрочнение (разнопрочность) головки и стержневой части детали вследствие недостаточной деформации стержневой части (не более 40...45%) и большой деформации головки (более 60%), а полученные значения твердости по длине детали существенно превышали требования ГОСТ ISO 898-1— 2014.

Для обеспечения равномерного деформационного упрочнения (равнопрочности) по длине детали были предложены новые технологические переходы ХОШ детали «Колесный болт» (Рисунок 2) из исходной заготовки увеличенного диаметра 15,5 мм из стали 20Г2Р после предварительной обработки. Особенностью данной технологии ХОШ является применение двукратного прямого выдавливания стержневой части детали на 1 и 2 переходах с суммарной степенью деформации не менее 60%, выдавливание углубления в головке, выдавливание наружного шестигранника головки и окончательное формирование головки детали.

На Рисунке 3 приведены результаты компьютерного моделирования процесса ХОШ детали «Колесный болт» из исходной заготовки из стали 20Г2Р после предварительной обработки по режиму 21 (вариант 1) с использованием предложенных технологических переходов.

Установлено равномерное деформационное упрочнение (равнопрочность) головки и стержневой части детали вследствие примерно равной деформации стержневой части и головки (более 60%). При этом разброс значений интенсивности напряжений в головке и стержневой части не превышал

допустимых значений 80...100 МПа, а полученные значения твердости по длине детали соответствовали требованиям ГОСТ ISO 898-1— 2014.

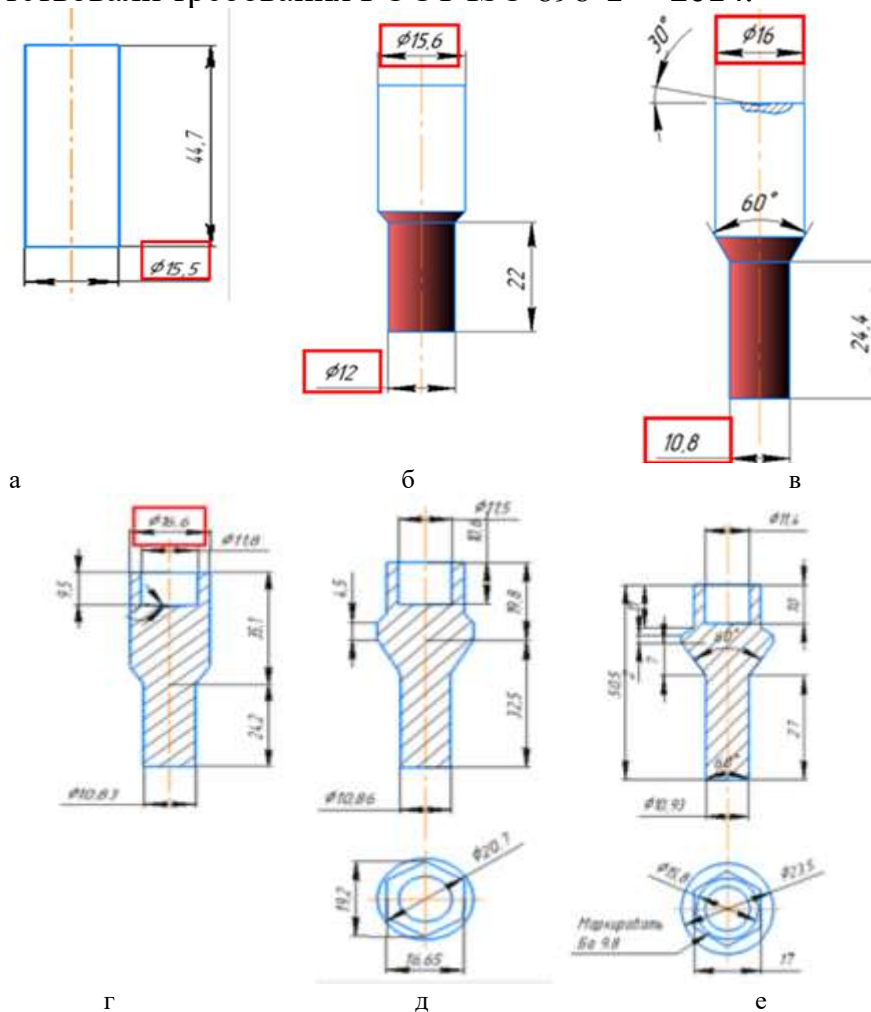


Рисунок 2. Предлагаемые технологические переходы ХОШ детали «Колесный болт» из исходной заготовки из стали 20Г2Р после предварительной обработки:
а – исходная заготовка; б – е – переходы штамповки

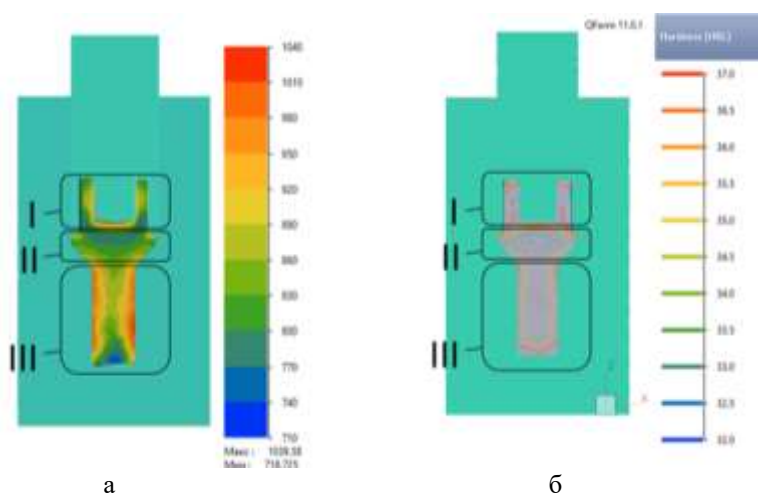


Рисунок 3. Распределение полей интенсивности напряжений (а) и распределение твердости HRC (б) в детали «Колесный болт» после ХОШ из исходной заготовки из стали 20Г2Р после предварительной обработки

Исследование силовых параметров процесса ХОШ детали «Колесный болт» из исходной заготовки из стали 20Г2Р после предварительной обработки показало некоторое увеличение сил деформирования на каждом переходе примерно на 15...20% по сравнению со стандартной технологией ХОШ из исходной заготовки после рекристаллизационного отжига.

Глава 5 посвящена разработке методики проектирования технологических процессов ХОШ высокопрочных стержневых крепежных деталей классов прочности 8.8 и 10.9 из углеродистых и легированных сталей с учетом деформационного упрочнения, которая включает следующие этапы.

1. Анализ исходных данных (чертеж стержневого крепежного изделия по требованиям ТУ и других нормативных документов предприятия или отрасли; требуемый класс прочности; чертеж штампованной заготовки).

2. Разработка технологических переходов ХОШ стержневого крепежного изделия и определение диаметра заготовки d_0 перед ХОШ с учетом требования обеспечения равнопрочности и суммарной степени деформации по длине изделия (для изделий типа болт / винт - не менее 60%). Для изделий типа шпилька диаметр d_0 равен диаметру под накатку резьбы.

3. Определение исходного диаметра горячекатаной исходной заготовки $d_{гк} = (1,1 \dots 1,15) d_0$.

4. Назначение режимов предварительной обработки горячекатаной исходной заготовки диаметром $d_{гк}$ с учетом марки стали (20, 20Г2Р или 30Г1Р), типа стержневой крепежного изделия (болт/винт или шпилька) и его требуемого класса прочности (8.8 и 10.9):

- предварительная термическая обработка горячекатаной исходной заготовки диаметром $d_{гк}$ с использованием автоматизированного комплекса предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ в виде бунтов.

- предварительная деформация (волочение) со степенью обжатия: для изделий типа болт / винт - не менее 5...7%; для изделий типа шпилька - не менее 12...16%

для получения требуемых механических свойств исходных заготовок для дальнейшей ХОШ (предел прочности не более 650 МПа, относительное удлинение не менее 22%, твердость НВ 170.. 280).

5. Предварительная обработка исходных заготовок для ХОШ по рекомендуемым режимам.

6. ХОШ крепежного изделия и накатка резьбы – для крепежных изделий типа болт / винт. Накатка резьбы - для крепежных изделий типа шпилька.

7. Нанесение покрытий на крепежные изделия (при температуре ниже температуры отпуска $T_{отп} = 300 \dots 350$ °С).

С использованием предлагаемой методики был разработан ресурсосберегающий технологический процесс ХОШ детали «Шпилька М16х500» класса прочности 8.8 из стали 20, который прошел промышленную апробацию на ООО «ОСПАЗ».

Кроме этого, были разработаны технологические процессы ХОШ деталей «Шпилька М8» класса прочности 10.9 из стали 20Г2Р. В Таблице 3 приведены

основные параметры предлагаемого технологического процесса изготовления детали «Шпилька М8» из стали 20Г2Р с учетом деформационного упрочнения, а в Таблице 4 – механические свойства данной детали, изготовленной по предлагаемой технологии на АО «БЕЛЗАН».

Таблица 3.

Основные параметры предлагаемого технологического процесса изготовления детали «Шпилька М8»

№	Основные параметры
1	Диаметр заготовки d_0 (под накатку резьбы М8): $d_0 = 7,75$ мм
2	Диаметр горячекатаной исходной заготовки: $d_{гк} = 9$ мм
3	Режимы предварительной обработки исходных заготовок: - предварительная термическая обработка ($T_n = 730...750$) °С, охлаждение в воде, отпуск при $T_{отп} = 300...350$ °С, 60 мин. Оборудование: автоматизированный комплекс предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ в виде бунтов; - волочение (калибровка) на диаметр 8,0 мм, степень обжатия 20,9 %; - редуцирование двух концов заготовки на диаметр 7,75 мм (степень обжатия 6,2 %). Оборудование: стан правильно-калибровочный СПК 08-40
4	Накатка резьбы М8 на заготовку диаметром 7,75 мм после предварительной обработки исходных заготовок. Оборудование: резьбонакатной станок RG20N

Таблица 4.

Механические свойства детали «Шпилька М8», изготовленной по предлагаемой технологии

Параметр	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость НВ
Значение	1338	13,0	339
Требования ГОСТ ISO 898-1 - 2014	минимум 1000	минимум 9.0	316...375

Разработанный технологический процесс изготовления детали «Шпилька М8» класса прочности 10.9 из стали 20Г2Р с учетом деформационного упрочнения при ХОШ прошел промышленную апробацию и признан перспективным для внедрения в производство на АО «БЕЛЗАН».

Также был разработан новый технологический процесс изготовления детали «Колесный болт» класса прочности 10.9 из исходной заготовки из стали 20Г2Р после предварительной обработки с учетом деформационного упрочнения при ХОШ, использование которого позволяет повысить качество изделий (увеличить класс прочности с 8.8 до 10.9), снизить энергопотребление до 1,2...1,3 раза и уменьшить общую трудоемкость изготовления в 5...6 раз. Вместе с тем, возможное несущественное снижение стойкости инструмента ХОШ детали «Колесный болт» из исходной заготовки из стали 20Г2Р после предварительной обработки вследствие увеличения сил деформирования на 15-20% по сравнению со стандартной технологией не повлияет на общую экономическую эффективность предлагаемой технологии ХОШ, обеспечивающей существенное снижение затрат на производство.

Также были разработаны схема наладки инструмента и рабочие чертежи рабочего инструмента по переходам.

Разработанный технологический процесс изготовления детали «Колесный болт» класса прочности 10.9 из стали 20Г2Р с учетом деформационного упрочнения признан перспективным для внедрения в производство на АО «БЕЛЗАН». На предлагаемый технологический процесс получен патент РФ на изобретение № 2845806.

В заключении приведены основные результаты и выводы по работе.

Приложения содержат отдельные результаты проведенных экспериментальных и теоретических исследований.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены научно-обоснованные технические решения, направленные на разработку ресурсосберегающих технологий холодной объемной штамповки высокопрочных стержневых крепежных изделий из сталей 20, 20Г2Р, 30Г1Р с учетом их деформационного упрочнения, обеспечивающих повышение качества изготавливаемых изделий, снижение производственных затрат и сокращение трудоемкости изготовления, 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 технологических процессов изготовления высокопрочных стержневых крепежных деталей методом холодной объемной штамповки выявлено, что одним из путей снижения производственных затрат, сокращения трудоемкости изготовления и повышения качества высокопрочных стержневых крепежных изделий из углеродистых и низколегированных сталей является применение предварительной обработки, включающей предварительную термическую обработку для получения двухфазной феррито-мартенситной структуры и предварительную деформацию, что обеспечивает требуемый уровень механических свойств крепежных изделий только за счет деформационного упрочнения стали в процессе холодной объемной штамповки без завершающей упрочняющей термической обработки.

2. Проведенные экспериментальные исследования влияния предварительной обработки исходных заготовок на механические свойства сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р с учетом деформационного упрочнения позволили установить наиболее рациональные режимы предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ.

Также было установлено, что показатель деформационного упрочнения сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р после предлагаемой предварительной обработки увеличивается до 0,2...0,4, что показывает повышенную способность к деформационному упрочнению исходных заготовок при последующей ХОШ.

Кроме этого, были получены зависимости твердости образцов из стали 20Г2Р после предварительной обработки от степени деформации при сжатии (осадке).

3. Разработанная конструкция автоматизированного комплекса предварительной обработки исходных заготовок для ХОШ в виде бунтов диаметром 10...18 мм и массой до 1500 кг из углеродистых и низколегированных сталей обеспечивает получение требуемых стабильных механических свойств

исходных заготовок для дальнейшей ХОШ высокопрочных стержневых крепежных изделий класса прочности 8.8 и выше из углеродистых и легированных сталей с учетом деформационного упрочнения с максимальной производительностью до 180 кг/ч.

4. Проведенные теоретические исследования процессов холодного деформирования при компьютерном моделировании в программном комплексе QForm позволили разработать математические модели процессов ХОШ высокопрочных стержневых крепежных изделий из исходных заготовок после предварительной обработки с учетом деформационного упрочнения, позволяющие определить твердость полученных изделий, напряженно-деформированное состояние и силовые параметры процесса деформирования.

Кроме этого, были разработаны технологические переходы ХОШ детали «Колесный болт» из исходной заготовки из стали 20Г2Р после предварительной обработки, обеспечивающие равномерное деформационное упрочнение (равнопрочность) головки и стержневой части детали (суммарная деформация в стержне и головке более 60%), а также твердость по длине детали в соответствии с требованиями ГОСТ ISO 898-1— 2014.

5. Разработанная методика проектирования технологических процессов изготовления высокопрочных крепежных деталей типа болт/винт и шпилька классов прочности 8.8 и 10.9 из сталей 20, 20Г2Р и 30Г1Р с учетом деформационного упрочнения обеспечивает повышение качества изготавливаемых изделий, снижение энергопотребления до 1,3 раза и сокращение трудоемкости изготовления изделий до 6 раз без завершающей упрочняющей термической обработки.

6. Разработанные ресурсосберегающие технологические процессы изготовления деталей «Шпилька М16х500» из стали 20 класса прочности 8.8, «Шпилька М8» и «Болт колесный» из стали 20Г2Р класса прочности 10.9 с учетом деформационного упрочнения обеспечивают получение требуемых механических свойств изделий без завершающей упрочняющей термической обработки и обеспечивают снижение энергозатрат на производство.

Данные процессы прошли промышленную апробацию и признаны перспективным для внедрения в производство на АО «БЕЛЗАН» и ООО «ОСПАЗ»,

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Направления повышения эффективности производства высокопрочных крепежных и сложнопрофильных деталей / А.Е. Посалина и др. // МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении: Сборник трудов Международной научно-технической конференции. Москва, 2022. С. 130-133 (0,19 п.л./0,05 п.л.).

2. Экспериментальные исследования влияния предварительной подготовки на механические свойства двухфазных феррито-мартенситных сталей для изготовления высокопрочных крепежных изделий / А.Е. Посалина и др. //

Заготовительные производства в машиностроении. 2023. Т. 21. № 1. С.23-27 (0,25 п.л./0,12 п.л.).

3. Лавриненко В.Ю., Посалина А.Е. Исследование свойств стали 20Г2Р с двухфазной феррито-мартенситной структурой / Новые технологии в учебном процессе и производстве. Материалы XXI Международной научно-технической конференции, посвящённой 35-летию полета орбитального корабля-ракетоплана многоразовой транспортной космической системы «Буран». Под редакцией А.Н. Паршина. Рязань, 2023. С. 169-171 (0,19 п.л./ 0,09 п.л.).

4. Лавриненко В.Ю., Лавриненко Ю.А., Посалина А.Е. Исследования влияния предварительной подготовки на механические свойства двухфазных ферритно-мартенситных сталей для изготовления высокопрочных крепежных изделий // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2024. Том 80. №2. С.25-30 (0,32 п.л./ 0,11 п.л.).

5. Лавриненко В.Ю., Лавриненко Ю.А., Галиахметов Т.Ш., Посалина А.Е. Разработка технологии изготовления высокопрочных крепежных изделий из стали 20Г2Р с двухфазной феррито-мартенситной структурой // Заготовительные производства в машиностроении. 2024. Т. 22, № 7. С. 311—314 (0,19 п.л./0,05 п.л.).

6. Посалина А.Е., Лавриненко В.Ю. Исследование процесса ХОШ детали «Болт колесный» из стали 20Г2Р с двухфазной феррито-мартенситной структурой // Научно-технические технологии в машиностроении: Материалы XV Международной научно-технической конференции. В 2-х томах; Под общей редакцией В.Ю. Лавриненко. Москва, МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2024. С.165 – 167 (0,19 п.л./0,09 п.л.).

7. Лавриненко В.Ю., Лавриненко Ю.А., Посалина А.Е. Исследования и разработка технологии изготовления высокопрочных крепежных изделий из двухфазных ферритно-мартенситных сталей 20 и 20Г2Р // Материалы международной научно-практической конференции «Международная научно-практическая конференция "Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2024 (ICMSSTE 2024)». Симферополь: ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского». 2024. С. 47 – 53 (0,32 п.л./ 0,1 п.л.).

8. Посалина А.Е. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления высокопрочных крепежных деталей с двухфазной феррито-мартенситной структурой // Заготовительные производства в машиностроении. 2025. Т.23 № 5. С. 221-225 (0,25 п.л./0,25 п.л.).

Патенты

9. Патент на изобретение РФ № 2845806. Способ изготовления колесных болтов / Лавриненко Ю.А., Лавриненко В.Ю., Шачнев П.Г., Посалина А.Е. опубл. 25.08.2025. Бюл. №24.