



ЗЕМЛЯНУШНОВ НИКИТА АНДРЕЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРУЖИН СЖАТИЯ
УПРОЧНЕНИЕМ ПРИ КОНТАКТНОМ ЗАНЕВОЛИВАНИИ**

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением (технические науки)

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

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

Официальные оппоненты: **Кухарь Владимир Денисович,**
доктор технических наук, профессор, Заслуженный работник высшей школы РФ, ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», профессор кафедры «Механика и процессы пластического формоизменения»

Гладков Юрий Анатольевич,
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», доцент кафедры МТ6 «Технологии обработки давлением»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк.

Защита состоится «21» декабря 2023 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета 24.2.353.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: 302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29, аудитория 212.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: <http://oreluniver.ru>.

Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» (www.oreluniver.ru) и на официальном сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (<https://vak.minobrnauki.gov.ru/main>).

Автореферат разослан «___» _____ 2023 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Кожус Ольга Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При эксплуатации техники возникают отказы и неисправности узлов, агрегатов и систем, надёжность которых во многих случаях определяется ресурсом и эксплуатационной долговечностью их деталей. Актуально снижение массы деталей с целью повышения экономичности эксплуатируемых изделий. Примером таких деталей являются винтовые цилиндрические пружины сжатия. Основная неисправность пружин – потеря первоначально заданной жёсткости и силы сжатия пружины при рабочей нагрузке.

Повысить стабильность эксплуатационных параметров (циклическую долговечность, релаксационную стойкость, точность силовых характеристик) винтовых цилиндрических пружин сжатия можно путём совершенствования технологии их изготовления с использованием упрочняющих операций обработки металлов давлением (ОМД): комплексным локальным нагружением очага деформации с применением дробемётной обработки и контактного заневоливания.

Контактное заневоливание – технологическая операция упрочнения пружин и один из методов комплексного локального нагружения очага деформации – пластическая поверхностная обработка, заключающаяся в сжатии пружины до соприкосновения витков с приложением дополнительной осевой нагрузки. Пластическое упрочнение при контактном заневоливании отличается от холодной осадки, термоосадки и обычного заневоливания тем, что реализуется возможность управляемо формировать локальную пластическую зону поверхностного упрочнения пружины, варьируя величину прикладываемой нагрузки.

Повышению ресурса пружин посвятили свои труды учёные: Ю.А. Лавриненко, Е.Г. Белков, Ю.П. Анкудимов, А.Д. Асонов, М.В. Батанов, В.П. Белогур, С.И. Блинник, А.М. Епифанов, В.В. Забильский, С.М. Заседателев, М.М. Исмагилов, Д.А. Кальнер, И.И. Крымчанский, Б.Н. Крюков, А.П. Морозов, Г.А. Навроцкий, В.П. Остроумов, С.Д. Пономарев, А.Г. Рахштадт, Л.М. Редькин, М.Г. Соломатов, М.Н. Степанянц, В.В. Фадеев, Г.Н. Фролов, О.И. Шаврин, В.Н. Шалин, П.Д. Ясенчук и другие. Разработкой методов ОМД с комплексным локальным нагружением очага деформации занимались: В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, В.Д. Кухарь, В.Я. Осадчий, С.С. Яковлев. Однако в известных публикациях не рассмотрено теоретического обоснования совместного применения дробемётной обработки и контактного заневоливания в условиях комплексного локального нагружения при изготовлении пружин.

Степень разработанности темы исследования. Исследования в области повышения качества пружин ведутся в различных научно-исследовательских и образовательных учреждениях, таких как АО «ЦНИИ Материалов», ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», НТЦ АО «АВТОВАЗ», ООО «Фирма “Спринг-Центр”», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ», ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» и др. Но на сегодняшний день не изучено влияние совместного применения дробемётной обработки и контактного заневоливания на параметры пружин при их изготовлении.

Цель диссертационной работы – повышение стабильности эксплуатационных параметров (релаксационной стойкости, циклической долговечности, точности силовых характеристик) винтовых цилиндрических пружин сжатия упрочнением контактным заневоливанием после дробемётной обработки.

Объект исследования – процесс упрочнения пружин сжатия контактным заневоливанием после дробемётной обработки.

Предмет исследования – геометрические и силовые параметры, напряженно-деформированное состояние пружин при контактном заневоливании после дробемётной обработки; релаксационная стойкость, циклическая долговечность, точность силовых характеристик пружин.

Задачи исследования:

1. Разработать способ изготовления винтовых цилиндрических пружин сжатия с применением упрочняющих операций: дробемётной обработки и контактного заневоливания.

2. Выполнить теоретическое обоснование разработанного способа изготовления пружин с учётом увеличения предела текучести материала в упрочнённой зоне после дробемётной обработки при контактном заневоливании.

3. Разработать технологию изготовления внутренних клапанных пружин двигателя автомобиля ВАЗ из предварительно упрочненной пружинной проволоки, которая обеспечит повышение стабильности их эксплуатационных параметров.

4. Выполнить экспериментальное исследование влияния разработанной технологии на стабильность эксплуатационных параметров (релаксационной стойкости, циклической долговечности, точности силовых характеристик) пружин.

Научная новизна работы:

1. Научно обоснован новый способ упрочнения пружин с применением совместных операций пластического упрочнения: дробемётной обработки и контактного заневоливания.

2. Разработана и исследована математическая модель определения параметров пружин сжатия при изготовлении с применением совместных операций пластического упрочнения – дробемётной обработки и контактного заневоливания, учитывающая увеличение предела текучести материала пружинной проволоки в упрочнённой зоне после дробемётной обработки.

3. Определены зависимости свободной высоты рабочей части пружины, площади упругого ядра и величины упругого ядра сечения проволоки пружины от нагрузки контактного заневоливания (при температуре 250 °С, без учёта и с учётом влияния предшествующей контактному заневоливанию дробемётной обработки).

Теоретическая значимость.

Полученные результаты исследований вносят вклад в теорию обработки металлов давлением в части установления требуемой нагрузки контактного заневоливания при изготовлении винтовых цилиндрических пружин сжатия с применением совместных операций пластического упрочнения – дробемётной обработки и контактного заневоливания в условиях комплексного локального нагружения.

Практическая значимость.

Разработано устройство для контактного заневоливания пружин, позволяющее повысить стабильность эксплуатационных параметров пружин, в том числе работающих с ударным или силовым контактом витков. Устройство может быть использовано при упрочнении пружин в машиностроении, металлообработке, автомобилестроении и других отраслях промышленности.

Разработан способ изготовления высоконагруженных пружин сжатия, который может быть использован при разработке технологического процесса изготовления пружин уменьшенного сечения проволоки.

Разработана новая технология изготовления внутренних клапанных пружин двигателей автомобиля ВАЗ с применением дробемётной обработки и контактного заневоливания. Разработанная по новому способу технология изготовления пружин сжатия позволяет повысить стабильность эксплуатационных параметров (релаксационную стойкость, циклическую долговечность, точность силовых характеристик) пружин относительно пружин, изготовленных ранее известными способами.

Методология и методы исследования.

При выполнении теоретических исследований использованы механико-математические методы исследования, в частности метод малых упруго-пластических деформаций. Экспериментальные исследования выполнены с использованием методов низкотемпературной термомеханической обработки, дробемётной обработки, контактного

заневоливания, метрологического контроля. Результаты исследований обработаны методами математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование нового способа упрочнения пружин с применением совместных операций пластического упрочнения — дробемётной обработки и контактного заневоливания;

- математическая модель определения параметров винтовых цилиндрических пружин сжатия при их изготовлении с применением совместных операций пластического упрочнения – дробемётной обработки и контактного заневоливания в условиях комплексного локального нагружения;

- новая технология изготовления внутренних клапанных пружин двигателей автомобиля ВАЗ с применением дробемётной обработки и контактного заневоливания;

- результаты экспериментальных исследований влияния дробемётной обработки с последующим контактным заневоливанием при температуре 250 °С, а также контактного заневоливания при температуре 380 °С с последующей дробемётной обработкой на релаксационную стойкость, циклическую долговечность и точность силовых характеристик клапанных пружин автомобилей ВАЗ при их изготовлении по новой технологии.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается применением общепринятых методов исследования и подтверждается достаточной сходимостью результатов экспериментальных работ с результатами теоретических исследований.

Исследования выполнены при поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Разработка способа повышения ресурса высоконагруженных пружин сжатия для высокоскоростных транспортных средств» (программа УМНИК), а также при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, на 2021–2023 годы) в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Повышение эффективности изготовления пружин за счет совершенствования методов их упрочнения» и соответствуют направлению исследований паспорта научной специальности 2.5.7 «Технологии и машины обработки давлением»: п. 1 «Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены: на конференциях молодых ученых Ставропольского края «Инновации молодых ученых Северного Кавказа – экономике России» (г. Ставрополь, 2014, 2015); III...X ежегодных научно-практических конференциях Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону» (г. Ставрополь, 2015...2023); XIII ежегодной молодежной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Исследования и разработки передовых научных направлений» Южного научного центра РАН (г. Таганрог, 2017); XIII...XIV Международных научно-практических конференциях «Прогрессивные технологии в транспортных системах» (г. Оренбург, 2017, 2019); VI Международной научно-практической конференции «Прогресс транспортных средств и систем – 2018» (г. Волгоград, 2018); научном симпозиуме технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий» (г. Ростов-на-Дону, 2019); Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектива – 2019», «Перспектива – 2021», «Перспектива – 2023» (г. Нальчик, 2019, 2021, 2023); IX, X форумах вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства (г. Минск, 2020, 2021); Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования 2020» (г. Севастополь, 2020);

Международной научно-технической конференции «Умное производство и материалы 2021» (г. Ялта, 2021); Международной научно-технической конференции «Машиностроительные технологические системы» (г. Азов, 2022); IX Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте» (г. Орёл, 2023); VII Международной молодежной научно-технической конференции «Magnitogorsk Rolling Practice 2023» (г. Магнитогорск, 2023).

Реализация работы. Результаты работы рекомендованы к внедрению в производственные процессы АО «Белебеевский завод Автономаль» (г. Белебей) и ООО «Фирма “Спринг-Центр”» (г. Санкт-Петербург). Результаты работы используются в учебном процессе направления подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (г. Ставрополь).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 33 научные работы, в том числе: 8 статей в журналах из перечня изданий, рекомендованных ВАК; 8 публикаций, индексируемых международными базами данных Web of Science и/или Scopus; 3 патента на изобретение; 1 монография.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых источников и приложений. Работа изложена на 147 страницах текста, содержит 30 таблиц и 56 рисунков. Список использованных источников включает 131 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены обоснование актуальности решаемой проблемы, цель и задачи исследования, положения научной новизны и практической значимости, положения, выносимые на защиту, результаты апробации.

В первой главе рассмотрены проблемы снижения ресурса пружин, выполнен анализ способов упрочнения пружин, повышающих их эксплуатационные характеристики, проанализирован процесс упрочнения пружин контактным заневоливанием в условиях комплексного локального нагружения, рассмотрены устройства для контактного заневоливания, представлена математическая модель контактного заневоливания пружин.

Контактное заневоливание пружины характеризуется комплексным нагружением под действием двух силовых факторов в сечении витка – крутящего момента $M_{кр}$ и контактной нагрузки Q между витками (рисунок 1).

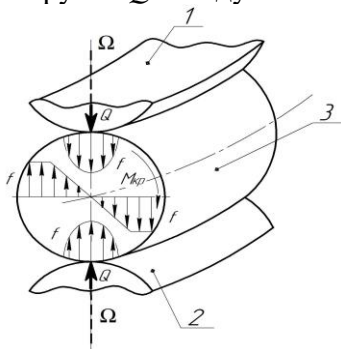


Рисунок 1 – Силовые факторы в сечении витка пружины при контактном заневоливании: 1, 2, 3 – деформируемые витки пружины; f – напряжения от сил, создающих глобальное нагружение; Ω - траектория движения деформируемых витков (прямая)

Во второй главе выполнено исследование напряженно-деформированного состояния пружин при комплексном локальном упрочнении, впервые учтено увеличение предела текучести материала пружинной проволоки в упрочненной зоне в результате предшествующей контактному заневоливанию дробемётной обработки.

Предложен способ изготовления высоконагруженных пружин. Проволоку упрочнённую подают на пружинонавивочный автомат и навивают пружину с шагом, превышающим шаг готовой пружины. Производят отпуск пружины при температуре 410 ± 10 °С. После 100 % люмоконтроля осуществляют шлифовку торцов и дробемётный наклеп,

промывку. От аналогов способ отличается тем, что производят пластическое упрочнение при температуре 200...250 °С сжатием осевой нагрузкой (10...300) F_3 (F_3 – сила сжатия пружины до соприкосновения витков) и снимают фаски с торцов. Нагрузку можно прикладывать вибрационно. На способ получен патент на изобретение РФ № 2464119.

На основе предложенного способа разработаны два варианта ресурсосберегающего технологического процесса изготовления высоконагруженных пружин. От аналога (патент на изобретение РФ № 2208056, авторы: Лавриненко Ю.А., Белков Е.Г., Фадеев В.В., Хайруллин А.А.) первый вариант отличается тем, что термоосадка при температуре 380 °С заменена на пластическое упрочнение при температуре 380 °С сжатием осевой нагрузкой (10...300) F_3 . От аналога (патент на изобретение РФ № 2208056) второй вариант отличается тем, что термоосадка при температуре 380 °С заменена на пластическое упрочнение при температуре 250 °С сжатием осевой нагрузкой (10...300) F_3 , дробемётная обработка выполняется до пластического упрочнения. Трёхкратная холодная осадка пружины в обоих вариантах не требуется.

Силовые и геометрические параметры пружин при пластическом упрочнении зависят от площади оставшейся работоспособной части $S_{упр}$ – упругого ядра (рисунок 2). Половина сечения витка пружины разделена на 49 элементов M1...M49 (рисунок 3).

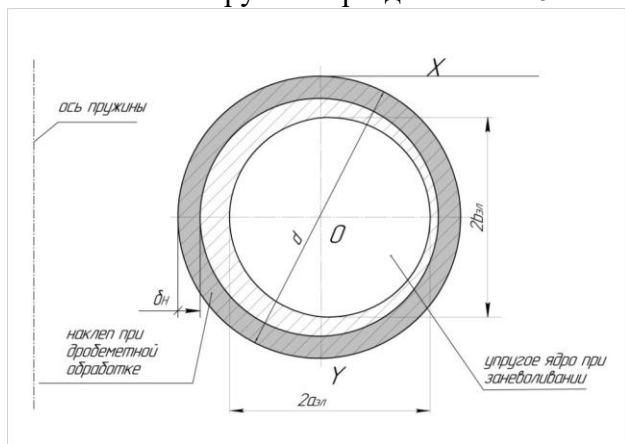


Рисунок 2 – Сечение витка пружины при дробемётной обработке и при заневоливании: δ_H – глубина наклепа при дробемётной обработке; $a_{эл}$, $b_{эл}$ – длина соответственно большей и меньшей полуоси эллипса

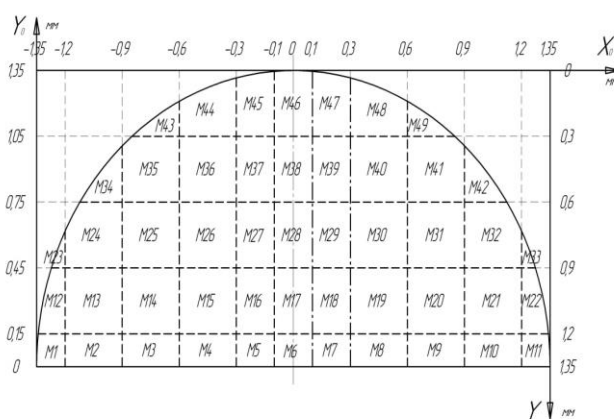


Рисунок 3 – Сетка точек половины сечения витка пружины M1 – M49

Проведено исследование зависимости свободной высоты рабочей части $H_{раб}$ пружины (рисунок 4), площади упругого ядра $S_{упр}$ (рисунок 5) и величины упругого ядра d_0 сечения проволоки (рисунок 6) пружины от нагрузки контактного заневоливания Q при температуре 250 °С без учёта и с учётом влияния предшествующей контактному заневоливанью дробемётной обработки.

Определены уравнения, описывающие полученные зависимости: высоты рабочей части пружины (1, 2), диаметра упругого ядра (3, 4), площади упругого ядра (5, 6) от нагрузки контактного заневоливания Q – без учёта (1, 3, 5) и с учётом (2, 4, 6) влияния дробемётной обработки соответственно:

$$H_{раб} = -0,00001 \cdot Q^2 - 0,0011 \cdot Q + 37,651 \quad (1)$$

$$H_{раб} = -0,00001 \cdot Q^2 + 0,0019 \cdot Q + 36,872 \quad (2)$$

$$d_{упр} = 0,000002 \cdot Q^2 - 0,0041 \cdot Q + 2,4387 \quad (3)$$

$$d_{упр} = -0,0000002 \cdot Q^2 - 0,0031 \cdot Q + 2,3363 \quad (4)$$

$$S_{\text{упр}} = -0,000002 \cdot Q^2 - 0,0014 \cdot Q + 4,7234 \quad (5)$$

$$S_{\text{упр}} = -0,000001 \cdot Q^2 - 0,0011 \cdot Q + 4,0745 \quad (6)$$

Установлена зависимость (рисунок 7) позволяющая оценить разницу между высотой рабочей части заневоленной пружины с учётом влияния дробемётной обработки и высотой рабочей части заневоленной пружины без учёта влияния дробемётной обработки при одинаковой нагрузке контактного заневоливания (т. е. связывающая уравнения 1 и 2). Определено уравнение (7), описывающее полученную зависимость

$$y = -0,3026 \cdot x^2 + 22,766 \cdot x - 391,27, \quad (7)$$

где y – высота рабочей части заневоленной пружины с учётом влияния дробемётной обработки, мм; x – высота рабочей части заневоленной пружины без учёта влияния дробемётной обработки, мм.

По требованиям конструкторской документации свободная высота рабочей части пружины после пластического упрочнения должна составлять $H_{\text{опр}} = 36,9$ мм. Из уравнения (2) определена нагрузка Q контактного заневоливания пружины, предварительно прошедшей дробемётную обработку.

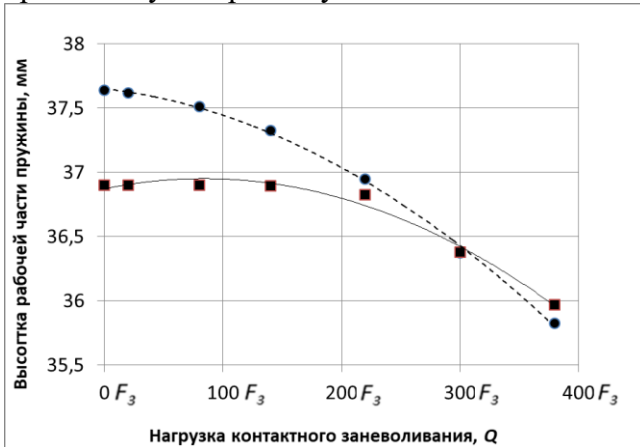


Рисунок 4 – Зависимость высоты рабочей части пружины от нагрузки контактного заневоливания*

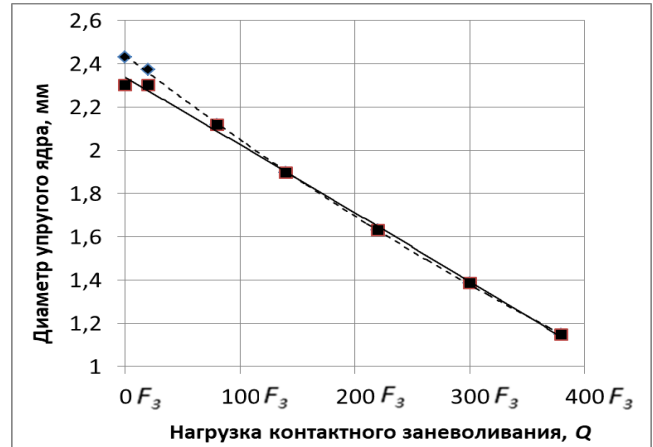


Рисунок 5 – Зависимость диаметра упругого ядра пружины от нагрузки контактного заневоливания*

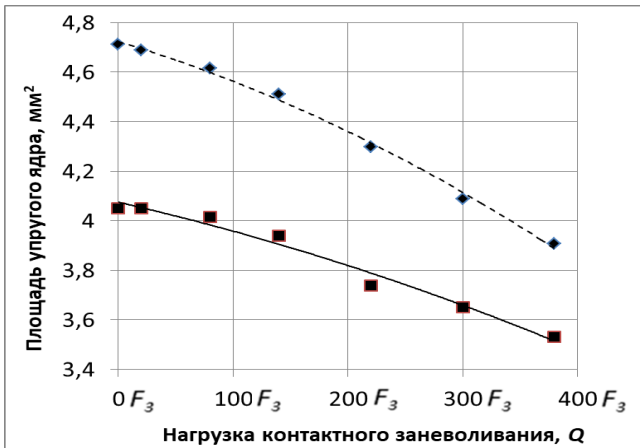


Рисунок 6 – Зависимость площади упругого ядра пружины от нагрузки контактного заневоливания*

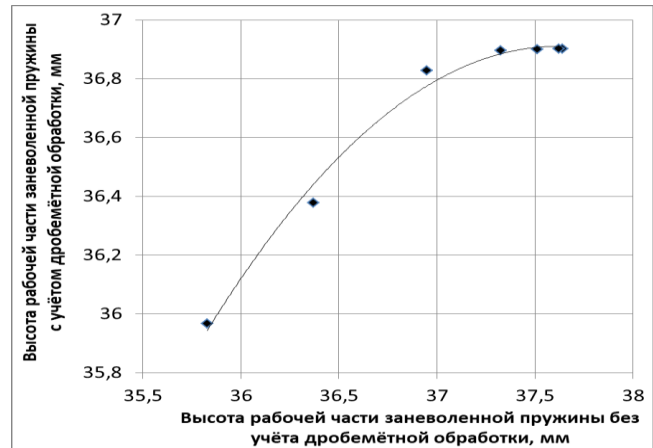


Рисунок 7 – Зависимость влияния предшествующей контактного заневоливания дробемётной обработки на высоту рабочей части пружины при упрочнении

Примечание*: — с учётом влияния дробемётной обработки ($H_{\text{опр}} = 38,818$ мм),
 - - - - без учёта влияния дробемётной обработки ($H_{\text{опр}} = 40,0$ мм)

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований разработанной технологии изготовления внутренних пружин клапанов двигателей автомобилей ВАЗ.

Операцию пластического упрочнения пружин следует проводить в устройстве для контактного заневоливания пружин. Наиболее приемлемой для массового производства является конструкция по полученным патентам на изобретение РФ № 2457917 и № 2481914, на основе которой изготовлено и испытано устройство для упрочнения внутренней пружины клапана двигателя автомобилей ВАЗ (рисунки 8, 9).

Работает устройство следующим образом. Устройство устанавливают на неподвижный стол прессы, а пуансон 1 закрепляют к верхней подвижной плите прессы. В установленный посредством винта 7 на плите 5 стакан 4 вставляют испытываемую пружину таким образом, чтобы торцы пружины контактировали с кольцевыми проточками или упорами торцов вкладышей 2 и 3. Затем пуансон 1 посредством движения прессы опускают, отчего пружина, сжимаясь, увеличивает свой наружный диаметр до тех пор, пока все её витки не придут в непрерывный контакт с внутренней поверхностью стакана 4. Благодаря контакту торцов пружины с кольцевыми проточками или упорами торцов вкладышей 2 и 3 и контакту витков пружины с внутренней поверхностью стакана 4 сжатая пружина примет правильную геометрическую форму. Благодаря наличию шаровой поверхности на пуансоне 1 и верхнем вкладыше 2 усилие прессы равномерно распределится по диаметру сжатой пружины. После требуемой выдержки под нагрузкой величиной $10...300 F_3$ пуансон 1 с вкладышем 2 поднимают, освобождая пружину. Движением нижнего цилиндра прессы посредством штока 6 и нижнего вкладыша 3 пружину вытесняют из стакана 4, которую снимают или сталкивают с нижнего вкладыша 3 применяемыми при штамповке известными способами и устройствами и направляют на дальнейшую обработку.

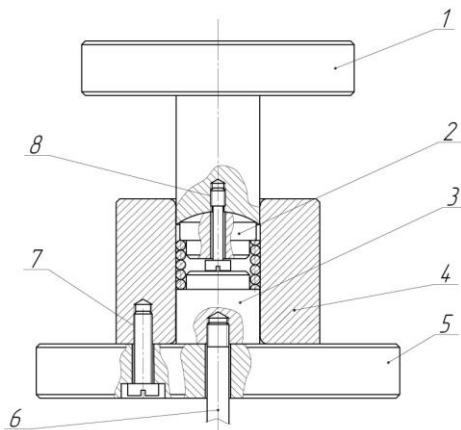


Рисунок 8 – Схема устройства для упрочнения внутренней пружины клапана двигателя автомобилей ВАЗ



Рисунок 9 – Устройство для заневоливания внутренней пружины клапана двигателя автомобилей ВАЗ (справа: устройство с пружиной и динамометром между захватами разрывной машины)

По предложенному способу разработаны два новых варианта технологии изготовления пружин (таблица 1).

На основании исследований были изготовлены партии серийных и опытных пружин (из проволоки Oteva 70). Силовые параметры изготовленных серийных и опытных (по новым технологиям) пружин представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Варианты технологий изготовления внутренней пружины клапана 2101-1007021 (серийный и новые)

№ п/п	Серийные пружины	Вариант 1 (250 °С) Опытные пружины	Вариант 2 (380 °С) Опытные пружины
1	Входной контроль проволоки на соответствие техническим условиям по ТУ 14-4-1380-96		
2	Промывка (обезжиривание)		
3	Контроль проволоки магнитный		
4	Навивка с отбраковкой дефектных пружин		
5	Промывка, сушка перед отпуском		
6	Отпуск при температуре 410 ± 10 °С в течение 30 минут		
7	Люминесцентный контроль		
8	Шлифовка торцов		
9	Дробемётная обработка в течение 3 минут для снятия заусенцев после шлифовки. ДСЛ-0,5 А = 0,3 мм	Дробемётная обработка в течение 10 минут. ДСЛ-0,5 А = 0,3 мм	Дробемётная обработка в течение 3 минут для снятия заусенцев после шлифовки. ДСЛ-0,5 А = 0,3 мм
10	Разборка сцепленных пружин		
11	Термоосадка при температуре 380 °С. Нагрузка 108...118 Н	-	-
12	Дробемётная обработка в течение 10 минут. ДСЛ-0,5 А = 0,3 мм	-	-
13	Отпуск при температуре 180 °С в течение 25 мин	Отпуск при температуре 180 °С в течение 25 мин	-
14	Разборка сцепленных пружин	Разборка сцепленных пружин	-
15	Трёхкратная осадка до соприкосновения витков с сортировкой по нагрузке F_2	-	-
16	-	Пластическое упрочнение пружин при температуре 250 °С нагрузкой (15,6...16,6) F_3 – 4988 Н. Время выдержки под нагрузкой 1...1,5 с	Пластическое упрочнение пружин при температуре 380 °С нагрузкой (11...12) F_3 – 3608 Н. Время выдержки под нагрузкой 1...1,5 с
17	-	-	Дробемётная обработка. ДСЛ-0,5; А = 0,203...0,303 мм. Время обработки 10 мин
18	-	-	Разборка сцепленных

№ п/п	Серийные пружины	Вариант 1 (250 °С) Опытные пружины	Вариант 2 (380 °С) Опытные пружины
			пружин
19	-	-	Отпуск при температуре 180 °С в течение 25 мин
20	-	-	Разборка сцепленных пружин
21	Снятие внутренних фасок		
22	Промывка, сушка		
23	Окончательный контроль		
24	Фосфатирование с промасливанием по ТУ 5.00432		
25	Испытания на КРИП		
26	Испытания на выносливость циклическим нагрузкам		

Примечание*: F_2 – сила сжатия пружины при рабочей нагрузке; A – прогиб контрольной пластинки.

Таблица 2 – Силовые параметры пружин 2101-1007021 серийных и изготовленных по новым технологиям

№ п/п	Серийные пружины		Опытная партия № 1 ($T = 250$ °С)		Опытная партия № 2 ($T = 380$ °С)	
	F_1 , Н	F_2 , Н	F_1 , Н	F_2 , Н	F_1 , Н	F_2 , Н
	136,3+13,7/-6,9 (129,4...150,0)	275,6±13,7 (261,9...289,3)	136,3+13,7/-6,9 (129,4...150,0)	275,6±13,7 (261,9...289,3)	136,3+13,7/-6,9 (129,4...150,0)	275,6±13,7 (261,9...289,3)
<i>min</i>	137,3	270,7	131,4	266,7	139,3	275,6
<i>max</i>	148,1	284,4	140,2	278,5	146,1	283,4
<i>X</i>	140,7	276,8	134,6	271,9	143,2	278,6
<i>R</i>	10,8	13,7	8,8	11,8	6,8	7,8

Примечание*: *min* – минимальное значение выборки; *max* – максимальное значение выборки; *X* – среднее арифметическое значение; *R* – размах рассеивания.

При изготовлении опытной партии пружин № 1 ($T = 250$ °С) стабилизация силовых параметров пружин увеличена на 14,3 %. При изготовлении опытной партии пружин № 2 ($T = 380$ °С) стабилизация силовых параметров пружин увеличена на 42,9 %.

После изготовления все пружины для испытания на стойкость к циклическим нагрузкам от H_0 (высота в свободном состоянии) до H_2 (высота при рабочей нагрузке F_2) были установлены на стенд резонансного типа DV8-S2 ф.«Gejrg Reicherter», Германия (рисунок 10).



Рисунок 10 – Стенд резонансного типа DV8-S2 ф.«Gejrg Reicherter»

Результаты испытаний серийных пружин и пружин, изготовленных по новой технологии на стойкость к циклическим нагрузкам – 6 млн циклов представлены в таблице 3. Пружины партии № 1 были подвергнуты дальнейшим испытаниям до 10 млн циклов (таблица 4).

Таблица 3 – Результаты испытаний пружин 2101-1007021 на стойкость к циклическим нагрузкам 6 млн циклов

№ п/п	До испытаний		После испытаний		$\Delta F_1, \%$	$\Delta F_2, \%$
	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$		
	136,3+13,7/-6,9 (129,4...150,0)	275,6±13,7 (261,9...289,3)	-	-		
Серийные						
<i>min</i>	137,3	270,7	135,3	267,7	0,68	0,30
<i>max</i>	148,1	284,4	146,6	281,5	2,00	1,76
\bar{X}	140,7	276,8	138,8	273,6	1,38	1,17
<i>R</i>	10,8	13,7	11,3	13,7	1,32	1,46
Опытная партия №1 ($T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$)						
<i>min</i>	131,4	266,7	130,4	266,3	0	0
<i>max</i>	140,2	278,5	138,8	277,0	1,11	0,54
\bar{X}	134,6	271,9	133,6	271,3	0,66	0,23
<i>R</i>	8,8	11,8	8,4	10,7	1,11	0,54
Опытная партия №2 ($T = 380 \text{ }^\circ\text{C}$)						
<i>min</i>	139,3	275,6	138,3	274,6	0,67	0
<i>max</i>	146,1	283,4	145,1	282,4	1,40	0,70
\bar{X}	143,2	278,6	141,5	277,5	1,14	0,45
<i>R</i>	6,8	7,8	6,8	7,8	0,77	0,70

Таблица 4 – Результаты испытаний опытной партии № 1 пружины 2101-1007021 ($T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$) на стойкость к циклическим нагрузкам 10 млн циклов

№ п/п	До испытаний		После испытаний		$\Delta F_1, \%$	$\Delta F_2, \%$
	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$		
	136,3+13,7/-6,9 (129,4...150)	275,6±13,7 (261,9...289,3)	-	-		
<i>min</i>	131,4	266,7	129,2	262,9	0,67	0,35
<i>max</i>	140,2	278,5	139,3	277,5	2,07	1,90
\bar{X}	134,6	272,0	132,7	268,7	1,39	1,19
<i>R</i>	8,8	11,8	10,1	14,6	1,4	1,55

Все пружины выдержали испытания без поломок. Величина F_2 после испытаний находится в пределах допуска.

Результаты анализов микроструктуры и измерения твердости в лаборатории АО «БелЗАН» испытанных пружин показали, что глубина дефектов поверхности образцов не превышает 0,01 мм (рисунок 11).

Структура поверхности образца (рисунок 12) – троосто-сорбит с игольчатой ориентацией по мартенситу 3 балла (ГОСТ 8233).

Структура сердцевины образца (рисунок 13) – троосто-сорбит с игольчатой ориентацией по мартенситу 3–4 балла (ГОСТ 8233).

Твердость образцов составила 48...52 HRC.

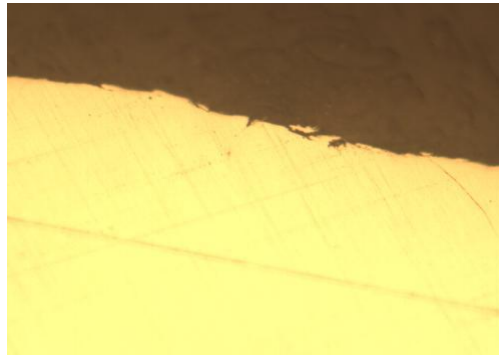
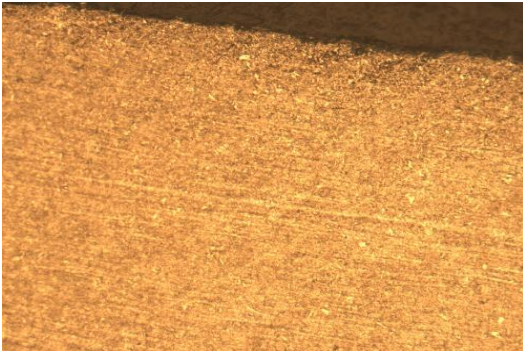
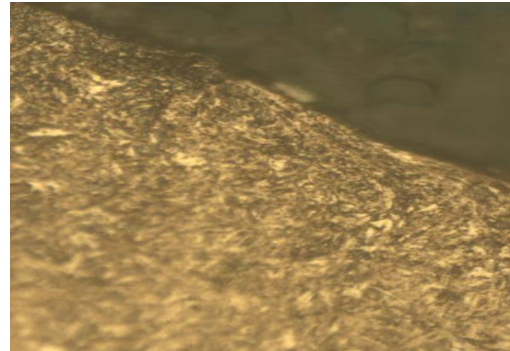


Рисунок 11 – Дефекты в продольном сечении образца при увеличении в 500 раз



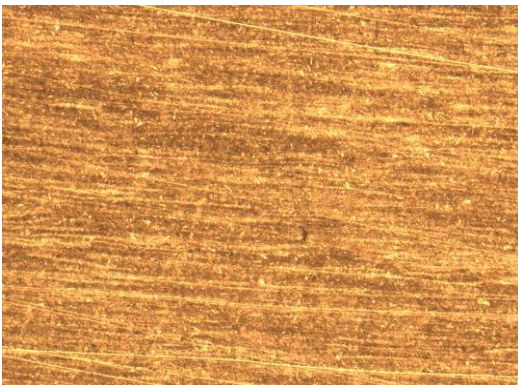
а)



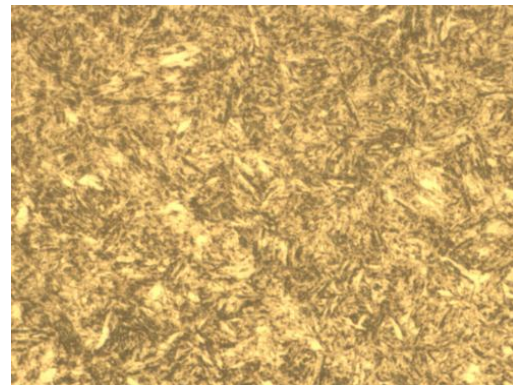
б)

Рисунок 12 – Микроструктура поверхности образца:

а) – продольное сечение при увеличении в 200 раз; б) – поперечное сечение при увеличении в 1000 раз



а)



б)

Рисунок 13 – Микроструктура сердцевины образца:

а) – продольное сечение при увеличении в 200 раз; б) – поперечное сечение при увеличении в 1000 раз

Из уравнений (1), (2) определена свободная рабочая высота пружины H_0 при нагрузке контактного заневоливания Q без учёта влияния дробемётной обработки и с учётом.

По формуле инженера Сажина (8) определены силы F_2 рабочей нагрузки, возникающие в пружинах при рабочих деформациях

$$H_0 - H_i = \frac{64 \cdot F_i \cdot R^3 \cdot i_{\text{раб}}}{G \times d^4 \cdot \cos^3 \alpha}, \quad (8)$$

где R – радиус пружины, мм; $i_{\text{раб}}$ – рабочее число витков; G – модуль упругости второго рода, МПа; d – диаметр поперечного сечения витка (проволоки) пружины, мм; α – угол наклона витков пружины, в градусах.

Разница между теоретическими, не учитывающими влияние дробемётной обработки ($F_2 = 285,4$ Н) и экспериментальными ($F_2 = 271,9$ Н) исследованиями составляет 4,73 %. Разница между теоретическими, учитывающими влияние дробемётной обработки ($F_2 = 275,4$ Н) и экспериментальными ($F_2 = 271,9$ Н) исследованиями не превышает 1,3 %.

В четвертой главе представлены результаты проектирования, изготовления и испытаний на релаксационную стойкость и на стойкость к циклическим нагрузкам пружин клапана двигателя автомобиля ВАЗ уменьшенного сечения проволоки.

Спроектированы пружины уменьшенного сечения проволоки под действующие тарелки и опорные шайбы ДВС автомобиля ВАЗ по новому способу (патент РФ № 2464119) с использованием нового устройства (патенты РФ № 2457917, 2481914), разработана технология их изготовления, определена требуемая нагрузка контактного заневоливания.

По разработанной технологии с использованием предлагаемого устройства изготовлены партии серийных (2101-1007021, $d = 2,7$ мм) и экспериментальных (Э2101-1007021-12, $d = 2,6$ мм) пружин. Силовые параметры изготовленных пружин представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Силовые параметры серийных 2101-1007021 (2,7 мм) и экспериментальных пружин (2,6 мм) Э2101-1007021-12

№ п/п	Серийные пружины		Экспериментальные пружины	
	F_1 , Н	F_2 , Н	F_1 , Н	F_2 , Н
	136,2+13,7/-6,8 (129,4...149,9)	275,4±13,7 (261,7...289,1)	151,6±7 (144,6...158,6)	287,8±13,7 (274,1...301,5)
<i>min</i>	130,5	263,5	144,8	274,1
<i>max</i>	141,7	278,2	156,0	293,0
\bar{X}	136,7	271,0	148,8	282,8
R	11,2	14,7	11,2	19,9

После изготовления экспериментальные и серийные пружины для испытания на стойкость циклическим нагрузкам были установлены на стенд резонансного типа DV8-S2 ф. «Gejrg Reicherter» (рисунок 10). Результаты сравнительных испытаний серийных и экспериментальных пружин на стойкость к циклическим нагрузкам, представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты испытаний серийных пружин 2101-1007021 (2,7 мм) и экспериментальных пружин (2,6 мм) Э2101-1007021-12 на стойкость к циклическим нагрузкам

№ п/п	До испытаний		После испытаний		ΔF_1 , %	ΔF_2 , %
	F_1 , Н	F_2 , Н	F_1 , Н	F_2 , Н		
Серийные пружины 2101-1007021 после 6 млн. циклов						
По ТТ чертежа	151,6±7 (144,6...158,6)	287,8±13,7 (274,1...301,5)	-	-	-	-
<i>min</i>	130,5	263,5	130,4	262,3	0	0
<i>max</i>	141,7	278,2	141,1	275,6	0,99	1,18
\bar{X}	136,7	271,0	136,3	269,0	0,27	0,68
R	11,2	14,7	5,9	13,3	0,99	1,18
Экспериментальные пружины Э2101-1007021-12 после 10 млн. циклов						
<i>min</i>	144,8	273,1	144,1	272,9	0	0
<i>max</i>	156,0	293,0	154,5	290,5	1,03	1,08
\bar{X}	148,8	282,8	148,2	273,4	0,31	0,38
R	11,2	19,9	10,4	17,6	1,03	1,08

Все пружины выдержали испытания без поломок. Величина F_2 после испытаний находится в пределах допуска.

Результаты испытаний на релаксационную стойкость «КРИП» представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты испытаний пружин на релаксационную стойкость «КРИП»

	$\Delta F_2, \%$			
	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>X</i>	<i>R</i>
Серийные пружины 2101-1007021	1,43	2,13	1,59	0,70
Экспериментальные пружины Э2101-1007021-12	0,70	2,12	1,46	1,42

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований решена научная задача, имеющая значение для развития теории изготовления и упрочнения пружин массового производства, – повышение качества цилиндрических пружин сжатия путём совершенствования технологии их изготовления с использованием упрочняющих операций обработки металлов давлением: дробемётной обработки и контактного заневоливания в условиях комплексного локального нагружения. В ходе диссертационного исследования получены следующие основные результаты и выводы:

1. Разработан новый способ изготовления высоконагруженных винтовых цилиндрических пружин сжатия (патент Российской Федерации № 2464119) с применением упрочняющих операций: дробемётной обработки и контактного заневоливания, – повышающий эксплуатационные свойства пружин (циклическую долговечность, релаксационную стойкость, точность силовых характеристик).

2. Разработана математическая модель определения зависимости свободной высоты рабочей части, диаметра упругого ядра и площади упругого ядра от нагрузки контактного заневоливания в условиях комплексного локального нагружения предварительно прошедшей дробемётную обработку пружины с учётом увеличения предела текучести материала в упрочнённой зоне. Предложена методика определения зависимости высоты рабочей части пластически упрочнённой пружины от площади упругого ядра сечения её витка, позволяющая теоретически определить осадку пружины при дробемётной обработке. Экспериментально установлено, что разработанная математическая модель повышает точность определения параметров пружин сжатия при изготовлении на 3,43 %.

3. Разработана новая технология изготовления высоконагруженных внутренних клапанных пружин сжатия двигателей автомобилей ВАЗ с использованием разработанных устройства для упрочнения пружин и способа изготовления пружин (патенты Российской Федерации № 2457917, 2481914, 2464119). Экспериментально установлено, что применение разработанной технологии позволяет изготавливать пружины с повышенной до 40 % циклической долговечностью и увеличенной на 14,3 % стабилизацией силовых параметров, обеспечивая при этом требуемую релаксационную стойкость.

4. На основе новой технологии разработан ресурсосберегающий технологический процесс изготовления высоконагруженных внутренних клапанных пружин сжатия уменьшенного сечения проволоки двигателей автомобилей ВАЗ. Экспериментально установлено, что применение разработанного технологического процесса позволит изготавливать пружины меньшей до 24 % массы и повышенной до 40 % циклической долговечности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Землянушнов Н. А., Дорохов Д. О., Радченко С. Ю., Землянушнова Н. Ю. Совершенствование устройства для упрочнения винтовых цилиндрических пружин методом

комплексного локального нагружения // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2023. – № 3(359). – С. 33-43.

2. Землянушнов Н. А., Дорохов Д. О., Радченко С. Ю., Землянушнова Н. Ю. Градиентное управляемое упрочнение пружин сжатия // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2023. – № 2(358). – С. 20-26.

3. Землянушнов Н. А., Землянушнова Н. Ю., Дорохов Д. О. Теоретическое исследование влияния дробемётной обработки на изменение геометрических параметров пружин при контактном заневоливании // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2022. – № 6(356). – С. 38-47.

4. Землянушнова Н. Ю., Порохня А. А., Землянушнов Н. А., Фадеев В. В. Новый способ изготовления пружин клапанов двигателей автомобилей // *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России.* – 2017. – № 1(133). – С. 12-16.

5. Землянушнова Н. Ю., Порохня А. А., Землянушнов Н. А., Фадеев В. В. Изготовление и испытание пружин клапанов ДВС из проволоки уменьшенного сечения // *Вестник машиностроения.* – 2017. – № 8. – С. 58-62.

6. Землянушнова Н. Ю., Порохня А. А., Землянушнов Н. А. Исследование напряженно-деформированного состояния пружины клапана автомобильного двигателя при пластическом упрочнении // *Вестник машиностроения.* – 2016. – № 4. – С. 48-52.

7. Землянушнова Н. Ю., Порохня А. А., Землянушнов Н. А. Повышение ресурса высоконагруженных пружин сжатия для высокоскоростных транспортных средств // *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России.* – 2015. – № 2(126). – С. 36-39.

8. Тебенко Ю. М., Землянушнова Н. Ю., Землянушнов Н. А. Новые технологии и устройства для пластического упрочнения пружин // *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России.* – 2014. – № 2(122). – С. 18-21.

- патенты Российской Федерации:

9. Патент № 2481914 С1 Российская Федерация, МПК В21F 35/00, В26F 1/06. Устройство для контактного заневоливания пружин : № 2012107298/02 : заявл. 28.02.2012 : опубл. 20.05.2013 / Тебенко Ю. М., Землянушнова Н. Ю., Землянушнов Н. А.

10. Патент № 2464119 С1 Российская Федерация, МПК В21F 35/00, С21D 9/02. Способ изготовления высоконагруженных пружин сжатия : № 2011118220/02 : заявл. 05.05.2011 : опубл. 20.10.2012 / Землянушнов Н. А., Тебенко Ю. М., Землянушнова Н. Ю.

11. Патент № 2457917 С1 Российская Федерация, МПК В21F 35/00, F16F 1/06. Устройство для контактного заневоливания пружин : № 2011105212/02 : заявл. 11.02.2011 : опубл. 10.08.2012 / Тебенко Ю. М., Землянушнова Н. Ю., Землянушнов Н. А.

- публикации, индексируемые в Scopus и/или Web of Science:

12. Zemlyanushnov N. A., Zemlyanushnova N. Y., Dorohov D. O. To the theoretical study of stress-strain state of motor vehicles suspension springs during shot peening // *E3S Web of Conferences.* – 2023. – Vol. 402. – Article number 04004.

13. Zemlyanushnov N. A., Zemlyanushnova N. Y. Improvement of method and mechanism for conical and paraboloid springs hardening // *Materials Science Forum.* – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P. 227-232.

14. Zemlyanushnov N. A., Zemlyanushnova N. Y. To the definition of stress-strain state of springs during recovering when hardened // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2020. – Vol. 971. – Article number 022025.

15. Zemlyanushnov N. A., Zemlyanushnova N. Y. Improvement of the method of repairing springs from hardened wire // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2019. – Vol. 560. – Article number 012161.

16. Zemlyanushnova N. Y., Zemlyanushnov N. A. Modernization of device for compression springs hardening // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* – 2018. – Vol. 194. – Article number 042028.

17. Zemlyanushnov N. A., Zemlyanushnova N. Y. Theoretical background of method of springs recovering // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 194. – Article number 042027.

18. Zemlyanushnova N. Y., Zemlyanushnov N. A. Increasing the resource of high load compression springs // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87. – Article number 082056.

19. Zemlyanushnova N. Y., Porokhin A. A., Zemlyanushnov N. A. Stress–strain state of the valve spring in an auto engine during plastic hardening // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36. – No 7. – P. 535-540.

- монография:

20. Землянушнов Н. А., Землянушнова Н. Ю., Порохня А. А. Повышение ресурса высоконагруженных пружин сжатия. – Ставрополь : Северо-Кавказский федеральный университет, 2019. – 169 с.

- в других изданиях:

21. Землянушнов Н. А., Землянушнова Н. Ю. Теоретическое определение влияния дробемётной обработки на рабочую высоту пружин при контактном заневоливании // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2023. – № 37. – С. 25-30.

22. Землянушнов Н. А., Землянушнова Н. Ю. Исследование геометрических параметров пружин подвески при упрочнении дробемётной обработкой // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2022. – № 35. – С. 75-80.

23. Землянушнов Н. А., Землянушнова Н. Ю., Тебенко Ю. М. Совершенствование способа и устройства для упрочнения пружин конической формы или формы параболоида вращения // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2021. – Т. 17. – № 8(200). – С. 360-367.

24. Землянушнов Н. А., Землянушнова Н. Ю. Методы исследования совершенствования технологии изготовления пружин (на примере клапанных пружин ДВС) // Актуальные проблемы инженерных наук : материалы VIII (65-й) ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета. – Ставрополь : Изд. дом «Тэсэра», 2021. – С. 39-45.

25. Землянушнов Н. А., Землянушнова Н. Ю. Теоретическое исследование влияния дробемётной обработки на осадку пружин подвески автотранспортных средств при восстановлении // Мир транспорта и технологических машин. – 2019. – № 3(66). – С. 26-33.

26. Землянушнов Н. А. К определению осадки пружины при дробемётной обработке // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: Перспектива – 2019, Том 2. – Нальчик : Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 2019. – С. 178-182.

27. Землянушнова Н. Ю., Землянушнов Н. А. Обоснование новой технологии изготовления пружин // Фундаментальные основы физики, химии и динамики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий : сборник трудов научного симпозиума технологов-машиностроителей. – Дивноморское : Донской государственный технический университет, 2019. – С. 42-48.

28. Землянушнов Н. А., Землянушнова Н. Ю. Определение теоретической зависимости силовых характеристик пружин сжатия от нагрузки их упрочнения при восстановлении // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2018. – № 1. – С. 54-59.

29. Землянушнов Н. А., Землянушнова Н. Ю. К теоретическому обоснованию восстановления автомобильных пружин из упрочненной проволоки // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2018. – № 5. – С. 68-79.

30. Землянушнов Н. А. К анализу отказов агрегатов и систем автотранспортных средств, вызванных релаксацией автомобильных пружин // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2018. – № 10. – С. 81-86.

31. Землянушнов Н. А., Землянушнова Н. Ю., Порохня А. А. К повышению качества пружин клапанов двигателей автомобилей // Прогрессивные технологии в транспортных

системах : сборник статей XIII Международной научно-практической конференции. – Оренбург : Оренбургский государственный университет, 2017. – С. 120-123.

32. Землянушнов Н. А., Порохня А. А., Землянушнова Н. Ю. Проектирование компактных высокоскоростных пружин сжатия // Актуальные проблемы строительства, транспорта, машиностроения и техносферной безопасности : материалы IV ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета. – Ставрополь : Изд. дом «Тэсэра», 2016. – С. 293-298.

33. Землянушнов Н. А. Анализ известных устройств для контактного заневоливания пружин // Молодежь и XXI век – 2015 : материалы V Международной молодежной научной конференции. Том 3. – Курск : Университетская книга, 2015. – С. 99-102.