

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева»

На правах рукописи



Землянушнов Никита Андреевич

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ПАРАМЕТРОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРУЖИН СЖАТИЯ
УПРОЧНЕНИЕМ ПРИ КОНТАКТНОМ ЗАНЕВОЛИВАНИИ

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Дорохов Даниил Олегович

Орёл — 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Проблема релаксации пружин сжатия.....	11
1.2 Технологические операции пластического упрочнения пружин.....	14
1.3 Направления повышения качества пружин.....	17
1.4 Контактное заневоливание пружин в условиях комплексного локального нагружения	24
1.5 Устройства для контактного заневоливания пружин.....	33
1.6 Математическая модель контактного заневоливания пружин.....	45
1.6.1 Определение границы, отделяющей упругую зону от пластической в поперечном сечении рабочего витка.....	46
1.6.2 Напряженное состояние рабочих витков при контактном заневоливании.....	50
1.6.3 Определение осадки пружины при контактном заневоливании.....	54
Выводы по разделу.....	57
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРУЖИНЫ ПРИ УПРОЧНЕНИИ	58
2.1 Совершенствование технологического процесса изготовления винтовых цилиндрических пружин.....	58
2.2 Выбор пружинной проволоки и её механические характеристики.....	62
2.3 Определение параметров пружины при пластическом упрочнении.....	64
2.4 Исследование влияния дробемётной обработки на параметры пружин при изготовлении.....	69
Выводы по разделу.....	80
3. РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРУЖИН.....	81

3.1 Проектирование устройства для упрочнения пружин.....	81
3.2 Изготовление и испытание экспериментального образца устройства для упрочнения пружин.....	87
3.3 Разработка технологии изготовления внутренней пружины клапана 2101-1007021.....	90
3.4 Экспериментальная оценка эффективности разработанной технологии.....	94
3.5 Сравнение теоретических и экспериментальных исследований.....	101
Выводы по разделу.....	102
4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРУЖИН УМЕНЬШЕННОГО СЕЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ С ПОВЫШЕННЫМ РЕСУРСОМ	103
4.1 Актуальность изготовления клапанных пружин уменьшенного сечения проволоки.....	103
4.2 Проектирование пружин клапана двигателя автомобиля ВАЗ уменьшенного сечения проволоки.....	104
4.3 Определение технологических параметров экспериментальных пружин при пластическом упрочнении.....	111
4.4 Разработка технологии изготовления пружины уменьшенного сечения проволоки.....	119
4.5 Экспериментальное обоснование разработанной технологии.....	121
4.6 Оценка эффективности применения разработанной технологии.....	123
Выводы по разделу.....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	128
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	130
Приложение А.....	145
Приложение Б.....	146
Приложение В.....	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. 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 пружины характеризуется комплексным нагружением под действием двух силовых факторов в сечении витка — крутящим моментом и контактной нагрузкой между витками. Упрочнение при контактном заневоливании отличается от пластической холодной осадки, термоосадки и обычного заневоливания тем, что реализуется возможность управлять формированием локальной пластической зоны 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 теоретическое обоснование совместного применения дробемётной обработки и контактного заневоливания в условиях комплексного локального нагружения при изготовлении пружин.

Таким образом, исследования, направленные на совершенствование технологии изготовления винтовых цилиндрических пружин сжатия с применением дробемётной обработки и контактного заневоливания в условиях комплексного локального нагружения, позволяющей повысить ресурс пружин, являются актуальными.

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», ОАО «НПП „Пружинный Центр”», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ», ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова» и др. Но на сегодняшний день недостаточно рассмотрено влияние совместного применения дробемётной обработки и контактного заневоливания в условиях комплексного локального нагружения на параметры пружин при изготовлении.

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.

Цель работы — повышение стабильности эксплуатационных параметров (релаксационной стойкости, циклической долговечности, точности силовых характеристик) винтовых цилиндрических пружин сжатия упрочнением

контактным заневоливанием после дробемётной обработки.

Задачи работы:

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:

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 работы.

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, 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 результатов. 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 работы. 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.

Автор выражает благодарность сотрудникам АО «Белебеевский завод «Автономаль» Галиахметову Тимуру Шамилевичу и Фадееву Виктору Владимировичу за научную помощь и внимание к работе.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Проблема релаксации пружин сжатия

Надежность большинства изделий определяется качеством пружин, входящих в их конструкцию [1...3]. Пружины выполняют важные функции в роли аккумуляторов энергии и амортизаторов; регуляторов и включателей силовых приводов и приводов управления; упругих подвесок и тормозных устройств [1, 4...10]. В процессе работы пружины подвергаются большим циклическим (в том числе контактными) и статическим нагрузкам, нагреву и другим неблагоприятным факторам. В пружинах возникают значительные остаточные деформации, скрытые дефекты металла, чрезмерные осадки, поломки [11]. Со временем [1, 3, 11, 12] в процессе работы они теряют первоначально заданную жесткость, и их рабочая нагрузка F_2 снижается (то же самое происходит после форсированных испытаний пружин на стойкость к циклическим нагрузкам). Потеря нагрузки может превысить допустимые значения, тем самым вызвав отказ агрегата или системы машины.

В автомобилестроении [11] техническое состояние агрегатов узлов и механизмов во многом определяется ресурсом пружин. Например [11], недопустимая потеря нагрузки клапанных пружин газораспределительного механизма (ГРМ) приводит к снижению качества газообмена двигателя, вследствие чего снижаются его эксплуатационные свойства. Потеря упругости пружины бензонасоса прерывает подачу топлива в топливной системе. Снижение рабочей нагрузки пружин форсунок дизельных двигателей нарушает давление и момент впрыска [13]. Потеря рабочей нагрузки пружины регулятора опережения зажигания приводит к неправильной его работе или к отказу системы зажигания. Причинами неполного включения сцепления могут являться потеря нагрузки пружины муфты выключения, нажимных периферийных пружин нажимного диска либо полная их поломка. Самопроизвольное выключение передач

вызывается потерей упругости пружин фиксаторов коробки перемены передач (КПП), а также поломкой пружины синхронизатора [14]. Потеря нагрузки пружины перепускного клапана вызывает неудовлетворительную работу амортизатора. В автомобилях, оборудованных системой гидроусилителя, уменьшение упругости или поломка пружины предохранительного клапана служит причиной снижения давления в системе. Поломка или снижение нагрузки ограничительной пружины тормозной системы вызывает неполное растормаживание колес и перегрев тормозных дисков [11].

Релаксации подвержены пружины подвески автомобилей, предотвращающие разрушение автомобильных конструкций, так как воспринимают большую часть вибраций от дорожных покрытий, что способствует усталостному разрушению пружин [10, 15...17].

Недостаточным качеством обладают вагонные пружины, обеспечивающие плавность хода и безопасность движения поездов, снижая динамическое воздействие путей на вагон [18...20]. Ежегодная потребность замены вышедших из строя пружин на ОАО «РЖД» может достигать до 1 млн штук [20].

Яркими представителями высоконагруженных и компактных пружин являются пружины клапана (рисунок 1.1) двигателя внутреннего сгорания (ДВС) легкового автомобиля ВАЗ [1, 2, 8, 9, 21...35]. Эти пружины спроектированы на пределе технологических возможностей для экономии монтажного пространства, габаритов и веса двигателя. К пружинам клапана предъявляются высокие требования: кроме соответствия геометрическим и силовым параметрам пружины, согласно ТУ FIAT — ВАЗ, должны выдержать испытания на релаксационную стойкость «КРИП» и испытания на стойкость циклическим нагрузкам (6×10^6 циклов на сжатие от H_0 (свободная высота пружины) до H_2 с частотой не менее 25 с^{-1} , т. е. форсированные испытания). При испытаниях на «КРИП» пружины сжимают в приспособлении до рабочей нагрузки и выдерживают при повышенной температуре определенное время. После разгрузки у пружин измеряют потерю нагрузки F_2 в процентах. Например, для

пружины 2112-1007020 потеря нагрузки F_2 при испытаниях на «КРИП» должна быть не более 7,5 %.

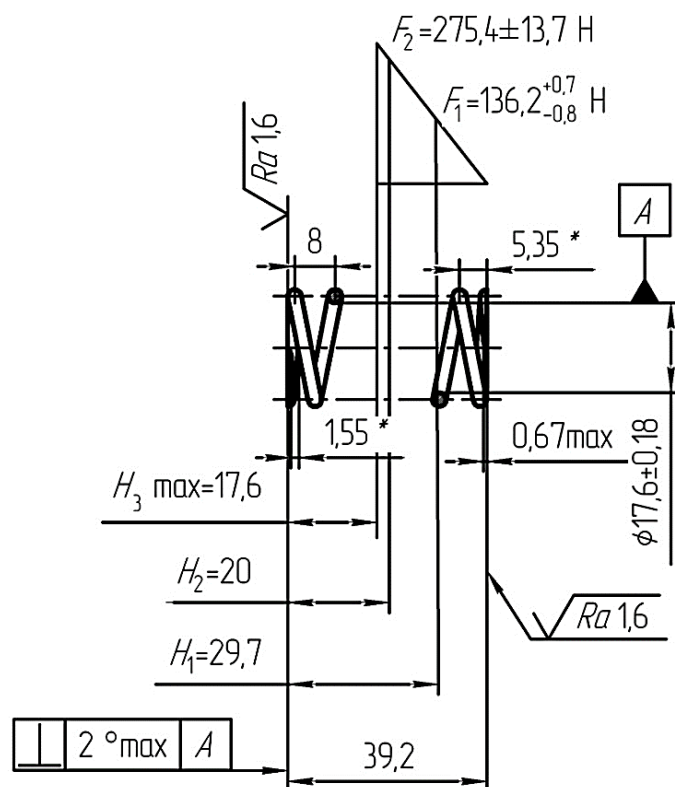


Рисунок 1.1 — Пружина клапана внутренняя 2101-1007021:

F_1 и F_2 — нагрузка соответственно предварительного поджатия и рабочая, Н;
 H_1 , H_2 , H_3 — высота пружины соответственно при предварительном поджатии,
 при рабочей нагрузке и при сжатии до соприкосновения витков, мм; свободная
 высота пружины (39,2 мм) — размер для справок.

Пружины клапанов ДВС [36] работают в условиях высоких температур при больших скоростях нагружения с соударением витков. Потеря упругости клапанных пружин приводит к нарушениям следующих основных требований в работе ГРМ [36]:

- 1) в период закрытия клапана должен быть обеспечен плотный контакт сопряжения клапан – седло;
- 2) не допускается разрыв сопряжения клапан – толкатель;
- 3) не допускается разрыв сопряжения кулачок – толкатель;
- 4) не допускаются вибрации пружин.

В результате размыкания клапанного механизма [36...38] (разрыва сопряжений: кулачок – толкатель, клапан – толкатель, клапан – седло) происходит соударение деталей ГРМ, в цилиндр частично попадают отработанные газы, ухудшающие процесс наполнения цилиндра свежим зарядом рабочей смеси, повышается уровень шума и ускоряется износ соударяющихся поверхностей. Нарушение указанных требований влечет за собой изменение фаз газораспределения, повышение расхода топлива и ухудшение мощностных характеристик ДВС [39].

Проектировщики винтовых цилиндрических пружин сжатия стремятся обеспечить им неограниченную выносливость и меньшие габариты, экономящие монтажное пространство в автомобильной, тракторной промышленности, в станкостроении, горной технике и других отраслях промышленности [28].

1.2 Технологические операции пластического упрочнения пружин

Процесс изготовления пружин состоит из множества технологических операций [2, 23]. По технологическому назначению их можно классифицировать на контрольные, формообразующие, упрочняющие и испытательные.

К контрольным операциям относятся: приемочный контроль проволоки (диаметра, предела текучести и др.), проверка наличия поверхностных дефектов, люминесцентный контроль, контроль нагрузки.

Навивка является формообразующей операцией [2, 4, 40...45].

Для обеспечения высоких функциональных и эксплуатационных свойств пружин при их изготовлении применяют упрочняющие операции [32, 46], которые позволяют путем пластического деформирования повысить рабочую нагрузку и надёжность пружин [2, 4, 47].

Испытания на КРИП и на выносливость к циклически нагрузкам относятся к контрольным операциям [2, 23].

Одним из направлений, позволяющих повысить циклическую долговечность, релаксационную стойкость и точность силовых характеристик

пружин, является совершенствование технологии их упрочнения в процессе производства [9, 32].

Известны следующие способы упрочнения пружин [1, 23, 32]: заневоливание, холодная пластическая осадка, термоосадка, термозаневоливание, дробемётный (дробеструйный) наклёп, гидрообразивная или пескоструйная обработка, волочение проволоки, контактное заневоливание и др.

Заневоливание [23, 32] — это технологический процесс, заключающийся в сжатии пружины до соприкосновения витков и выдержке в таком состоянии 24...48 часов. Пружина после разгрузки несколько уменьшается по высоте и при дальнейшей эксплуатации практически не меняет своих упругих характеристик.

Эффект, аналогичный упрочнению заневоливанием, можно получить многократным ударным нагружением пружины со сжатием, близким к соприкосновению витков [48]. Динамическая прочность и стабильность размеров пружины при этом не ниже, чем у пружин, подвергнутых заневоливанию, а продолжительность операции 1...3 мин.

Холодная пластическая осадка [23, 32] выполняется для пружин, навитых с шагом, превышающим шаг готовой пружины. Как правило, осадка производится до соприкосновения витков. Осадка производится без значительной выдержки по времени и позволяет повысить нагрузку на пружины при эксплуатации.

Термоосадка [23, 32] — это одна из упрочняющих операций, аналогичная холодной осадке. Пружина перед осадкой нагревается до температуры 300...400 °С. У пружин, подвергнутых термоосадке, повышаются выносливость и стабильность упругих свойств при работе в условиях повышенных температур. Термоосадке, например, подвергаются пружины клапана ДВС [2, 32].

Эффективной операцией упрочнения пружин является дробемётная обработка — одна из операций технологического процесса, повышающая динамическую прочность пружин [2, 9, 32, 49...51]. Производится на механических дробемётных установках стальной или чугунной дробью. Дробемётная обработка является более экономичной (по сравнению с гидро- и пневмообработкой), т. к. создает более широкий и однородный по плотности поток дроби. В результате

дробемётной обработки на поверхности витков создаются двухсторонние остаточные напряжения сжатия, препятствующие раскрытию усталостных трещин и повышающие предел выносливости на 40...80 % [32, 48]. Исследования, выполненные в работах [42, 48, 50] показывают, что дробемётная обработка значительно повышает усталостную прочность пружин, но несколько снижает стойкость к релаксации нагрузки [32]. Релаксация нагрузки пружин (КРИП) зависит от глубины наклепа [2, 32]. После проведения дробемётной обработки пружины не следует подвергать нагреву до высоких температур, т. к. происходит релаксация остаточных напряжений, что ведет к разупрочнению пружины и снижению её долговечности [32, 42].

Гидроабразивная обработка [32] осуществляется воздействием на поверхность пружин струёй жидкости, подающейся под давлением и содержащей абразивные зёрна. В результате повышается чистота поверхности, получается равномерный наклёп на значительно меньшую глубину, чем при дробемётной обработке, и создаются сжимающие остаточные напряжения в тонком поверхностном слое. При этом повышаются усталостная прочность и коррозионная стойкость пружин, особенно если они имели необработанную черновую поверхность.

Пескоструйная обработка [23, 32] в струе сжатого воздуха аналогична гидроабразивной, но менее эффективна и создаёт проблемы пылеулавливания, если песок подаётся струей воздуха, а не струёй жидкости.

Контактное заневоливание впервые было запатентовано В. Н. Шалиным и А. М. Епифановым [9, 52, 53]. С целью сокращения времени выдержки пружин под нагрузкой в сжатом состоянии пружины дополнительно нагружают силой, вызывающей сжатие соприкасаемых витков до появления требуемой остаточной деформации.

При сжатии пружины до соприкосновения витков (приложение нагрузки F_3) напряжения кручения на наружных волокнах витков достигают предела текучести и за длительное время (выдержка в сжатом состоянии 24...48 часов) частично

релаксируют [1, 6, 47]. После снятия нагрузки возникает относительная остаточная деформация пружины A , %, равна A_1 (рисунок 1.2).

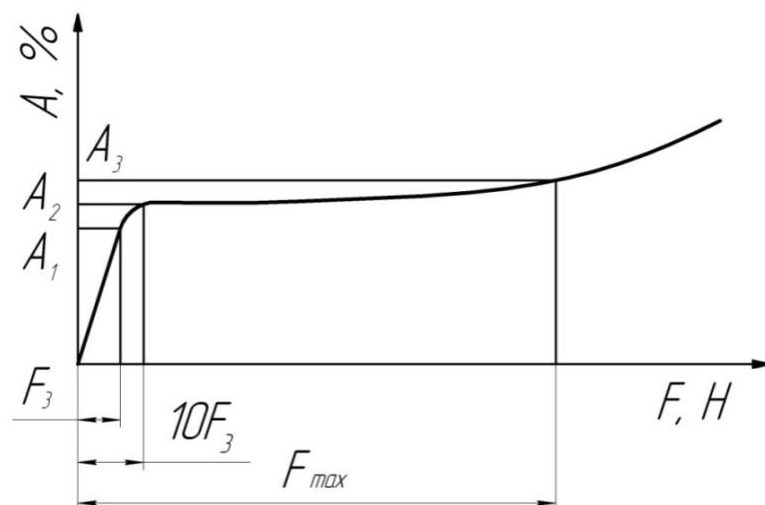


Рисунок 1.2 — График зависимости относительной остаточной деформации пружины от нагрузки контактного заневоливания

При дальнейшем увеличении нагрузки сжатия пружины F интенсивность возрастания величины A уменьшается из-за возникновения контактных напряжений. В местах контакта витков происходит поверхностное пластическое упрочнение. Заневоливание пружины на 24...48 часов (A_1) рекомендуется заменять [1, 47] пластическим упрочнением нагрузкой $10F_3$ (A_2), время выдержки — 1,5...2 секунды. При приложении нагрузки свыше F_{max} (A_3) произойдет разупрочнение пружины.

Известными способами поверхностного упрочнения пружин являются обкатка роликами или шариками, виброупрочнение [54, 55].

1.3 Направления повышения качества пружин

Повышению ресурса пружин посвятили свои труды учёные: Ю. А. Лавриненко, Е. Г. Белков, Ю. П. Анкудимов, А. Д. Ассонов, В. П. Белогур, А. М. Епифанов, В. В. Забильский, С. М. Заседателев, М. М. Исмагилов, Д. А. Кальнер, Б. Н. Крюков, А. П. Морозов, Г. А. Навроцкий, В. П. Остроумов, Л. М. Редькин,

М. Г. Соломатов, М. Н. Степанянц, О. И. Шаврин, В. Н. Шалин, В. В. Фадеев, П. Д. Ясенчук и многие другие.

Работы Г. Н. Фролова [56] посвящены вопросам повышения точности изготовления и стабильности работы винтовых пружин. Рассмотрены режимы предварительной и повторной стабилизации, или заневоливания. Для предупреждения релаксации остаточных напряжений рекомендуется пружины после стабилизации не разгружать, а хранить при минимальной эксплуатационной нагрузке до сборки их с изделием.

Упрочнение заневоливанием и дробемётным наклёпом применяется при изготовлении пружин [57] подвески автомобиля для создания благоприятного распределения остаточных напряжений по сечению витка. Этот способ увеличивает срок службы [58] и повышает прочность пружины, но он применим только для изготовления пружин с большим диаметром сечения витка (для пружин подвески диаметром более 12 мм), так как при этом влияние наклепа на релаксацию нагрузки незначительно. А при изготовлении по этому способу пружин с небольшим диаметром витка, например, клапанных пружин с диаметром 3,6 мм, наклеп в большой степени оказывает влияние на релаксацию нагрузки, и происходит значительное рассеивание длины пружины, то есть ее силовых параметров.

По технологии [59] при изготовлении пружин подвески автомобилей, сначала на токарных линиях с прутков снимают обезуглероженный слой, затем прутки нагревают и навивают спиралью. После термообработки пружины в специальной камере обстреливают потоком мелкой стальной дроби — так очищают от окалины, упрочняют поверхностный слой и повышают усталостную прочность. Следующий этап — холодная осадка: пружины трижды сжимают до соприкосновения витков, после чего длина уменьшается примерно на 18 мм от первоначальной. На готовую пружину наносят защитное покрытие.

Используемая в данной технологии осадка пружин обычно применяется для устранения неравномерности шага витков пружины и некоторой их стабилизации, в том числе для проверки наличия трещин и качества выполнения

предшествующих операций. По величине произошедшего при этом изменения высоты пружин предполагается судить о качестве исполнения технологического процесса. Но из-за недостаточности времени для стабилизации осадки (должно быть 6...48 ч) такой метод не даёт полного представления о качестве пружин подвески автомобиля и не гарантирует стабильности их параметров.

При изготовлении винтовых пружин [60], в частности, подвесок автомобиля, с предварительным напряжением, сочетается традиционное натяжение, которому подвергают изготавливаемую пружину, с вращением при помощи значительного крутящего момента крайнего витка в направлении навивки. Недостатки описанного способа заключаются в возможности применения только для пружин из патентованной проволоки и в невозможности применения для массового производства из-за наличия сложных дополнительных операций для образования специального места для защемления конца витка пружины и для удаления этого места.

В способе изготовления пружин подвесок автомобилей [61], включающем горячую навивку, закаливание, отпуск, дробеструйную обработку и осадку, высокие прочностные и упругие свойства пружин достигаются тем, что в качестве материала для пружин используется сплав специального химического состава на основе железа. Сплав содержит: 0,51...0,91 % углерода; 0,75...1,00 % марганца; 0,70...1,10 % кремния; 0,25...0,40 % хрома. Максимальное содержание вредных примесей в сплаве — не более 0,0354 % фосфора и 0,040 % серы. В качестве технологических испытаний пружин применяется отбивка пружин на копрах и стендах и заневоливание на относительно длинный период — 5 недель. Недостатком способа является длительный производственный цикл.

Способ [62], повышающий и долговечность, и релаксационную стойкость пружин, изготовленных из стали, содержащей: 0,35...0,50 % углерода, 0,3...1,5 % марганца, 2...3 % кремния, 0,1...2,0 % хрома, основан на горячей дробемётной обработке при температуре 150...300 °С с использованием специальной дроби и специального оборудования и позволяет получить высокопрочные пружины с максимальными расчётными напряжениями кручения для стали данного

химического состава (1080...1325 МПа). В результате термообработки пружины получают повышенное сопротивление ползучести без понижения вязкости. Однако этот способ также имеет существенный недостаток, заключающийся в повышенной трудоемкости и энергоемкости [63].

В способе изготовления пружин, заключающемся в навивке проволоки из специальных сталей с содержанием углерода 0,55...0,70 % с получением шага навивки, превышающего шаг готовой пружины, последующим закаливанием и отпуском с осадкой, деформирование пружин осуществляют в закалённом состоянии [64]. В результате может происходить их поломка вследствие низкой пластичности стали после закалки. Кроме того, способ не обеспечивает необходимых упругих свойств пружины [64].

Для устранения указанных недостатков рекомендован способ изготовления пружин [64], состоящий в навивке проволоки с шагом, превышающим шаг готовой пружины, её закаливании, осадке с остаточной пластической деформацией. Причём с целью улучшения упругих свойств пружин и возможности использования проволоки из стали с содержанием углерода 0,35...0,55 %, проволоку закаливают до получения мартенситной структуры, затем осуществляют низкий отпуск, а осадку ведут в холодном состоянии, после чего производят старение при температуре 100...400 °С.

Описываемый способ [64] использует свойство деформационного старения мартенсита, характерное для низкоуглеродистых сталей с содержанием углерода 0,35...0,55 %, и позволяет значительно повысить упругие показатели изготовленной пружины. Режим термообработки, исключаящий переостаривание, навивка с расчетным шагом, превышающим шаг готовой пружины, и остаточная пластическая деформация при осадке обеспечивают улучшение упругих свойств пружины. Недостаток способа заключается в снижении пластичности стали в результате деформационного старения мартенсита.

В способе отпуска пружин [65] из среднеуглеродистых сталей, включающем нагрев до 300...400 °С с одновременным приложением нагрузки до

напряжения ниже предела упругости, с целью повышения стабильности геометрических и силовых параметров пружин в процессе их хранения и эксплуатации, нагрев проводят со скоростью 20...30 °С/мин, с одновременным возрастанием нагрузки на 0,05...0,2 кг/мм²/град., в процессе выдержки нагрузку снимают со скоростью 3...10 кг/мм²/мин и затем проводят выдержку после снятия нагрузки в течение 1...3 мин.

Использование предлагаемого способа отпуска пружин из среднеуглеродистых сталей под нагрузкой, по сравнению с известными способами, обеспечивает 4...8-кратное уменьшение изменения геометрических параметров (по удлинению) после выдержки в условиях нормальных и повышенных температур. Кроме того, осадка пружин в процессе выдержки в сжатом состоянии уменьшается в 2...3 раза. Недостатком является сложность режимов технологического процесса.

П. Д. Ясенчук и соавторы для производства высокопрочных пружин предложили способ [66], включающий нагрев заготовки до температуры аустенизации, растяжение, обкатку, спиральную навивку её на оправку и закаливание. Способ отличается тем, что с целью повышения прочности пружин после растяжения заготовку подвергают скручиванию и дополнительному растяжению, а обкатку производят перед спиральной навивкой. Недостатком способа является сложность изготовления пружины, невозможность применения в массовом производстве, а проведение термообработки после упрочнения снижает полезные остаточные напряжения.

Перспективным направлением повышения качества пружин является высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) как пружинной проволоки, так и пружин при навивке [9, 67]. Проведение ВТМО создаёт структуру отпущенного мартенсита с высокой дисперсностью и фрагментацией, однородную по сечению проволоки. После ВТМО повышается усталостная прочность и увеличивается сопротивление малым пластическим деформациям в условиях кратковременного и длительного нагружения. ВТМО практически устраняет обратимую отпускную хрупкость. Применение термомеханического

упрочнения обеспечивает гарантированное увеличение долговечности и релаксационной стойкости в 2...3 раза. Разработаны технологические процессы и оборудование для изготовления высококачественных пружин. Применение ВТМО при навивке позволяет снизить трудоёмкость изготовления пружин до 8 раз с обеспечением повышения живучести в 3...4 раза.

Примером упрочнения пружин с применением ВТМО при навивке является технология изготовления крупногабаритных пружин [68] авторов О. И. Шаврина, Л. М. Редькина и соавторов. Прутки перед навивкой обрабатывают поперечно-винтовым протягиванием в направлении деформации витка при сжатии пружины, затем перед навивкой осуществляют скоростной нагрев термомеханически упрочнённого прутка до температуры выше температуры фазовых превращений с последующей навивкой и немедленным закаливанием, а в качестве окончательной термической обработки пружин применяют отпуск.

Г. Н. Гурьяновым и соавторами [69] рассмотрена эффективность операции динамического старения проволоочных пружин из коррозионностойких сплавов и нержавеющей сталей в свободном и напряжённом состояниях. Стабильность пружин после проведения старения в сжатом состоянии выше, чем при старении пружин в свободном состоянии. Это объясняется ускорением протекания процесса дисперсионного твердения и улучшением упругих свойств сплава под воздействием внутренних напряжений. Температура старения пружин из коррозионностойкого сплава 520...620 °С, продолжительность выдержки составляет 1...6 часов в зависимости от степени наклёпа сплава. Для пружин из высоколегированных сталей — соответственно 460 ± 20 °С, выдержка в течение 20...30 минут. Динамическое старение способствует стабилизации геометрических и нагрузочных параметров пружин. Но этого недостаточно для работы пружин в условиях ударных нагрузок.

В работах Ю. А. Лавриненко, Е. Г. Белкова, В. В. Фадеева, Г. А. Навроцкого, М. Г. Соломатова, С. М. Заседателява [4, 8, 32, 33, 40...46, 70...72] освещены вопросы теории и практики технологии изготовления и упрочнения пружин массового производства. В частности, рассмотрены современные

пружинные материалы и их свойства, методы испытания пружинной проволоки и контроля пружин, технология и теория навивки пружин, теория и методы упрочнения заневоливанием, пластическая осадка пружин, дробемётный и дробеструйный наклёп, пескоструйная обработка, применяемые оснастка и оборудование [30, 31]. Усовершенствован процесс безоправочной навивки пружин сжатия [2, 41, 45, 71] с определением оптимального угла шагообразования, повышена точность настройки навивочного автомата, в результате чего практически исчез брак по непараллельности и неперпендикулярности торцов пружины. Разработана математическая модель процесса тройного упрочнения пружин сжатия [2, 25, 27, 28], описывающая влияние горячей осадки, дробемётного наклепа и холодной осадки на напряженно-деформированное состояние (НДС) пружин сжатия.

В работах отечественных учёных [73...76] с целью повышения эксплуатационных характеристик пружин решён комплекс теоретических и технологических задач, вскрыта взаимосвязь структурно-прочностных эффектов технологии изготовления пружин, начиная от первых пределов металлургического производства до эксплуатации детали в машине. При этом пружины рассчитываются по максимальной нагрузке, воспринимаемой пружиной, исходя из установленных опытом допускаемых напряжений, затем применяется дополнительная упрочняющая обработка. Для пружин, работающих с соударением витков, проводится динамический расчёт, а в качестве упрочняющей обработки применяется ударное нагружение пружин на копрах и стендах. После испытания опытных пружин дорабатывается чертёж пружины и разрабатывается технологический процесс.

Отбивка пружин на копрах и стендах не воссоздаёт реальных условий работы пружин в изделии [47, 77, 78] и не приводит к осадкам, равноценным с осадками пружин в изделиях.

В работах [6, 79, 80] дано теоретическое и экспериментальное обоснование НДС пружин при контактном заневоливании, однако не учтено влияние

предшествующей дробемётной обработки на процесс контактного заневоливания. Процесс не рассмотрен в условиях комплексного локального нагружения.

1.4 Контактное заневоливание пружин в условиях комплексного локального нагружения

Оптимальной при упрочнении изделий является свободная от остаточных напряжений структура материала, обеспечивающая градиентное от рабочей поверхности распределение механических свойств, при которой наиболее нагруженные рабочие поверхности имеют максимальную прочность, градиентно убывающую к вязкой сердцевине (рисунок 1.3) [82, 83]. Создание градиентно упрочненных структур возможно при применении тех или иных методов обработки металлов давлением в интервале температур ниже температуры рекристаллизации [84].

При упрочнении пружин следует стремиться к получению структуры, подобной структуре, изображенной на рисунке 1.3, т. е. получить в материале пружин зону с максимальным упрочнением, зону механических свойств с исходной структурой металла и промежуточную зону без резких перепадов механических свойств.

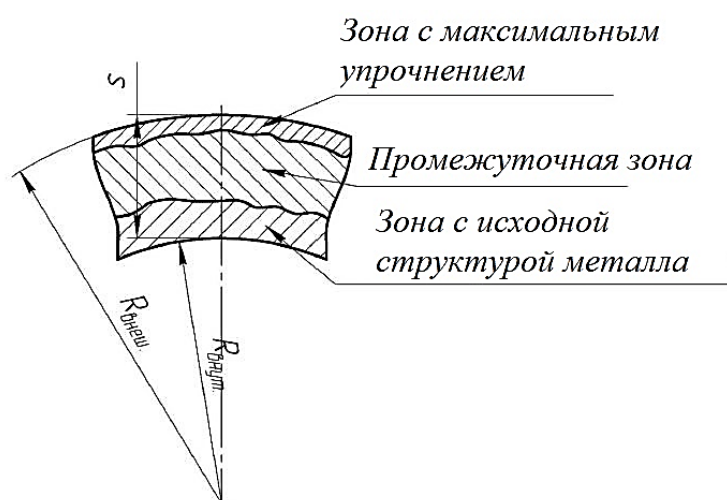


Рисунок 1.3 — Градиентный характер механических свойств по сечению детали [82, 83]

Некоторые упрочняющие операции пружин могут создавать в материале заготовок более одного силового фактора (силы и/или моменты), что позволяет отнести их к деформированию в условиях комплексного локального нагружения очага деформации (КЛН-деформированию) [82...87].

КЛН-деформирование — это совокупность процессов обработки металлов давлением, в которых очаг пластического деформирования намеренно создается приложением двух и более нагрузок, одна из которых воздействует на значительный объем заготовки (глобальное нагружение), а другая носит локальный характер и формирует подвижную зону деформации со сложным напряженным состоянием [82].

Общая схема методов КЛН-деформирования представлена на рисунке 1.4 [81, 82].

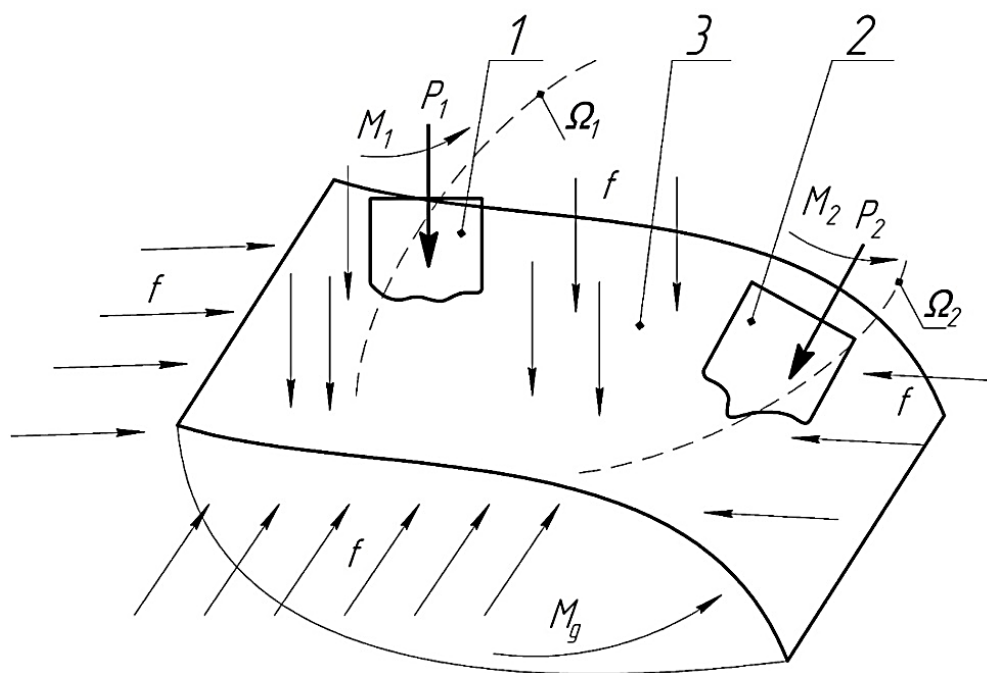


Рисунок 1.4 — Общая схема процессов КЛН-деформирования:

1, 2 — комплекс инструментов локального деформирования; 3 — заготовка;
 P_i, M_i — силы и моменты на инструментах; f — напряжения от сил, создающих глобальное нагружение; M_g — момент, приложенный к заготовке в процессе обработки; Ω_i — траектории движения инструментов [81, 82]

Заготовка глобально нагружена [82] некоторой силой (или системой сил и моментов M_g), отображающихся на рисунке 1.4 в виде результата: некоторого распределения напряжений f . Параллельно заготовка локально деформируется комплексом инструментов 1, 2, ... n , перемещающихся по траекториям Ω_1 , Ω_2 и так далее. Указанные инструменты локализируют очаг деформации, обеспечивая интенсивное пластическое течение малой части объема заготовки. При своем движении инструменты и (или) заготовка обеспечивают перемещение очага деформации. В результате одни и те же части заготовки могут подвергаться как однократному, так и многократному приложению локальных нагрузок, что в итоге обеспечивает эффективность процесса формоизменения и/или упрочнения.

Для упрочнения пружин, работающих в условиях значительных, но малоцикловых контактных нагрузок между витками, а также в условиях высоких скоростей и с соударениями витков, рекомендуется применять контактное заневоливание [47, 78].

Контактное заневоливание — технологическая операция упрочнения пружин и один из методов КЛН-деформирования — пластическая поверхностная обработка, заключающаяся в сжатии пружины до соприкосновения витков с приложением дополнительной осевой нагрузки (время приложения нагрузки 1,5...2 секунды) [1, 6, 47, 81, 88]. В процессе контактного заневоливания происходит комплексное деформирование под действием двух силовых факторов в сечении витка — крутящего момента $M_{кр}$ и контактной нагрузки Q между витками (рисунок 1.5), что создает сложное неоднородное напряженное состояние в материале пружины.

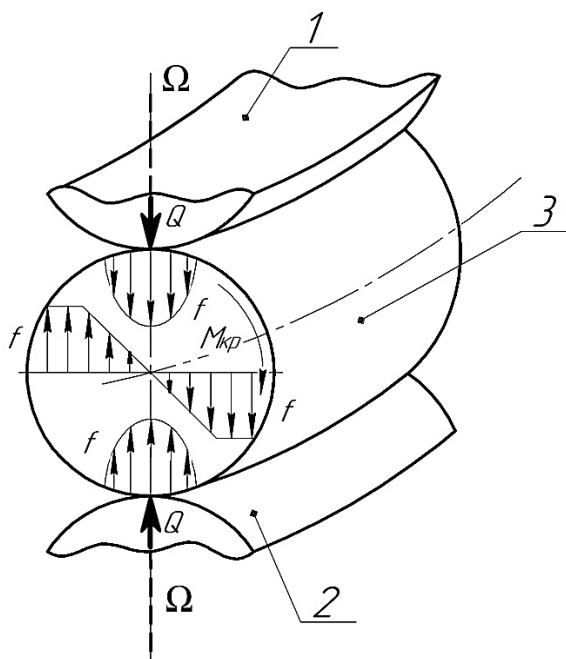


Рисунок 1.5 — Силовые факторы в сечении витка пружины при контактном заневоливании: 1, 2, 3 — деформируемые витки пружины (инструменты локального деформирования — верхний и нижний вкладыши устройства на рисунке 3.1); Q — контактная нагрузка между витками; $M_{кр}$ — момент кручения в витках пружины; f — напряжения от сил, создающих глобальное нагружение; Ω — траектория движения деформируемых витков (прямая) [88]

Такое комплексное деформирование под действием двух силовых факторов в сечении витка — крутящего момента и контактной нагрузки между витками — создает сложное неоднородное напряженное состояние в материале пружины. Процесс сопровождается структурными изменениями в деформированном слое с соответствующими повышениями его твердости и прочности, образованием благоприятных остаточных напряжений сжатия и формированием качественно новой макро- и микрогеометрии поверхности материала пружин [1, 81, 89]. Благодаря этому повышаются эксплуатационные свойства пружин.

На рисунке 1.6 показаны форма и размер упругого ядра сечения витка пружины при контактном заневоливании [1, 6, 81].

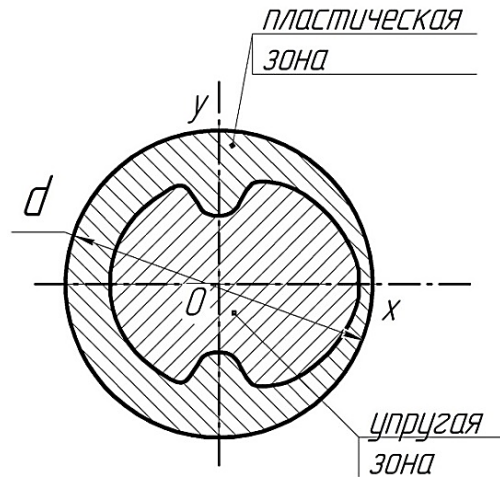


Рисунок 1.6 — Форма и размер упругого ядра сечения витка пружины при контактном заневоливании: d — диаметр поперечного сечения витка (проволоки) пружины [1, 6, 81]

Форма и размер упругого ядра сечения витка пружины $d_{упр}$ при нагрузке контактного заневоливания равной нулю показаны на рисунке 1.7 [1, 6, 81]. Упрочнение происходит по всему объему детали, величина зоны пластического упрочнения зависит от физико-механических свойств материала и геометрических параметров пружины. Величина упругого ядра пружины при упрочнении не должна выходить за пределы рекомендованного значения $d_{упр} \geq 0,5d$ [90].

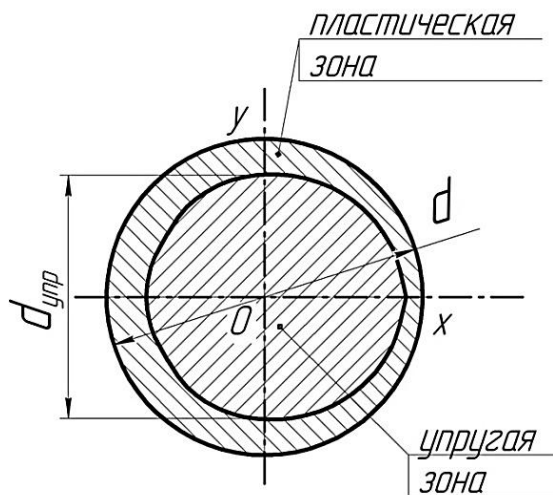


Рисунок 1.7 — Форма и размер упругого ядра сечения витка пружины при нагрузке сжатия витков, равной нулю [1, 6, 81]

Форма и размер упругого ядра сечения витка пружины, не имеющей инерционного зазора, при сдавливании витков показаны на рисунке 1.8 [1, 6, 81].

Упрочнение носит локальный поверхностный характер в зоне контакта витков.

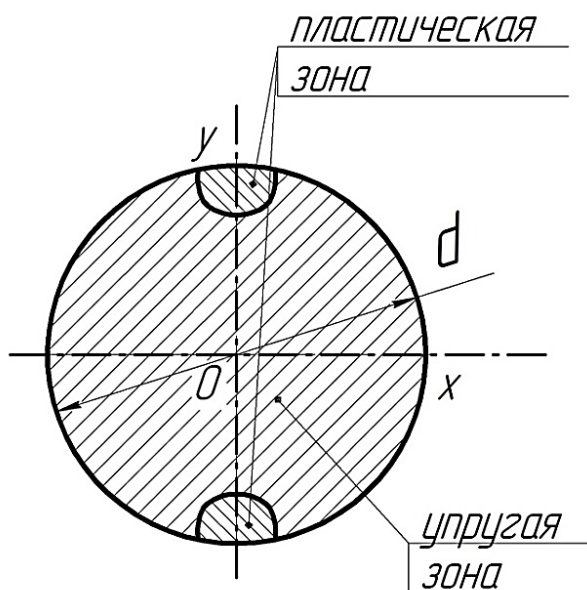


Рисунок 1.8 — Форма и размер упругого ядра сечения витка пружины, не имеющей инерционного зазора, при сдавливании витков [1, 6, 81]

При контактном заневоливании происходит раздвоение зоны пластического течения, что обеспечивает высокую производительность данного метода при упрочнении пружин. В сечении витка пружины образуется 3 зоны (рисунок 1.9) [81]:

— *зона с максимальным упрочнением*. Образуется под действием контактной нагрузки между витками, при увеличении которой зона пластичности распространяется в более глубокие слои сечения витка, тем самым увеличивая глубину зоны упрочнения. При температурах ниже температуры рекристаллизации разупрочнения материала не происходит;

— *промежуточная зона*. Образуется под действием крутящего момента, величина которого увеличивается лишь до приложения нагрузки контактного заневоливания (т. е. до соприкосновения витков), а с её увеличением остается постоянной. В данной зоне механические свойства и интенсивность напряжений меняются градиентно;

— *зона с исходной структурой металла*. Представляет собой зону с напряжениями, не превышающими предел упругости (т. е. упругую зону), неупрочнённый участок сечения витка с начальными механическими свойствами. В данной зоне сохраняются напряжения, возникшие при заневоливании, которые при разгрузке стремятся вернуть пружину в исходное положение, чему препятствуют структуры промежуточной зоны и зоны с максимальным упрочнением. При таком взаимодействии процесс разгрузки не приводит к полному освобождению материала от напряжений [1], однако, поскольку внешние нагрузки теперь отсутствуют, все внутренние силы в сечении витка пружины взаимно уравнивают друг друга. Возникшие таким образом остаточные напряжения позволяют повысить рабочую нагрузку пружины при эксплуатации [1].

Варьируя нагрузку контактного заневоливания, можно управлять формированием локальной пластической зоны поверхностного упрочнения, показанной на рисунке 1.8 [81]. Здесь активной деформируемой зоной является локальная зона, которая находится в местах контакта витков по всей длине пружины (т. е. зона с максимальным упрочнением). Кроме того, варьируя высотой пружины перед заневоливанием, можно управляемо формировать зону объемного упрочнения (т. е. промежуточную зону), показанную на рисунке 1.7 [81].

Максимальной величины расчетные напряжения достигают в зоне контакта между витками при нагружении силой F (зона с максимальным упрочнением, рисунок 1.9), постепенно уменьшаясь к границе упругой и пластической зоны (промежуточная зона). На границе упругой и пластической зоны напряжения равны пределу текучести материала пружины. В зоне упругих деформаций механические свойства материала пружины сохраняются.

Контактное заневоливание отличается от известных способов упрочнения пружин тем, что реализуется возможность управлять формированием формы и размеров пластической зоны и зоны с исходной структурой металла (упругой) в сечении витка пружины, тем самым определяя геометрические и силовые параметры пружины [81].

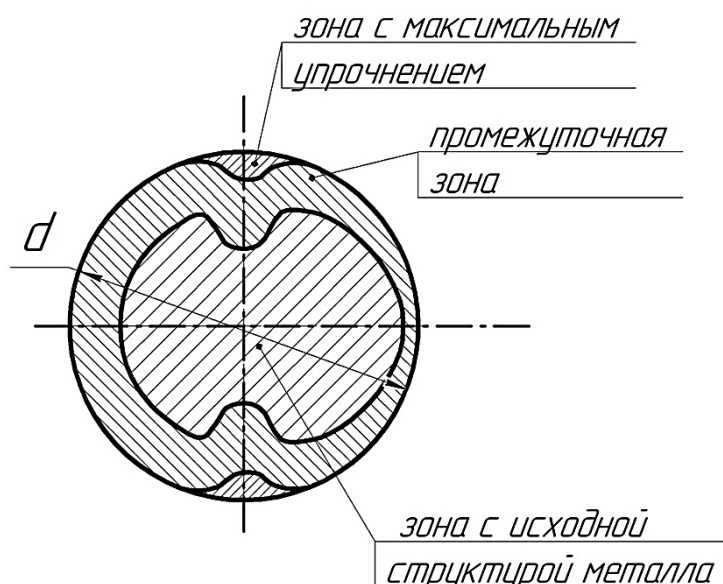


Рисунок 1.9 — Градиентный характер механических свойств по сечению пружины при контактном заневоливании [1, 6, 81]

Таким образом [81], контактное заневоливание можно отнести к градиентно управляемым эффективным процессам упрочнения пружин. Размеры зон и степень их упрочнения зависят от технологических параметров контактного заневоливания. На рисунке 1.10 представлена классификационная схема процессов пластического упрочнения пружин с учетом контактного заневоливания [81].

Эффективность контактного заневоливания объясняется изменением механических свойств материала пружин. При этом повышаются показатели прочностных свойств (твердость, предел пропорциональности, предел текучести, предел упругости и предел прочности), в то же время несколько снижаются показатели пластических свойств (относительное удлинение и сужение, ударная вязкость).



Рисунок 1.10 — Классификация процессов пластического упрочнения пружин [81]

Комплекс геометрических и физико-механических преобразований поверхности и приповерхностного слоя витков при контактном заневоливании обеспечивает существенное приращение предела выносливости пружин, благодаря чему повышаются их эксплуатационные свойства. Поэтому предпочтительным методом упрочнения пружин является контактное заневоливание [1, 6].

Контактное заневоливание рекомендуется применять и для пружин, работающих с ударными нагрузками. Нагрузка пластического упрочнения должна не менее чем на 5 % превышать нагрузку на пружину при эксплуатации [91].

1.5 Устройства для контактного заневоливания пружин

Рассмотрим конструкцию и принцип действия известных устройств для контактного заневоливания винтовых цилиндрических пружин сжатия.

Устройство [92] содержит плиту 1 (рисунок 1.11), на которой установлены пружина 2, нагружающий механизм 3, выравнитель нагрузки, выполненный в виде гидроцилиндров 4, полости которых сообщены между собой и равномерно расположены по окружности, рычаги 5, каждый из которых лежит одним концом на плунжере 6 гидроцилиндра, а вторым — на заневоливаемой пружине 2. Втулка 7 передает нагрузку от нагружающего устройства на рычаги в направлении продольной оси пружины. Плита закреплена на шаровой опоре 5, что позволяет самоцентрироваться заневоливаемой пружине по отношению к прилагаемой нагрузке.

Перед проведением заневоливания пружины полости плунжеров заполняют водой или маслом с таким расчетом, чтобы плунжеры поднялись на 8...10 мм. Таким образом, создают гидравлическую подушку для выравнивания нагрузок на всех 12 рычагах. При нагружении устройства под прессом пружина испытывает нагрузку, практически равномерно распределенную по среднему диаметру.

Недостатком описанного устройства является сложность конструкции.

Устройство, показанное на рисунке 1.12 [93] содержит плиту 1, стакан 2, установленный на плите с помощью болтов 3, вкладыши 4 и 5, между которыми устанавливают испытываемую пружину 6, пуансон 7 и привод 8 к нижнему вкладышу.

Устройство работает следующим образом [93]. Между вкладышами 4 и 5 устанавливают испытываемую пружину 6 в стакане 2 и нагружают пуансоном 7 с определённым усилием, оставляя зазор между витками. Включают привод поворота вкладыша 5 и раскручивают пружину с помощью упоров на вкладышах до соприкосновения её витков с поверхностью стакана. После этого дополнительным усилием производят контактное заневоливание пружины.

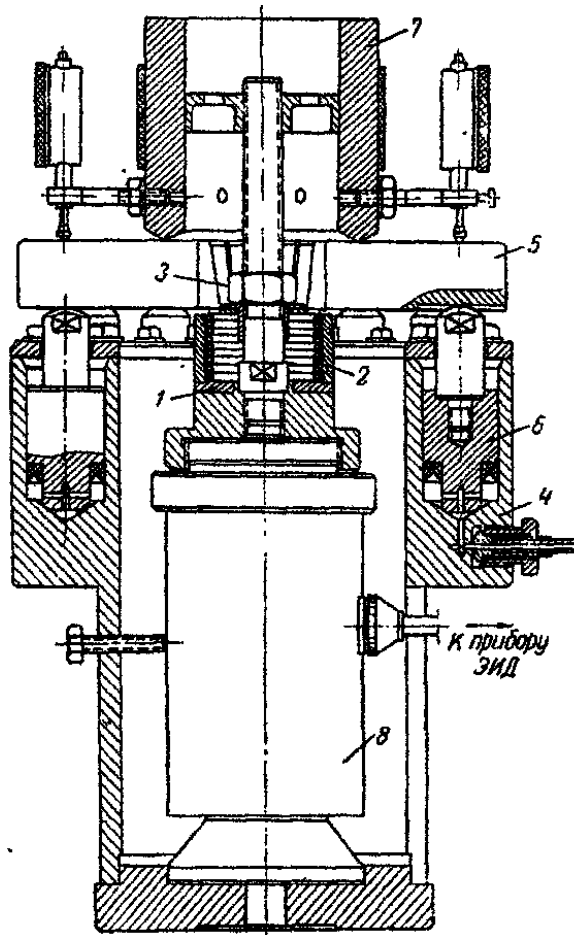


Рисунок 1.11 — Устройство для заневоливания пружин по а. с. 198747 [92]

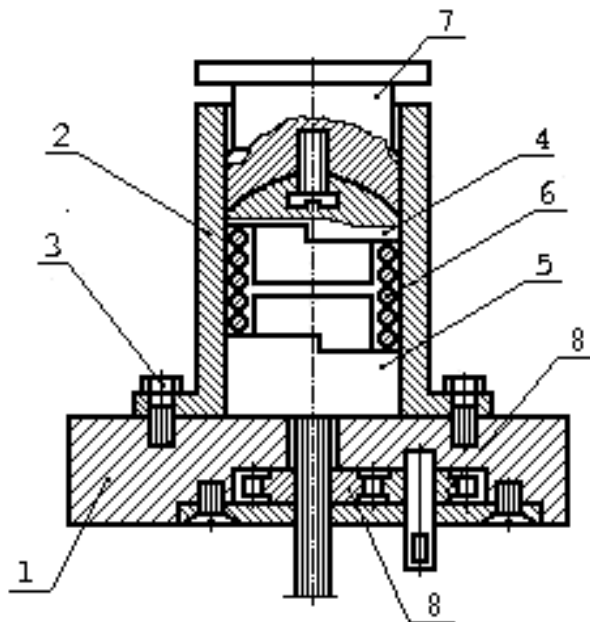


Рисунок 1.12 — Устройство для заневоливания пружин по а. с. 348792 [93]

Представленное на рисунке 1.13 устройство [94] состоит из верхнего вкладыша 1, имеющего сферическую поверхность, сопрягаемую со сферической

поверхностью пуансона 2, и нижнего вкладыша 3 с нарезанными на его наружной поверхности зубьями, сцепляемыми с шестерней 4, причём последняя взаимодействует непосредственно с приводом. Во вкладыше 1, имеющем шлицевые пазы, размещены подпружиненные фрикционные диски 5 и 6, взаимодействующие со шлицевыми пазами вкладыша, с одной стороны, и шлицевыми пазами винта 7 – с другой.

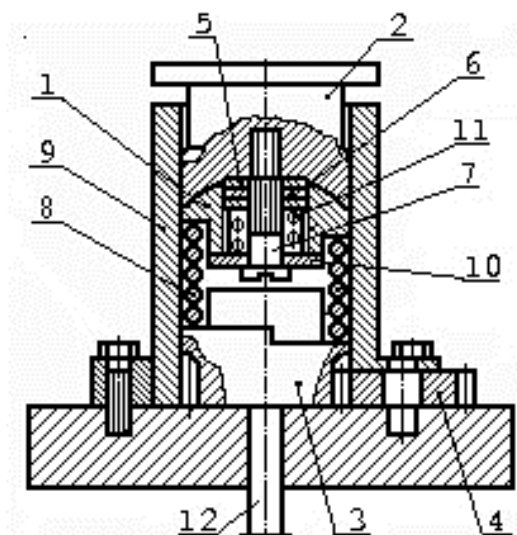


Рисунок 1.13 — Устройство для заневоливания пружин по а. с. 419660 [94]

Работает устройство следующим образом [94]. При опускании пуансона 2 пружина 8 сжимается с определённым усилием, оставляя минимальный зазор между витками. После чего от приводного устройства поворачивается шестерня 4 и нижний вкладыш 3, который своим упором воздействует на испытуемую пружину 8 и раскручивает её до соприкосновения с боковой поверхностью стакана 9. При этом пружина 11 подбирается таким образом, чтобы фрикционные диски препятствовали повороту вкладыша 1 при предварительном поджатии пружины 8, после чего дополнительным усилием прессы производится контактное заневоливание пружины 8. При этом торцевой момент пружины от контактного заневоливания превысит момент сопротивления подпружиненных фрикционных дисков, расположенных во вкладыше 1, и последний повернётся на необходимый для компенсации торцевого момента угол, обеспечивая в то же время контакт заневоливаемой пружины со стаканом и упором вкладыша 3. После требуемой

выдержки снимают нагрузку и поднимают пуансон 2, выталкивая пружину 8 посредством выталкивателя 12, связанного с нижним цилиндром прессы.

На рисунке 1.14 представлено устройство для контактного заневоливания пружин [95], содержащее неподвижную плиту 6, подвижную плиту 4 с направляющими 1 для установки пружины 2, шаровую опору 5, соединяющую плиты 4 и 6, и втулку 7. Направляющие 1 выполнены в виде пластин с прорезями, в которых располагается пружина 2, а на торцевой поверхности подвижной плиты 4 выполнены пазы 3 для перемещения направляющих, имеющие глубину, превышающую высоту перемычек направляющих.

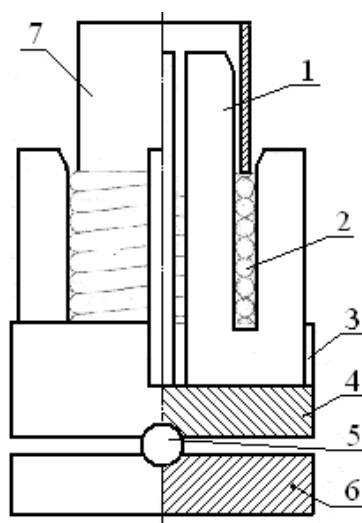


Рисунок 1.14 — Устройство для заневоливания пружин по а. с. 643684 [95]

Пружина устанавливается в прорези направляющих 1 до упора в подвижную плиту 4. Непосредственно на пружину ставится втулка 7. Пружину сжимают на прессе до заданной силы и выдерживают в сжатом состоянии необходимое время (например, 30 с).

С помощью направляющих, которые могут перемещаться в радиальном направлении, достигается выравнивание диаметров окружностей всех витков (средних и крайних) и их концентричное расположение в сжатом состоянии, а с помощью шаровой опоры — самоцентрирование пружины по отношению к прилагаемой силе.

После разгрузки пружина извлекается из приспособления.

Недостатком устройства является сложность конструкции, сложность его наладки, а также неравномерность приложения нагрузки к опорным и первым рабочим виткам, т. к. на втулке 7 и в направляющих 1 не предусмотрено выполнение винтовых поверхностей с упорами и повторяющими профиль крайних витков пружины.

На рисунках 1.15 и 1.16 представлено устройство [96], содержащее нижнюю неподвижную плиту, обойму для установки пружины, пуансон с шаровой поверхностью, контактирующей с шаровой поверхностью верхнего вкладыша, нижний вкладыш, расположенный на нижней плите, выполненные на обоих вкладышах винтовые поверхности с упором и повторяющие профиль крайних витков пружины. К нижней неподвижной плите прикреплены упоры и Г-образные направляющие планки, контактирующие с ответными выступами обоймы, а также механизм для перемещения обоймы из зоны установки и выемки пружины в рабочую зону и обратно.

Работает устройство следующим образом [96]. Устройство устанавливается на пресс. Нижняя плита 6 закрепляется к столу прессы, а пуансон 1 — к верхней плите прессы, от которой усилие прессы передаётся на пуансон 1. Пружину 4 и верхний вкладыш 2 устанавливают в обойму 3 в зоне для установки и замера пружины таким образом, чтобы пружина 4 соприкоснулась крайними витками с винтовыми поверхностями вкладышей и упёрлась торцом крайних витков в упор вкладышей.

После этого посредством гидравлического цилиндра 11 и штока 12 обойму 3 передвигают в рабочую зону прессы и опускают пуансон 1. При опускании пуансона 1 пружина 4 сжимается до соприкосновения витков, опираясь на внутренний диаметр втулки 3. При этом благодаря наличию шаровой поверхности на пуансоне 1 и верхнем вкладыше 2, а также винтовых поверхностей и упоров на обоих вкладышах усилие прессы равномерно распределяется по диаметру пружины.

После требуемой выдержки под нагрузкой обойму 3 передвигают посредством цилиндра 11 и штока 12 в зону установки и выемки для замера высоты пружины.

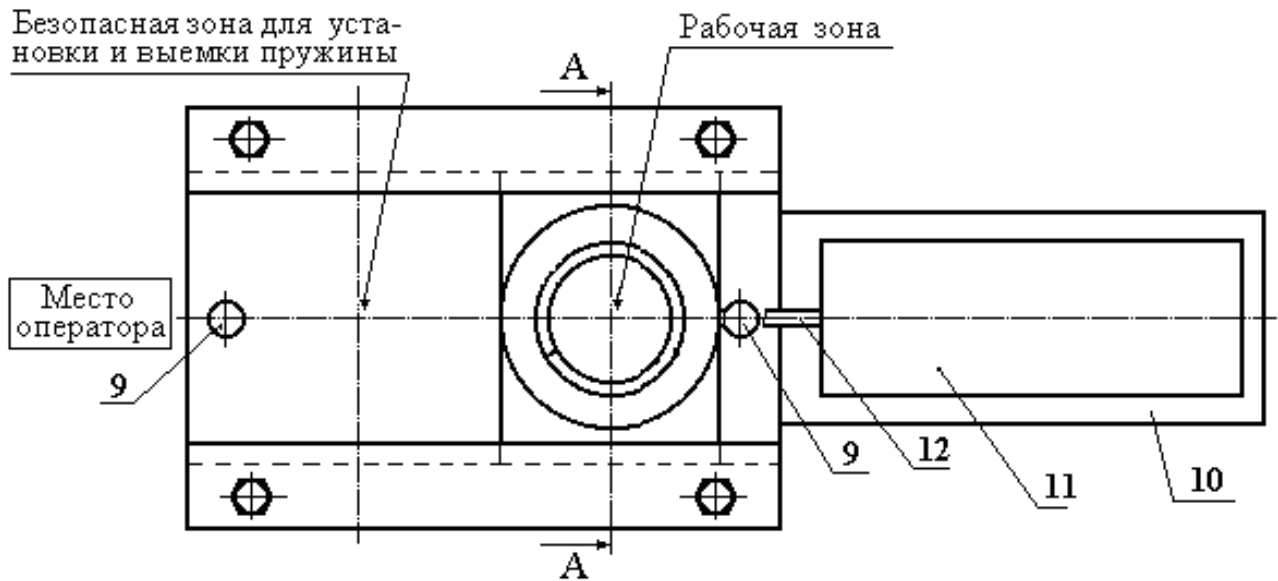


Рисунок 1.15 — Вид в плане (детали 1 и 2 условно не показаны) на устройство по пат. RU 2251036 [96]

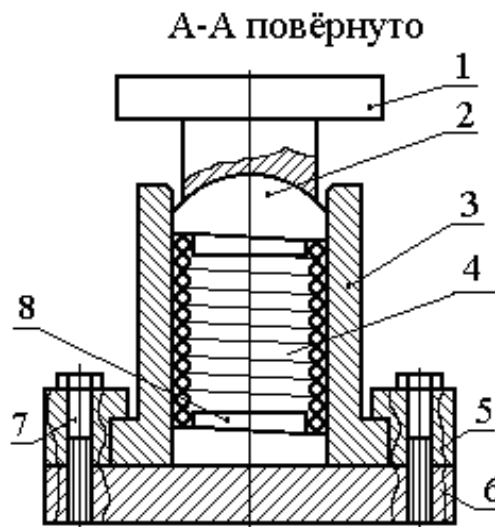


Рисунок 1.16 — Сечение А-А устройства по пат. RU 2251036 [96]

На рисунке 1.17 представлено устройство для контактного заневоливания пружин [97], содержащее пуансон с шаровой поверхностью, контактирующей с шаровой поверхностью верхнего вкладыша, нижний вкладыш, расположенный на нижней неподвижной плите, выполненные на обоих вкладышах винтовые поверхности с упором, повторяющие профиль крайних витков пружины. К

нижней неподвижной плите прикреплены прямоугольные направляющие опоры, которые переустанавливаются по наружному диаметру пружины, причём прямоугольные направляющие опоры крепятся к нижней неподвижной плите посредством выполненных в ней радиально Т-образных пазов.

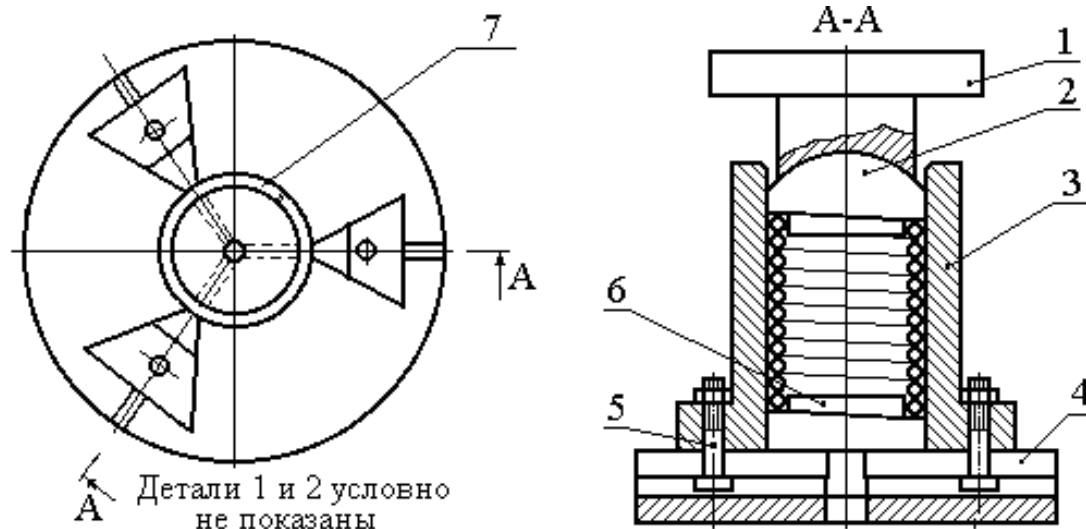


Рисунок 1.17 — Устройство для заневоливания по пат. RU 2251037 [97]

Работает устройство следующим образом [97]. Устройство устанавливается на пресс. Нижняя плита 4 закрепляется к столу пресса, а пуансон 1 — к верхней плите пресса, от которой усилие пресса передаётся на пуансон 1. Пружину 7 устанавливают в устройство таким образом, чтобы она соприкоснулась крайними витками с винтовыми поверхностями вкладышей и упёрлась торцом крайних витков в упор вкладышей. При опускании пуансона 1 пружина 7 сжимается до соприкосновения витков, опираясь на прямоугольные направляющие опоры 3. При этом благодаря наличию шаровой поверхности на пуансоне 1 и верхнем вкладыше 2, а также винтовых поверхностей на обоих вкладышах и упоров, усилие пресса равномерно распределяется по диаметру пружины. После требуемой выдержки под нагрузкой пружину вынимают из устройства.

Преимущество устройства [97] заключается в возможности переналадки для заневоливания пружин с различными размерами наружного диаметра и диаметра проволоки. Изготавливаются вновь только вкладыши, необходимые для равномерного распределения нагрузки по диаметру пружины.

Устройство (рис. 1.18) для контактного заневоливания пружин [98] содержит плиту, размещённый на ней стакан для установки в нём испытуемой пружины, размещённые в стакане два вкладыша, имеющие на торцах винтовую поверхность и упор, между которыми устанавливается испытуемая пружина, нижний вкладыш установлен с возможностью вращения относительно оси стакана, а верхний, связанный с пуансоном при помощи винта и контактирующий с пуансоном по шаровой поверхности, — с возможностью перемещения вдоль оси стакана. Внутри нижнего вкладыша встроена обгонная муфта с винтовой поверхностью, взаимодействующей с винтовой поверхностью штока, соединённого с нижним цилиндром пресса. Верхний вкладыш может крепиться к пуансону посредством ступенчатого винта с зазорами, обеспечивающими его вращение и отклонение его оси от оси пуансона.

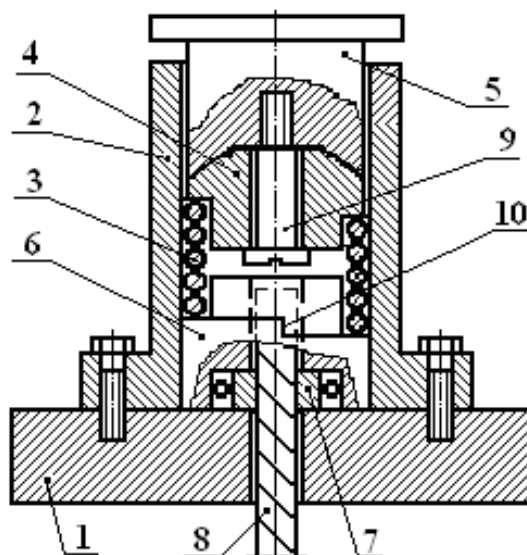


Рисунок 1.18 — Устройство для заневоливания пружин по пат. RU 2286556 [98]

Работает устройство следующим образом [98]. При опускании верхней плиты пресса и пуансона 5 пружина 3 несколько поджимается. Затем ходом нижнего цилиндра вверх приводят в движение шток 8, от чего его винтовая поверхность, воздействуя на винтовую поверхность заторможенной обгонной муфты 7, поворачивает нижний вкладыш 6. Вкладыш 6 своим упором воздействует на испытуемую пружину 3 и вращает её до соприкосновения с упором 10 вкладыша 4. Затем движением пресса сжимают пружину 3, прилагая

усилие контактного заневоливания. При этом торцевой момент пружины 3 от сжатия превысит момент трения между сферическими поверхностями пуансона 5 и вкладыша 4, и последний повернётся на необходимый для компенсации торцевого момента угол, обеспечивая в то же время контакт пружины 3 со стаканом 2 и упорами 10 обеих вкладышей.

После требуемой выдержки снимают нагрузку, ходом нижнего цилиндра вниз опускают шток 8 в первоначальное положение, поднимают пуансон 5. Наличие обгонной муфты в нижнем вкладыше не позволяет ему провернуться относительно пружины, что делает возможным, учитывая высоту вкладыша под пружиной, замерять высоту пружины, не вынимая из устройства. Затем удаляют пружину из устройства.

На рисунках 1.19 и 1.20 представлено устройство для контактного заневоливания пружин [99], содержащее нижнюю неподвижную плиту и нижнюю подвижную плиту, на которой установлены направляющие опоры для пружины.

Направляющие опоры установлены на нижней подвижной плите с возможностью переустановки по наружному диаметру пружины, которая размещается между нижним и верхним вкладышами, на торцевых поверхностях которых выполнены винтовые поверхности, повторяющие профиль крайних витков пружины и имеющие упоры, причём нижний вкладыш расположен на нижней подвижной плите между переустанавливаемыми направляющими опорами, а пружину размещают таким образом, чтобы она соприкасалась крайними витками с винтовыми поверхностями вкладышей и упиралась торцом крайних витков в упоры вкладышей, при этом верхний вкладыш выполнен с шаровой поверхностью, взаимодействующей с шаровой поверхностью пуансона. На нижней неподвижной плите закреплены направляющие планки и упоры, ограничивающие крайние положения нижней подвижной плиты, которая снабжена механизмом для перемещения её в рабочую зону под пуансон и обратно.

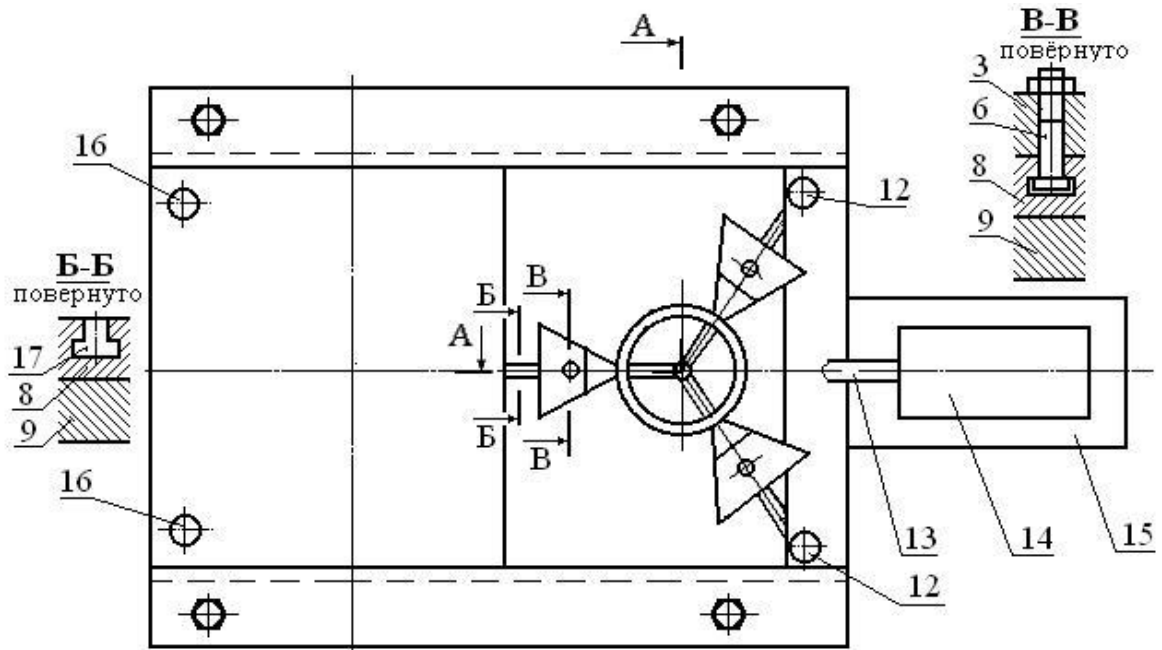


Рисунок 1.19 — Устройство для заневоливания пружин по пат. RU 2296968, вид в плане (детали 1 и 2 условно не показаны) [99]

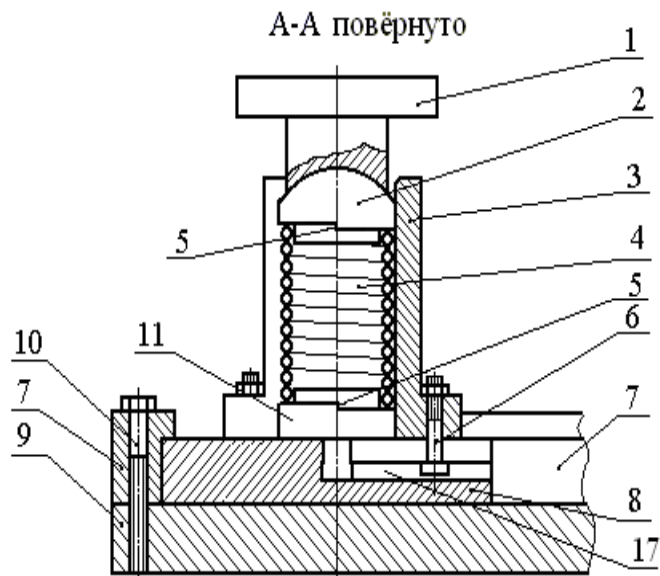


Рисунок 1.20 — Сечение А-А устройства по пат. RU 2296968 [99]

Работает устройство следующим образом [99]. Устройство устанавливается на стол прессы. Нижнюю плиту 9 прикрепляют к столу прессы, а пуансон 1 — к верхней плите прессы. Подвижная плита 8 в первоначальном положении соприкасается с упорами 16. В этом положении пружину 4 устанавливают в устройство таким образом, чтобы она соприкоснулась крайними витками с

винтовыми поверхностями обеих вкладышей и упёрлась торцами крайних витков в упоры 5 вкладышей. После этого движением штока 13 посредством механизма 14 передвигают нижнюю подвижную плиту 8 между направляющими планками 7 к упорам 12. Опускают пуансон 1, сжимая пружину 4, которая опирается на направляющие опоры 3. Благодаря наличию шаровой поверхности на пуансоне 1 и верхнем вкладыше 2, а также винтовых поверхностей с упорами 5 на обеих вкладышах, усилие прессы равномерно распределяется по диаметру пружины 4. После выдержки под нагрузкой поднимают пуансон 1, подвижную плиту 8 передвигают посредством механизма 14 и штока 13 в первоначальное положение к упорам 16. Затем пружину вынимают из устройства и производят замеры геометрических и силовых параметров.

Переналадку устройства для заневоливания пружины с другими размерами наружного диаметра и диаметра проволоки осуществляют в зоне установки пружины перестановкой направляющих опор 3 и заменой вкладышей 2 и 11.

Устройство [100], показанное на рисунке 1.21 содержит стакан для установки в нём вкладышей и между ними испытываемой пружины, пуансон с шаровой поверхностью, контактирующей с шаровой поверхностью верхнего вкладыша, нижний вкладыш; причём верхний вкладыш установлен с возможностью вращения относительно оси стакана и перемещения вдоль оси стакана и с возможностью отклонения своей оси от оси пуансона. Нижний вкладыш жёстко связан с неподвижным стаканом, а верхний вкладыш прикреплен к пуансону винтом с шайбой. На винте пуансона и в центральном отверстии верхнего вкладыша могут иметься шлицевые пазы и между ними размещаться подпружиненные чередующиеся фрикционные диски, соединённые соответственно при помощи шлицев со шлицевыми пазами винта пуансона и шлицевыми пазами верхнего вкладыша. Внутренний диаметр стакана может быть выполнен размером в пределах от диаметра сжатой пружины до диаметра навитой пружины. На торцах вкладышей имеются поверхности с упорами глубиной не менее чем высота витка пружины и повторяющие профиль торцов крайних витков

пружины для придания ей правильной геометрической формы при заневоливании раскручиванием пружины возникающим торцевым моментом при её сжатии.

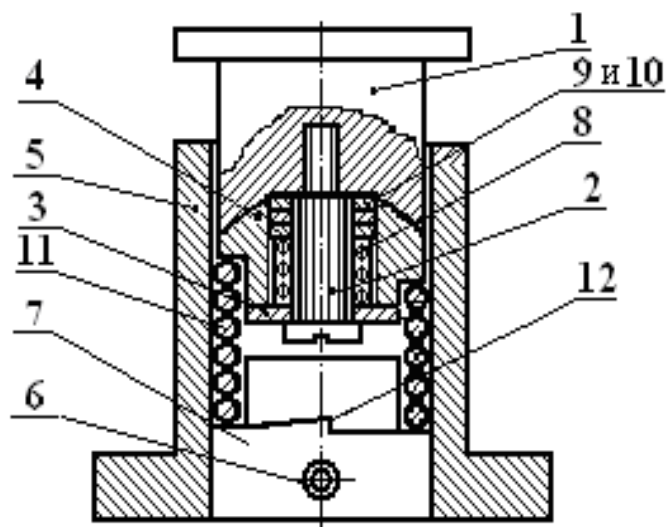


Рисунок 1.21 — Устройство для заневоливания пружин по пат. RU 2390667 [100]

Работает устройство следующим образом [100]. Устройство устанавливают на неподвижный стол прессы, пуансон 1 закрепляют к верхней подвижной плите прессы, а стакан 5 закрепляют к нижней неподвижной плите прессы. При опускании пуансона 1 пружина 11 сжимается и изменяет кривизну витка. От этого возникает торцевой момент, и пружина раскручивается, взаимодействуя с внутренним диаметром стакана и с поверхностями и упорами вкладышей, контактирующими с торцами пружины. При этом пружина 8 подбирается таким образом, чтобы сила фрикционных дисков препятствовала повороту вкладыша 4 при сжатии пружины 11 силой F_3 . Затем дополнительным усилием прессы производят сжатие витков пружины осевой силой $(10...300) F_3$, т. е. производят контактное заневоливание пружины 11. При этом торцевой момент пружины от контактного заневоливания превысит момент сопротивления подпружиненных фрикционных дисков, расположенных во вкладыше 4, и последний повернется на необходимый для компенсации торцевого момента угол, обеспечивая в то же время контакт заневоливаемой пружины со стаканом и с контактирующими поверхностями и упорами вкладышей 4 и 7. После требуемой выдержки снимают нагрузку, поднимают пуансон, вынимают заневоленную пружину.

Недостатками устройства [100] является сложность конструкции, а также то, что образовавшийся при обработке вкладышей острый край их упоров оставляет острые вмятины на первых рабочих витках пружины, перерезая таким образом волокна металла, отчего создаются предпосылки для развития трещин и разрушения пружин при эксплуатации [88].

1.6 Математическая модель контактного заневоливания пружин

В настоящем пункте описывается математическая модель исследования напряжённо-деформированного состояния витков пружины в процессе контактного заневоливания. В качестве основных допущений приняты [6]:

— вследствие малых пластических деформаций принята деформационная теория пластичности;

— вследствие того, что касательные напряжения на поверхности витка близки к пределу текучести, и из в принципе объёмной контактной задачи учитываются только самые главные, преобладающие, напряжения сжатия σ_y , напряжённое состояние принимается плоским в виде одноосного сжатия от контактной нагрузки и сдвига от кручения;

— форма и размеры поперечного сечения витка считаются неизменными ввиду малых деформаций;

— использована общепринятая гипотеза плоских сечений и сохранения прямолинейности радиусов;

— предполагается, что при вторичных пластических деформациях величина предела текучести сохраняет своё значение (эффект Баушингера не учитывается);

— реологические свойства материала приняты как для упругопластического тела с линейным упрочнением;

— принято условие пластичности Губера – Мизеса;

— силы трения между витками не учитываются ввиду их малости.

1.6.1 Определение границы, отделяющей упругую зону от пластической в поперечном сечении рабочего витка

Изменение геометрических параметров пружины и повышение её нагрузочной способности связано с возникновением пластических деформаций по периферии сечения витка и в месте контакта витков, а также с сохранением зоны с исходной структурой металла в центральной части поперечного сечения витка [6]. В любом из поперечных сечений пружины, сжатой до соприкосновения витков, тангенциальное напряжение от кручения [6, 101], МПа,

$$\tau = \Delta\kappa \cdot \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \cdot G, \quad (1.1)$$

где $\Delta\kappa$ — приращение кручения витка пружины;

x_0, y_0 — координаты точек, принадлежащих границе упругой зоны (рисунок 1.22), мм;

G — модуль сдвига материала пружины, МПа.

Приращение кручения витка пружины [6]

$$\Delta\kappa = \kappa_3 - \kappa_{сж}, \quad (1.2)$$

где κ_3 — кручение витка пружины до заневоливания;

$\kappa_{сж}$ — кручение витка сжатой пружины.

$$\Delta\kappa = \kappa_3 - \kappa_{сж} = \frac{\sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3}{R_3} - \frac{\sin \alpha_{сж} \cdot \cos \alpha_{сж}}{R_{сж}}, \quad (1.3)$$

где α_3 и $\alpha_{сж}$ — угол наклона витков пружины в свободном состоянии и сжатой соответственно, в градусах;

$R_3, R_{сж}$ — радиус пружины в свободном состоянии и сжатой соответственно, мм.

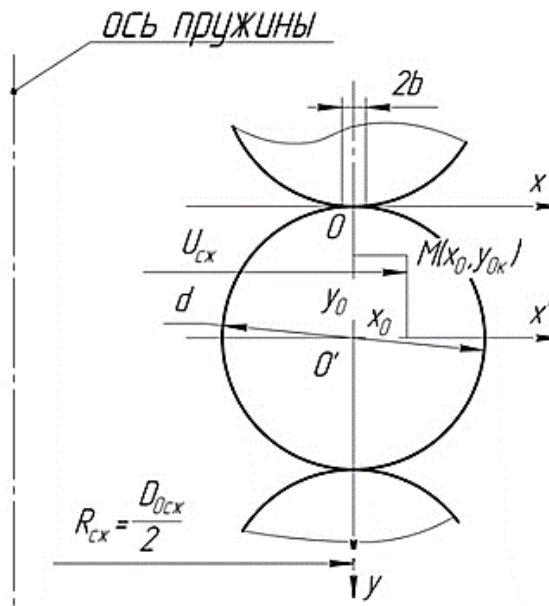


Рисунок 1.22 — Сечение витков пружины при контактном заневоливании:
 $D_{0сж}$ — средний диаметр пружины, сжатой до соприкосновения витков, мм;
 $U_{сж}$ — расстояние от оси пружины до абсциссы границы упругой зоны, мм;
 $2b$ — ширина полоски контакта витков при сжатии пружины, мм;
 $x_0, y_0, y_{0к}$ — координаты точек, принадлежащих границе упругой зоны при
 контактном заневоливании, мм [6]

После преобразований выражение (1.1) с учётом (1.2) и (1.3) примет вид [6]

$$\tau = \left(\frac{\sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3}{U_3} - \frac{\sin \alpha_{сж} \cdot \cos \alpha_{сж}}{U_{сж}} \right) \cdot \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \cdot G, \quad (1.4)$$

где U_3 и $U_{сж}$ — расстояние от оси пружины до абсциссы границы упругой зоны пружины до заневоливания и сжатой до соприкосновения витков соответственно, мм, причём $U_{сж} = R_{сж} + x_0$ (рисунок 1.22);

$$y_0 = \frac{d}{2} - y_{0к} \text{ — ордината границы упругой зоны, мм.}$$

Сжимающие виток пружины вдоль оси y напряжения σ_y [6, 102, 103], МПа,

$$\sigma_y = -\rho_0 \cdot \frac{b \cdot y_{0к}^3}{\lambda^2 + b^2 \cdot y_{0к}^2} \cdot \sqrt{\frac{b^2 + \lambda}{\lambda}},$$

где ρ_0 — давление в точках средней линии полоски контакта, Н/мм²:

$$\rho_0 = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{P_k}{b}; \quad (1.5)$$

b — полуширина полоски контакта (рисунок 1.22), мм;

λ — эллиптическая координата, которая находится в виде положительного корня из уравнения [6, 103, 104], мм²,

$$\frac{x^2}{b^2 + \lambda} + \frac{y_{0k}^2}{\lambda} = 1. \quad (1.6)$$

Контактная составляющая нагрузки заневоливания P_k , приходящейся на единицу длины витка пружины [6, 103] (рисунок 1.23), Н/мм,

$$P_k = \frac{0,863 \cdot E \cdot b^2}{r},$$

где r — радиус сечения витка пружины, мм;

E — модуль упругости материала проволоки пружины, МПа.

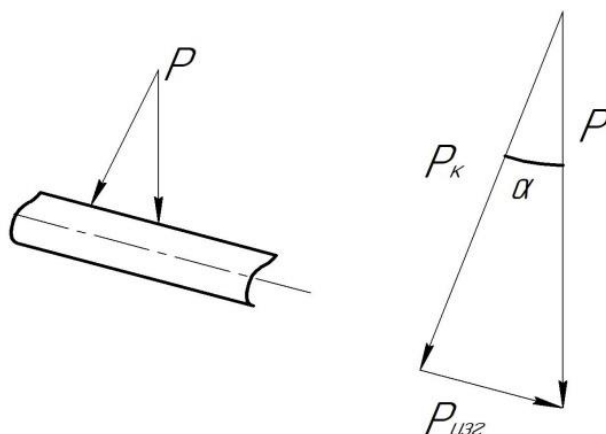


Рисунок 1.23 — Составляющие нагрузки, действующей на виток пружины при контактном заневоливании

Нагрузка контактного заневоливания P , приходящаяся на единицу длины витка пружины [6], Н/мм,

$$P = \frac{P_k}{\cos \alpha_{сж}} = \frac{0,863 \cdot E \cdot b^2}{r \cdot \cos \alpha_{сж}}.$$

Величина нагрузки контактного заневоливания пружины [6], Н,

$$Q_{\kappa} = P \cdot \pi \cdot D_{0\text{сж}} = \frac{0,863 \cdot E \cdot b^2 \cdot \pi \cdot D_{0\text{сж}}}{r \cdot \cos \alpha_{\text{сж}}}. \quad (1.7)$$

После преобразований уравнение (1.5) принимает вид [6]

$$\rho_0 = \frac{2}{\pi \cdot b} \cdot \frac{0,863 \cdot E \cdot b^2}{r} = A \cdot b, \quad (1.8)$$

где постоянная $A = 1,727E / (\pi r)$.

После подстановки имеем [6]

$$\sigma_y = -A \cdot \frac{b^2 \cdot y_{0\kappa}^3}{\lambda^2 + b^2 \cdot y_{0\kappa}^2} \cdot \sqrt{\frac{b^2 + \lambda}{\lambda}}. \quad (1.9)$$

В соответствии с теорией малых упругопластических деформаций [6, 101]

$$\sigma_y^2 + 3 \cdot \tau^2 = \sigma_m^2, \quad (1.10)$$

где σ_m — предел текучести материала пружины, МПа.

Подставляя в уравнение (1.10) значения напряжений из формул (1.9) и (1.4), получаем уравнение для определения границы, отделяющей упругую зону от пластической в поперечном сечении витка [1, 6, 80]

$$\left(-A \cdot \frac{b^2 \cdot y_{0\kappa}^3}{\lambda^2 + b^2 \cdot y_{0\kappa}^2} \cdot \sqrt{\frac{b^2 + \lambda}{\lambda}} \right)^2 + 3 \cdot \left(\left(\frac{\sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3}{U_3} - \frac{\sin \alpha_{\text{сж}} \cdot \cos \alpha_{\text{сж}}}{U_{\text{сж}}} \right) \cdot \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{d}{2} - y_{0\kappa} \right)^2} \cdot G \right)^2 = \sigma_m^2,$$

или

$$3 \cdot \left(\frac{\Delta \kappa \cdot G \cdot x_0}{\sigma_m} \right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{\Delta \kappa \cdot G}{\sigma_m} \right)^2 \cdot (r - y_{0\kappa})^2 + \frac{C \cdot y_{0\kappa}^6}{(\lambda^2 + b^2 \cdot y_{0\kappa}^2)^2 \cdot \sigma_m^2} = 1 \quad (1.11)$$

где $C = \frac{A^2 \cdot b^4 \cdot (b^2 + \lambda)}{\lambda}$.

1.6.2 Напряженное состояние рабочих витков при контактном заневоливании

Условные напряжения сжатия σ_y в пластической зоне поперечного сечения, МПа [6, 103]

$$\sigma_y = -E \cdot \varepsilon ,$$

$$\sigma_y = -E \cdot \frac{1,727 \cdot b^2 \cdot y^3}{\pi \cdot r \cdot (\lambda_1^2 + b^2 \cdot y^2)} \cdot \sqrt{\frac{b^2 + \lambda_1}{\lambda_1}} , \quad (1.12)$$

где λ_1 — эллиптическая координата, мм², которая находится в виде положительного корня из уравнения [6]

$$\frac{x^2}{b^2 + \lambda_1} + \frac{y^2}{\lambda_1} = 1, \quad (1.13)$$

x, y — координаты точки пластической зоны, в которой определяются значения напряжений, мм;

ε — полная относительная линейная деформация, которая содержит упругую ($\varepsilon_{упр}$) и пластическую ($\varepsilon_{нл}$) части [6]

$$\varepsilon = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{нл}. \quad (1.14)$$

При сжатии витков пластическая составляющая деформации $\varepsilon_{нл}$ из формул (1.12) и (1.14) равна [6]

$$\varepsilon_{нл} = \varepsilon - \varepsilon_{упр} = \frac{1,727 \cdot b^2 \cdot y^3}{\pi \cdot r \cdot (\lambda_1^2 + b^2 \cdot y^2)} \cdot \sqrt{\frac{b^2 + \lambda_1}{\lambda_1}} - \frac{1,727 \cdot b^2 \cdot y_{0к}^3}{\pi \cdot r \cdot (\lambda^2 + b^2 \cdot y_{0к}^2)} \cdot \sqrt{\frac{b^2 + \lambda}{\lambda}} . \quad (1.15)$$

Сжимающие напряжения σ_y в пластической зоне поперечного сечения витка, МПа [6, 105]

$$\sigma_y = \sigma_m + E_1 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_{упр}) , \quad (1.16)$$

где E_I — модуль упругости материала пружины, МПа.

$$\sigma_m = -E \cdot \frac{1,727 \cdot b^2 \cdot y_{0к}^3}{\pi \cdot r \cdot (\lambda^2 + b^2 \cdot y_{0к}^2)} \cdot \sqrt{\frac{b^2 + \lambda}{\lambda}} \quad (1.17)$$

Обозначим [6]:

$$X = \frac{1,727 \cdot b^2}{\pi \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{b^2 + \lambda}{\lambda}}, \quad (1.18)$$

$$X_1 = \frac{1,727 \cdot b^2}{\pi \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{b^2 + \lambda_1}{\lambda_1}} \quad (1.19)$$

С учётом (1.15), (1.17), (1.18) и (1.19) выражение (1.16) имеет вид [6]

$$\sigma_y = X \cdot \frac{E \cdot y_{0к}^3}{(\lambda^2 + b^2 \cdot y_{0к}^2)} + E_I \cdot \left(X_1 \cdot \frac{y^3}{(\lambda_1^2 + b^2 \cdot y^2)} - X \cdot \frac{y_{0к}^3}{(\lambda^2 + b^2 \cdot y_{0к}^2)} \right) \quad (1.20)$$

Напряжения кручения $\tau_{кр}$, МПа [6]

$$\tau_{кр} = \frac{\Delta k \cdot G \cdot \sqrt{x^2 + \left(\frac{d}{2} - y\right)^2}}{Z}, \quad (1.21)$$

где $Z = 1 + \varepsilon_{nl} / \varepsilon_{упр}$ — величина, характеризующая глубину пластического упрочнения по сечению витка пружины [6];

ε_{nl} — пластическая часть полной относительной линейной деформации;

$\varepsilon_{упр}$ — упругая часть полной относительной линейной деформации.

Для определения момента кручения в поперечном сечении витка [21, 80] пружины при контактном заневоливании разобьём половину сечения проволоки на s элементов со сторонами $\Delta x = x_i - x_{i-1}$, $\Delta y = y_i - y_{i-1}$, (рисунок 1.23). Величины x и y при этом меняются в пределах:

$$\begin{aligned} -r &= x_0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{i-1} < x_i < x_n = r \\ 0 &= y_0 < y_1 < y_2 < \dots < y_{j-1} < y_j < y_m = r \end{aligned}$$

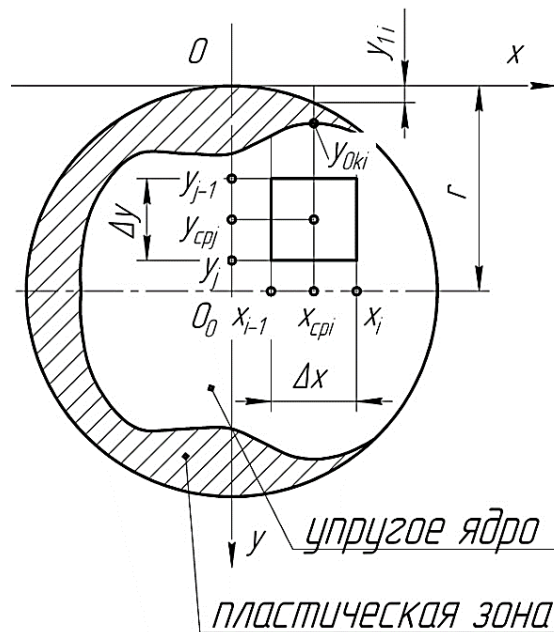


Рисунок 1.24 — Сечение витка пружины при контактном заневоливании

Через Δx обозначена разность $x_i - x_{i-1}$, которую будем называть длиной элементарного отрезка $[x_{i-1}, x_i]$. В каждом из элементов существует точка с координатами x_{cpi}, y_{cpi} , которой в сечении витка пружины соответствуют свои точки y_{1i} и y_{0i} , а значение y меняется от $y = y_{1i}$ до $y = r$. Причём:

$$x_{cpi} = \frac{x_i + x_{i-1}}{2}, \quad (1.22)$$

$$y_{cpi} = \frac{y_j + y_{j-1}}{2}, \quad (1.23)$$

$$y_{1i} = r - \sqrt{r^2 - x_{cpi}^2}, \quad (1.24)$$

где y_{1i} — граница сечения проволоки пружины по периферии вдоль оси y , мм.

Для каждого значения x_{cpi} ордината границы [1, 6, 21], отделяющей упругую зону от пластической y_{0ki} , величина постоянная при данной ширине полоски контакта и определяется методом последовательных приближений путем подстановки вместо x_0 значения x_{cpi} в уравнение

$$\left(-A \cdot \frac{b^2 \cdot y_{0\kappa}^3}{\lambda^2 + b^2 \cdot y_{0\kappa}^2} \cdot \sqrt{\frac{b^2 + \lambda}{\lambda}} \right)^2 +$$

$$+ 3 \cdot \left(\left(\frac{\sin \alpha_3 \cdot \cos \alpha_3}{U_3} - \frac{\sin \alpha_{сж} \cdot \cos \alpha_{сж}}{U_{сж}} \right) \cdot \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{d}{2} - y_{0\kappa} \right)^2} \cdot G \right)^2 = \sigma_m^2. \quad (1.25)$$

Крутящий момент [6, 106]

$$M_{кр} = \int_F \tau \cdot \rho dS = \int_F \frac{\Delta \kappa \cdot G \cdot \left(x^2 + \left(\frac{d}{2} - y \right)^2 \right)}{Z} dS, \quad (1.26)$$

где S — площадь поперечного сечения витка, мм²;

ρ — полярный радиус исследуемой точки сечения витка, мм.

В выражении (1.26) площадь поперечного сечения проволоки пружины можно заменить суммой площадей элементов (рисунок 1.24) с основаниями Δx_i и высотами Δy_j . Каждой точке пластической области сечения витка пружины при этом соответствует своя величина $Z_{i,j}$. Тогда выражение (1.26) для случая контактного заневольивания принимает вид [80]

$$M_{кр} = \sum_{i,j=1}^{i=n, j=m} M_{кpi,j} = 2 \cdot G \cdot \sum_{i,j=1}^{i=n, j=m} \frac{\Delta \kappa_{i,j}}{Z_{i,j}} \cdot \int_{x_{i-1}}^{x_i} \left(\int_{y_{j-1}}^{y_j} \left(x^2 + \left(\frac{d}{2} - y \right)^2 \right) dy \right) dx, \quad (1.27)$$

где $\Delta \kappa_{i,j}$ — приращение кручения волокна пружины, проходящего в сечении витка через точку с координатами x_{cpi}, y_{cpj} .

$$\int_{y_{j-1}}^{y_j} \left(x^2 + \left(\frac{d}{2} - y \right)^2 \right) dy = \int_{y_{j-1}}^{y_j} x^2 dy + \int_{y_{j-1}}^{y_j} \frac{d^2}{4} dy - \int_{y_{j-1}}^{y_j} d \cdot y dy + \int_{y_{j-1}}^{y_j} y^2 dy =$$

$$= x^2 \cdot y \Big|_{y_{j-1}}^{y_j} + \frac{d^2}{4} \cdot y \Big|_{y_{j-1}}^{y_j} - d \cdot \frac{y^2}{2} \Big|_{y_{j-1}}^{y_j} + \frac{y^3}{3} \Big|_{y_{j-1}}^{y_j} =$$

$$= x^2 \cdot (y_j - y_{j-1}) + \frac{d^2}{4} \cdot (y_j - y_{j-1}) - \frac{d}{2} \cdot (y_j^2 - y_{j-1}^2) + \frac{1}{3} \cdot (y_j^3 - y_{j-1}^3),$$

$$\begin{aligned}
& \int_{x_{i-1}}^{x_i} \left(\int_{y_{j-1}}^{y_j} \left(x^2 + \left(\frac{d}{2} - y \right)^2 \right) dy \right) dx = \\
& = \int_{x_{i-1}}^{x_i} \left(x^2 \cdot (y_j - y_{j-1}) + \frac{d^2}{4} \cdot (y_j - y_{j-1}) - \frac{d}{2} \cdot (y_j^2 - y_{j-1}^2) + \frac{1}{3} \cdot (y_j^3 - y_{j-1}^3) \right) dx = \\
& = (x_i^3 - x_{i-1}^3) \cdot \frac{1}{3} \cdot (y_j - y_{j-1}) + \frac{d^2}{4} \cdot (y_j - y_{j-1}) \cdot (x_i - x_{i-1}) - \\
& - \frac{d}{2} \cdot (y_j^2 - y_{j-1}^2) \cdot (x_i - x_{i-1}) + \frac{1}{3} \cdot (y_j^3 - y_{j-1}^3) \cdot (x_i - x_{i-1}) = N_{i,j}. \quad (1.28)
\end{aligned}$$

С учётом (1.28) выражение (1.27) [80]

$$M_{кр} = 2 \cdot G \cdot \sum_{i,j=1}^{i=n, j=m} \frac{\Delta \kappa_{i,j}}{Z_{i,j}} \cdot N_{i,j}. \quad (1.29)$$

Представленные выражения рекомендуется использовать при определении требуемой нагрузки контактного заневоливания и внутренних силовых факторов, возникающих в пружине.

1.6.3 Определение осадки пружины при контактном заневоливании

Осадку пружины при контактном заневоливании [80] определяет разница между приращением кручения $\Delta \kappa$ при первоначальном сжатии с приложением нагрузки и приращением кручения при разгрузке $\Delta \kappa_2/K$

$$\Delta \kappa - \frac{\Delta \kappa_2}{K} = \Delta \kappa - \frac{32 \cdot M_{кр}}{G \cdot \pi \cdot d^4 \cdot K}, \quad (1.30)$$

где K — коэффициент, учитывающий разницу между средним приращением кручения волокон $\Delta \kappa_1$ и приращением кручения оси проволоки пружины $\Delta \kappa$ при первоначальном сжатии, в связи с разным углом подъёма волокон в разных точках сечения витка ($K = \Delta \kappa_1 / \Delta \kappa$, причём $\Delta \kappa_1$ определяется как для упругого сжатия) [6].

Приращение диаметра пружины определяется с учётом (1.30), мм, [101]

$$\Delta D = \frac{D^2 \sin \alpha}{\cos \alpha} \cdot \left(\Delta \kappa - \frac{32 \cdot M_{кр}}{G \cdot \pi \cdot d^4 \cdot K} \right). \quad (1.31)$$

Изменение высоты пружины, мм, [101]

$$\Delta H = H \cdot \Delta(\sin \alpha). \quad (1.32)$$

Изменение синуса угла наклона витков пружины при осадке [46]

$$\Delta(\sin \alpha) = \frac{D}{2} \cdot \cos \alpha \cdot \left(\Delta \kappa - \frac{\Delta \kappa_2}{K} \right). \quad (1.33)$$

С учётом (1.33) и (1.30) выражение (1.32) примет вид [80]

$$\Delta H = H \cdot \frac{D}{2} \cdot \cos \alpha \cdot \left(\Delta \kappa - \frac{32 \cdot M_{кр}}{G \cdot \pi \cdot d^4 \cdot K} \right). \quad (1.34)$$

Осадка пружины при контактно заневоливании [79] A , %.

$$A = \frac{\Delta H}{H_{\Pi}} \cdot 100, \quad (1.35)$$

где H_{Π} — осевое перемещение концов рабочей части пружины, мм.

На рисунке 1.25 представлена укрупнённая схема алгоритма расчёта геометрических и силовых параметров контактно заневоленной пружины [80] по представленной математической модели. Известный алгоритм не учитывает изменения предела текучести материала пружины в упрочнённой дробемётной обработкой зоне, а это существенно снижает точность определения параметров пружин небольших диаметров сечения проволоки.

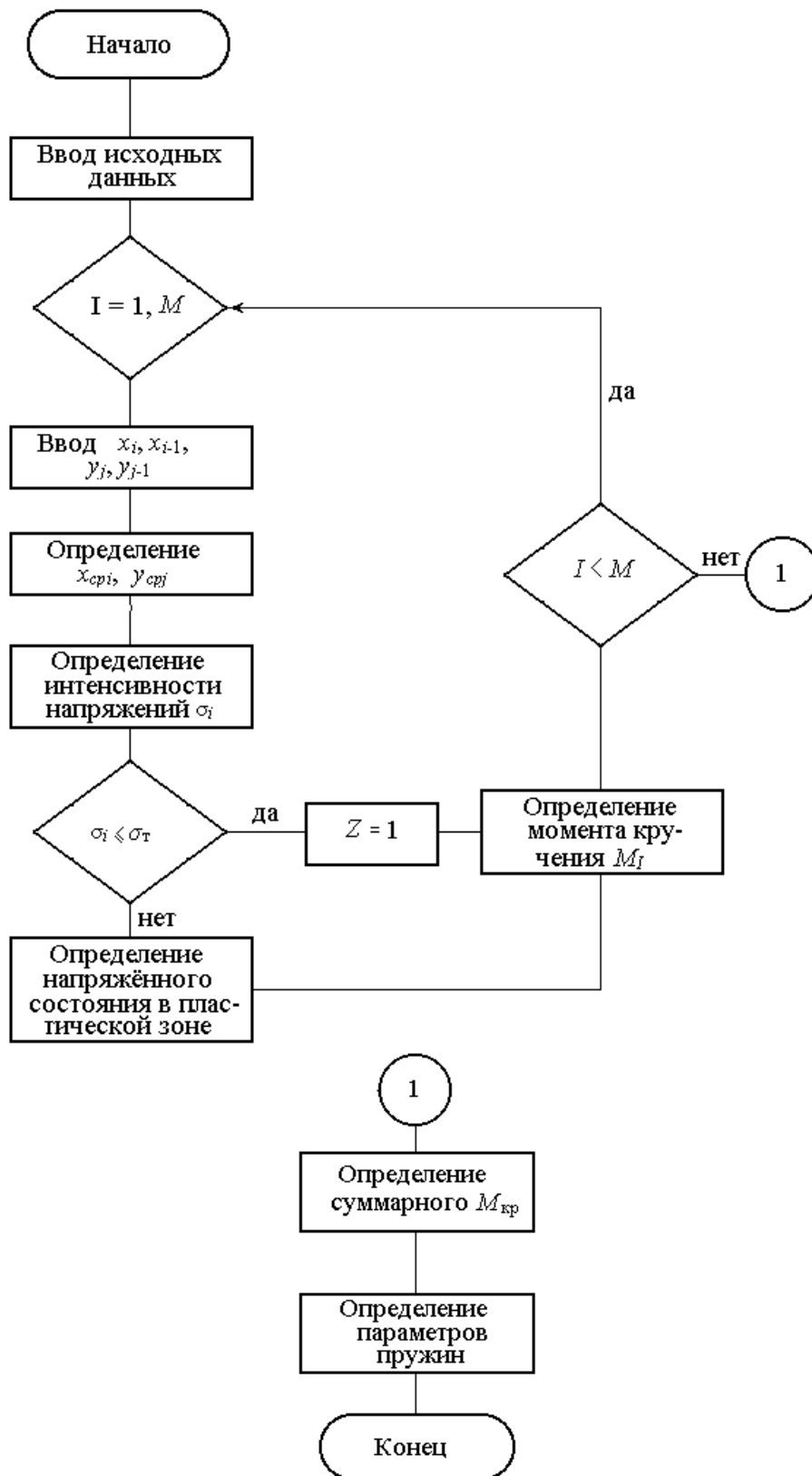


Рисунок 1.25 — Укрупнённая схема алгоритма нахождения параметров контактно заневоленной пружины [80]

Выводы по разделу

1. Представлена классификационная схема процессов пластического упрочнения пружин с учетом контактного заневоливания.

2. Показано, что контактное заневоливание можно рассматривать как метод деформирования с комплексным локальным нагружением очага деформации.

3. Рассмотрены устройства для контактного заневоливания пружин, выявлены их достоинства и недостатки. Сделан вывод о необходимости их совершенствования с целью повышения ресурса упрочняемых пружин.

4. Показано что, качество изготовления пружин может быть повышено посредством применения упрочняющих операций: дробемётной обработки и контактного заневоливания в условиях комплексного локального нагружения. В известных публикациях не рассмотрено теоретического обоснования совместного применения данных упрочняющих операций при изготовлении пружин. Существующая математическая модель контактного заневоливания пружин не учитывает влияния предшествующей дробемётной обработки на упрочняемую зону, что снижает точность определения параметров пружин небольших диаметров сечения проволоки.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРУЖИНЫ ПРИ УПРОЧНЕНИИ

2.1 Совершенствование технологического процесса изготовления винтовых цилиндрических пружин

Технологический процесс изготовления пружин клапана двигателя внутреннего сгорания является наиболее сложным [42, 107]. Особые требования, предъявляемые к таким пружинам, — стойкость к релаксации нагрузки при температуре до 130 °С и неограниченная выносливость при сравнительно высоких напряжениях. Процесс изготовления включает: навивку, термообработку, шлифовку торцов, термоосадку при температуре 400 °С, дробемётный наклеп, отпуск в течение 30 минут при 120 °С, трехкратную осадку, правку пружин и контроль.

Цель термоосадки — увеличить нагрузочную способность [32], релаксационную стойкость и выносливость пружин (циклическую долговечность). Цель отпуска, проводимого после дробемётной обработки, — ускорить старение наклёпанного слоя и повысить предел упругости его материала. При этом остаточные напряжения сжатия, полученные в результате наклёпа, уменьшаются.

Преимущество данной технологии — большая выносливость пружин [63], а недостаток состоит в низкой стабильности упругих свойств во времени при работе в условиях повышенных температур и в отсутствии высокой точности пружин по длине и по нагрузке.

По этому способу образующиеся после термоосадки в пружинных волокнах витков остаточные касательные напряжения, уравновешенные положительными напряжениями в центре сечения, исчезают после следующего за термоосадкой дробемётного наклёпа, и пружина резко изменяет свою длину с увеличением первоначального рассеивания этой длины. Впоследствии после трехкратной холодной осадки до соприкосновения витков и контроля нагрузки это

рассеивание приводит к значительному браку по силовой характеристике пружин. Кроме того, к недостаткам описанной технологии относятся высокая трудоемкость и большие затраты электроэнергии [63].

С целью совершенствования технологии изготовления клапанных пружин для обеспечения энергосбережения и повышения качества в работах Ю. А. Лавриненко и соавторов [63] предложено проводить термоосадку при температуре 200...250 °С. Кроме того, изменяется последовательность технологических операций. Сначала осуществляется дробемётный наклёп, а после — термоосадка [32, 33, 72].

Недостатком способа является то, что трехкратная холодная осадка не всегда гарантирует качество пружин из-за незначительной степени осадки и пропорциональной осадке релаксационной стойкости, занимая определенное время для выполнения трёх нагружений.

Из опыта производства пружин на АО «Белебеевский завод „Автонормаль”» определено, что оптимальной температурой пластического упрочнения пружин является температура 200...250 °С, поскольку при этой температуре двухсторонние напряжения сжатия, созданные ранее дробемётным наклепом на поверхности пружин и препятствующие раскрытию усталостных трещин, не успевают релаксировать [21, 35, 108, 109].

По аналогии с этим температура пластического упрочнения пружин приложением увеличенной осевой нагрузкой $(10...300)F_3$ выбрана такой же.

Предлагаемый способ осуществляют следующим образом [1, 107...110]. 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 наклёп, промывку. От аналогов способ отличается тем, что производят пластическое упрочнение при температуре 200...250 °С сжатием осевой нагрузкой $(10...300) F_3$ и снимают фаски с торцов. Нагрузку можно прикладывать вибрационно. Последние операции — нанесение защитного покрытия, консервация и упаковка.

При пластическом упрочнении у пружин, в том числе нагретых, происходит изменение механических свойств материала и повышаются показатели прочностных свойств. Процесс упрочнения сопровождается структурными изменениями в деформированном слое с соответствующим повышением его твердости и прочности, образованием благоприятных остаточных напряжений сжатия и формированием качественно новой макро- и микрогеометрии поверхности и материала пружин [89].

Предложенный способ [108] является основой для создания ресурсосберегающего технологического процесса изготовления высоконагруженных пружин.

Рассмотрим вариант 1 последовательности выполнения технологических операций.

1. Входной контроль проволоки на соответствие техническим условиям по ТУ 14-4-1380-91. Предел прочности, испытание на навивку, испытание на кручение, вес.

2. Контроль проволоки на дефектоскопе «Ferster».

3. Навивка с отбраковкой дефектных пружин на автомате FS-5 фирмы «Wafios». Пружину навивают с шагом, превышающим шаг готовой пружины.

4. Промывка, сушка перед отпуском.

5. Отпуск при температуре 410 ± 10 °С в течение 30 минут для снятия остаточных напряжений и ускоренного деформационного старения.

6. Люминесцентный контроль.

7. Шлифовка торцов на полуавтомате FS-6 фирмы «Wafios».

8. Дробемётная обработка. Прогиб контрольной пластины 0,203...0,303 мм [32]. Время обработки 10 мин.

9. Разборка сцепленных пружин.

10. Отпуск при температуре 180 °С в течение 25 мин. Цель отпуска, проводимого после дробемётной обработки, — ускорить старение наклёпанного слоя, повысить предел упругости материала этого слоя.

11. Разборка сцепленных пружин.

12. Пластическое упрочнение пружин с использованием устройства для контактного заневоливания пружин при температуре 250 °С сжатием осевой нагрузкой (10...300) F_3 . Время выдержки пружины под нагрузкой при упрочнении 1,5...2 с.

13. Снятие внутренних фасок.

14. Промывка, сушка.

15. Окончательный контроль.

16. Фосфатирование с промасливанием по ТУ 5.00432.

17. Испытания на КРИП (релаксация нагрузки).

18. Усталостные испытания.

От аналога описанная последовательность операций 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 перед пластическим упрочнением. Трёхкратная холодная осадка пружины не требуется.

Рассмотрим вариант 2 последовательности выполнения технологических операций.

1. Входной контроль проволоки на соответствие техническим условиям по ТУ 14-4-1380-91.

2. Контроль проволоки на дефектоскопе «Ferster».

3. Навивка с отбраковкой дефектных пружин на автомате FS-5 фирмы «Wafios». Пружину навивают с шагом, превышающим шаг готовой пружины.

4. Промывка, сушка перед отпуском.

5. Отпуск при температуре 410 ± 10 °С в течение 30 минут для снятия остаточных напряжений и ускоренного деформационного старения.

6. Люминесцентный контроль.

7. Шлифовка торцов на полуавтомате FS-6 фирмы «Wafios».

8. Дробемётная обработка в течение 3 минут для снятия заусенцев после шлифовки.

9. Разборка сцепленных пружин.

10. Пластическое упрочнение пружин с использованием устройства для контактного заневоливания пружин при температуре 380 °С сжатием осевой нагрузкой $(10...300) F_3$. Время выдержки пружины под нагрузкой при упрочнении 1...1,5 с.

11. Дробемётная обработка. Прогиб контрольной пластины 0,203...0,303 мм [32]. Время обработки 10 мин.

12. Разборка сцепленных пружин.

13. Отпуск при температуре 180 °С в течение 25 мин. Цель отпуска, проводимого после дробемётной обработки, — ускорить старение наклёпанного слоя, повысить предел упругости материала этого слоя.

14. Разборка сцепленных пружин.

15. Снятие внутренних фасок.

16. Промывка, сушка.

17. Окончательный контроль.

18. Фосфатирование с промасливанием по ТУ 5.00432.

19. Испытания на КРИП (релаксация нагрузки).

20. Усталостные испытания.

От аналога описанная последовательность операций отличается тем, что термоосадка при температуре 380 °С заменена на пластическое упрочнение при температуре 380 °С сжатием осевой нагрузкой $(10...300) F_3$. Трёхкратная холодная осадка пружины в данном случае не требуется.

При данной последовательности технологических операций возрастает производительность труда, гарантируется увеличение ресурса пружин, повышается точность пружин по длине и нагрузке.

2.2 Выбор пружинной проволоки и её механические характеристики

При изготовлении клапанных пружин автомобильных двигателей применяют пружинную проволоку, прошедшую предварительную обработку с целью повышения прочности [111, 112]. В процессе производственных операций

изготовления пружин механические свойства пружинной проволоки, в частности, предел текучести, меняются. Рассеивание механических свойств пружинной проволоки даже на незначительную величину приводит к изменению геометрических и силовых параметров готовых пружин. Поэтому необходимо учитывать изменение предела текучести пружинной проволоки при различных технологических процессах.

В настоящее время при изготовлении клапанных пружин двигателей автомобилей ВАЗ широко применяют пружинная сталь 70ХГФА-Ш (аналог Oteva 60) [2, 113]. Перспективной пружинной сталью является Oteva 70. Проволока Oteva 70 имеет на 5 % выше сопротивление усталости относительно проволоки Oteva 60 ввиду различий в их химическом составе (таблица 2.1) [32, 111]. Кроме того, экспериментально установлено что пружины, изготовленные из пружинной проволоки Oteva 70, обладают на 5,5 % большей долговечностью относительно пружин, изготовленных из пружинной проволоки Oteva 60 и 70ХГФА-Ш [32].

Таблица 2.1. Химический состав пружинных сталей 70ХГФА-Ш, Oteva 60, Oteva 70

Марка стали	Химический состав, %									
	C	Mn	Si	Cr	V	S	P	Ni	Al	Cu
70ХГФА-Ш	0,65-0,72	0,50-0,80	0,15-0,30	0,30-0,50	0,10-0,20	≤0,015	≤0,015	≤0,15	-	≤0,10
Oteva 60	0,60-0,70	0,50-0,90	0,15-0,30	0,40-0,60	≥0,15	≤0,020	≤0,025	-	-	-
Oteva 70	0,50-0,60	0,50-0,80	1,20-1,60	0,50-0,80	-	≤0,020	≤0,025	-	-	-

Наиболее нагруженными являются внутренние клапанные пружины газораспределительного механизма двигателя автомобиля ВАЗ, имеющие диаметр сечения проволоки $d = 2,7$ мм (рисунок 1.1) [21]. Механические свойства пружинной проволоки для данных пружин приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Механические свойства пружинных сталей 70ХГФА-Ш и Oteva 70

Проволока	Номинальный диаметр сечения проволоки, мм	Предельные отклонения, мм	Предел прочности на растяжение, Н/мм ²	Предел текучести на растяжение, Н/мм ²	Число скручиваний
70ХГФА-Ш	2,70	±0,02	1700–1830	1530–1650	7
Oteva 70	2,51–3,00	±0,02	1910–2010	1719–1809	4

Следует провести теоретические и экспериментальные исследования процессов изготовления пружин из пружинной проволоки Oteva 70, учитывая изменение механических свойств материала при различных технологических операциях.

2.3 Определение параметров пружины при пластическом упрочнении

Для определения технологических параметров необходимо провести исследование НДС пружины при пластическом упрочнении [1].

Технологическими параметрами при пластическом упрочнении пружин являются: нагрузка и температура упрочнения, геометрические параметры пружин до и после упрочнения.

Определим силу сжатия до соприкосновения витков внутренней пружины клапана двигателя автомобиля ВАЗ (рисунок 1.1) F_3 и её геометрические параметры в сжатом состоянии.

Угол подъёма [106] витков рабочей части пружины α_0 , °,

$$\sin \alpha_0 = \frac{t}{\pi \times D}, \quad (2.1)$$

Используя пропорции, показанные на рисунке 1.1, определяем силу сжатия пружины до соприкосновения витков F_3 , Н,

$$F_3 = \frac{F_2 \times (H_0 - H_3)}{H_0 - H_2}, \quad (2.2)$$

Высота сжатой до соприкосновения рабочей части витков [106] пружины, мм,

$$H_3 = d \cdot i_{\text{раб}}, \quad (2.3)$$

Осевое перемещение $H_{\text{п}}$ концов рабочей части пружины, мм,

$$H_{\text{п}} = H_{0\text{раб.}} - H_3, \quad (2.4)$$

Длина развернутой рабочей части пружины L [106], мм,

$$L = \frac{\pi \times D \times i_{\text{раб}}}{\cos \alpha}, \quad (2.5)$$

Угол подъёма пружины α_i , °,

$$\sin \alpha_i = H_i / L, \quad (2.6)$$

Тогда угол подъёма пружины сжатой до соприкосновения витков α_3 , °, [106],

$$\sin \alpha_3 = H_3 / L,$$

Величина среднего диаметра [106] сжатой до соприкосновения пружины $D_{\text{сж сж}}$, мм,

$$D_{\text{сж}} = d / (\pi \times \text{tg} \alpha_3), \quad (2.7)$$

Используя выражения (2.1)...(2.7) определим параметры сжатой пружины (таблица 2.3).

Таблица 2.3. Параметры сжатой пружины по выражения (2.1)...(2.7)

α_0 , °	F_3 , Н	H_3 , мм	$H_{\text{п}}$, мм	L , мм	α_3 , °	$D_{0\text{сж}}$, мм
7°12'	309,83	12,15	23,85	289,27	2°24'	20,51

Окончательный контроль изготовленных пружин проводят по рабочей нагрузке F_2 , поэтому свободная высота H_0 может варьироваться в зависимости от геометрических параметров и материала пружины.

Определим требуемую свободную высоту H_0 изготовленной пружины, используя формулу (2.8) инженера Сажина [114]

$$H_0 - H_i = \frac{64 \cdot F_i \cdot R^3 \cdot i_{\text{раб}}}{G \times d^4 \cdot \cos^3 \alpha}, \quad (2.8)$$

Тогда свободная высота

$$H_0 = \frac{64 \cdot F_2 \cdot R^3 \cdot i_{\text{раб}}}{G \cdot d^4 \cdot \cos^3 \alpha} + H_2,$$

где R — средний радиус пружины, мм.

Для изготовленной из проволоки диаметром 2,7 мм Oteva 70 Стандарт «Garphyttan» (модуль упругости второго рода $G = 7,95 \cdot 10^4$ МПа) внутренней пружины клапана при $F_2 = 275,4$ Н из уравнения (2.8) следует, что $H_0 = 40,1$ мм, тогда с учетом высоты опорных витков свободная высота рабочей части пружины $H_{0\text{раб}} = 36,9$ мм.

Исходя из данных таблицы 2.2 примем предел текучести пружинной проволоки Oteva 70 равным 1764 МПа. С учётом влияния остаточных напряжений после навивки напряжения [32], при которых появится остаточная деформация пружины, $\sigma_m = 0,954 \cdot 1764 = 1683$ МПа. Это напряжение следует учитывать как предел текучести материала пружины при исследованиях.

По данным АО «БелЗАН», параметры внутренней пружины клапана после шлифовки торцов: средний диаметр пружины $D = 20,265$ мм; высота в свободном состоянии $H_0 = 43,2$ мм; высота опорных (нерабочих) витков 3,2 мм; высота рабочей части пружины в свободном состоянии $H_{0\text{раб}} = 40,0$ мм; полное число витков $i = 6,5$; рабочее число витков $i_{\text{раб}} = 4,5$; диаметр поперечного сечения витка (проволоки) пружины $d = 2,7$ мм; материал пружины — проволока 2,7 — Oteva 70 Стандарт «Garphyttan»; направление навивки левое; шаг рабочих витков пружины $t = 8$ мм; предел текучести материала $\sigma_m = 1683$ МПа; модуль упругости первого рода $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$; модуль упругости второго рода $G = 7,95 \cdot 10^4$ МПа.

Силовые и геометрические параметры пружин при пластическом упрочнении зависят от площади оставшейся работоспособной части $S_{\text{упр}}$ — упругого ядра (рисунок 2.1) [115].

При теоретических исследованиях половина сечения витка пружины разделена на 49 элементов М1...М49 (рисунок 2.2, таблицы 2.4, 2.5) [111].

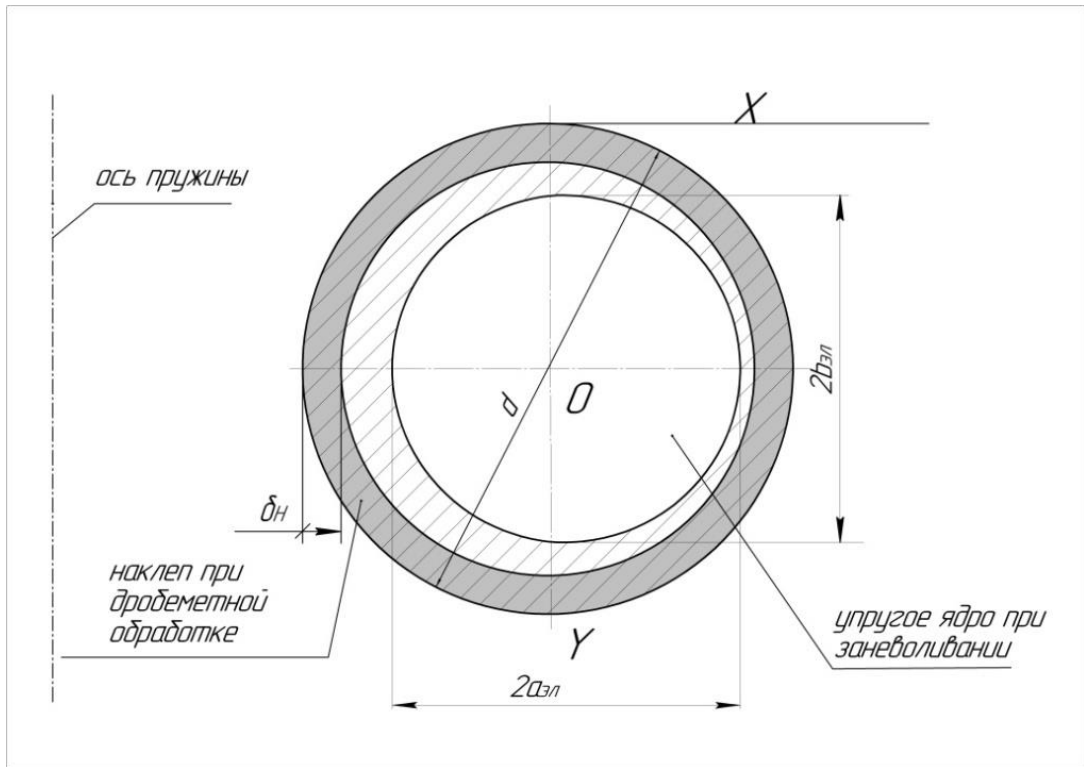


Рисунок 2.1 — Сечение витка пружины при дробемётной обработке и при заливании: δ_H — глубина наклепа при дробемётной обработке; $a_{эл}$, $b_{эл}$ — длина соответственно большей и меньшей полуоси эллипса [115]

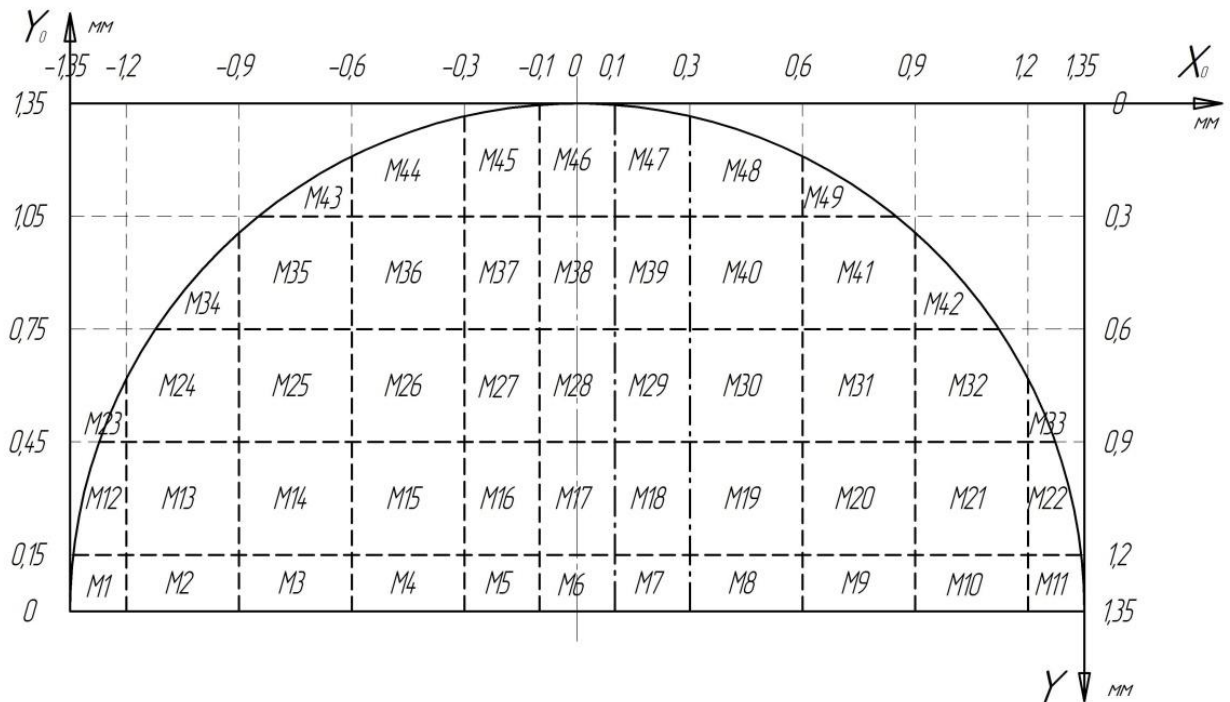


Рисунок 2.2 — Сетка точек половины сечения витка пружины M1...M49 [111]

Таблица 2.4. Деление сечения витка пружины на элементы

x, мм y, мм	-1,35	-1,2	-0,9	-0,6	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,6	0,9	1,2	1,35
0												
0,3			M43	M44	M45	M46	M47	M48	M49			
0,6		M34	M35	M36	M37	M38	M39	M40	M41	M42		
0,9		M24	M25	M26	M27	M28	M29	M30	M31	M32		
1,2		M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21		
1,35	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	

Таблица 2.5. Деление периферии сечения витка пружины на элементы

x, мм y, мм	-1,35	-1,342	-1,273	-1,122	-0,849	0	0,849	1,122	1,273	1,342	1,35
0											
0,3					M43		M49				
0,6				M34				M42			
0,9			M23						M33		
1,2		M12								M22	
1,35	M1										M11

С использованием алгоритма расчета геометрических и силовых параметров контактно заневоленной пружины [6, 80] по выражениям (1.1)...(1.35) проведено исследование зависимости свободной высоты рабочей части пружины от нагрузки контактного заневоливания, а также площади упругого ядра (оставшейся работоспособной части) $S_{упр}$ и величины упругого ядра d_0 сечения проволоки пружины при упрочнении контактным заневоливанием при температуре 250 °С без учёта дробемётной обработки (таблица 2.6). Сечение витка пружины для частного случая при нагрузке контактного заневоливания $380F_3$ без учёта дробемётной обработки показано на рисунке 2.10 (а).

Таблица 2.6. Зависимость свободной высоты рабочей части пружины, диаметра и площади упругого ядра от нагрузки контактного заневоливания при температуре упрочнения 250 °С

Параметры пружины	Нагрузка контактного заневоливания, Н						
	0	$20F_3$	$80F_3$	$140F_3$	$220F_3$	$300F_3$	$380F_3$
$H_{раб.}$, мм	37,641	37,621	37,512	37,326	36,947	36,372	35,828
d_0 , мм	2,4318	2,3724	2,1171	1,8968	1,6326	1,3854	1,1466
$S_{упр}$, мм ²	4,712	4,688	4,617	4,511	4,299	4,087	3,907

По данным таблицы 2.6 построен график зависимости высоты рабочей части пружины от нагрузки контактного заневоливания (рисунок 2.6). Наибольшая величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9983$ соответствует уравнению полиномиальной регрессионной линии

$$H_{\text{раб}} = -0,00001 \cdot Q^2 - 0,0011 \cdot Q + 37,651. \quad (2.9)$$

По данным таблицы 2.6 построен график зависимости диаметра упругого ядра от нагрузки контактного заневоливания (рисунок 2.7). Наибольшая величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9997$ соответствует уравнению полиномиальной регрессионной линии

$$d_{\text{ядр}} = 0,000002 \cdot Q^2 - 0,0041 \cdot Q + 2,4387. \quad (2.10)$$

По данным таблицы 2.6 построен график зависимости площади упругого ядра от нагрузки контактного заневоливания (рисунок 2.8). Наибольшая величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9958$ соответствует уравнению полиномиальной регрессионной линии

$$S_{\text{ядр}} = -0,000002 \cdot Q^2 - 0,0014 \cdot Q + 4,7234. \quad (2.11)$$

2.4 Исследование влияния дробемётной обработки на параметры пружин при изготовлении

Основным эффектом дробемётной обработки является повышение механических свойств материала пружин и создание в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений, глубина которых зависит от механических характеристик обрабатываемой стали, скорости дробемёта, радиуса и массы дроби, времени обработки [2, 32, 46, 115]. Интенсивность этих напряжений наиболее велика в приповерхностных слоях. Предел текучести материала пружин возрастает, повышается его твердость, уменьшается склонность к релаксации нагрузки, повышается несущая способность пружин [116]. Незначительные неровности ячеистого вида, возникшие в результате наклёпа (рисунок 2.3) не

вливают негативно на ресурс пружин [48]. Поэтому эта операция полезна при изготовлении пружин.

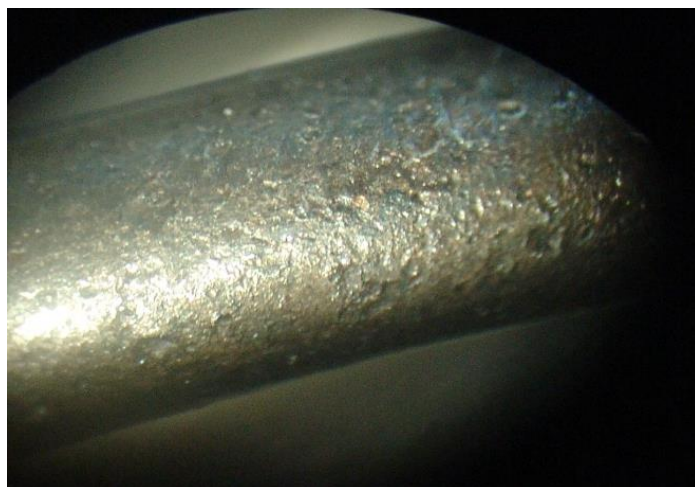


Рисунок 2.3 — Следы дробемётного наклёпа на поверхности пружины клапана (увеличение в 10 раз) [115]

Необходимо установить влияние дробемётной обработки, а также последующего контактного заневоливания на параметры пружин. Параметры пружин зависят от размеров упругой части, оставшейся после упрочнения. Теоретическое определение глубины упрочнения и осадки пружин при дробемётной обработке в зависимости от физико-механических свойств материала является сложной задачей, решаемой при множестве допущений и упрощений [115]. В работе [72] показано, что внутренние волокна пружин наклёпываются так же, как и наружные — до насыщения, следовательно, глубина упрочнения будет одинакова по сечению витка пружины.

Исследованию упругопластических явлений при внедрении шара в упругопластическую среду посвящены работы [117...121]. Из наблюдений, изложенных в указанных работах, следует, что смещения под поверхностью примерно радиальны по отношению к точке начального контакта, а поверхности равных деформаций имеют примерно полусферическую форму [36].

Обработка дробью вызывает значительную осадку и изменение упругих характеристик пружин [48], поэтому актуальной является задача определения

осадки пружины при дробемётной обработке [115].

Известен метод расчета кинетики НДС при дробемётной обработке [28, 32]. Для расчета требуется поле внедренной пластической деформации от дробемёта, которое определяют при травлении образца-свидетеля — тонкой контрольной пластинки, помещаемой в дробемётную камеру вместе с партией пружин [28, 32]. Способ требует предварительных экспериментальных исследований и измерений, что не всегда возможно на стадии теоретических разработок.

При дробемётной обработке пружины в свободном состоянии (не сжатом) внутренние и наружные волокна наклёпываются до насыщения, поэтому упругое ядро пружины в сечении представляет собой окружность диаметром $d_{упр} = d - 2\delta_H$. При заневоливании упругое ядро представляет собой эллипс [106], центр которого смещен от центра сечения к наружному волокну витка пружины (рисунок 2.1). На границе упругого ядра в обоих случаях эквивалентное напряжение σ_i равно пределу текучести материала пружины.

При контактном заневоливании пружины в соответствии с теорией малых упругопластических деформаций σ_i , МПа, [117]

$$\sigma_i^2 = \sigma_y^2 + 3 \cdot \tau_{кр}^2 \leq \sigma_m^2. \quad (2.12)$$

Используя выражения (1.1)...(1.35), в программе MathCAD проведено исследование изменения геометрических параметров пружины 2101-1007021 после шлифовки (п. 2.1, вариант 1 последовательности выполнения технологических операций, перед дробемётной обработкой, $H_0 = 43,2$ мм) при сжатии до высоты 12,15...17 мм и заневоливании, определена площадь упругого ядра сечения проволоки пружины. Например, установлено, что при сжатии пружины до соприкосновения витков (высота рабочей части пружины 12,15 мм) упругое ядро представляет собой эллипс (рисунок 2.1). Площадь эллипса 3,301 мм², высота рабочей части пружины после снятия нагрузки 37,641 мм. Результаты теоретических исследований по определению площади упругой части сечения и высоты рабочей части упрочненной пружины в зависимости от высоты её рабочей части при заневоливании представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7. Зависимость параметров упрочненной пружины от высоты её рабочей части при заневоливании

№ п.п.	Высота рабочей части сжатой пружины при заневоливании, мм	Площадь упругого ядра сечения витка, мм ²	Высота рабочей части упрочненной пружины, мм
1	12,15	3,301	37,641
2	15,00	4,049	38,707
3	15,34	4,152	38,816
4	16,00	4,368	39,023
5	17,00	4,697	39,319

По данным таблицы 2.7 построен график зависимости высоты рабочей части упрочненной пружины от площади упругого ядра сечения её витка (рисунок 2.4).

Наибольшая величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9998$ соответствует уравнению полиномиальной регрессионной линии

$$H_{раб} = -0,3309 \cdot S_{упр}^2 + 3,844 \cdot S_{упр} + 28,559. \quad (2.13)$$

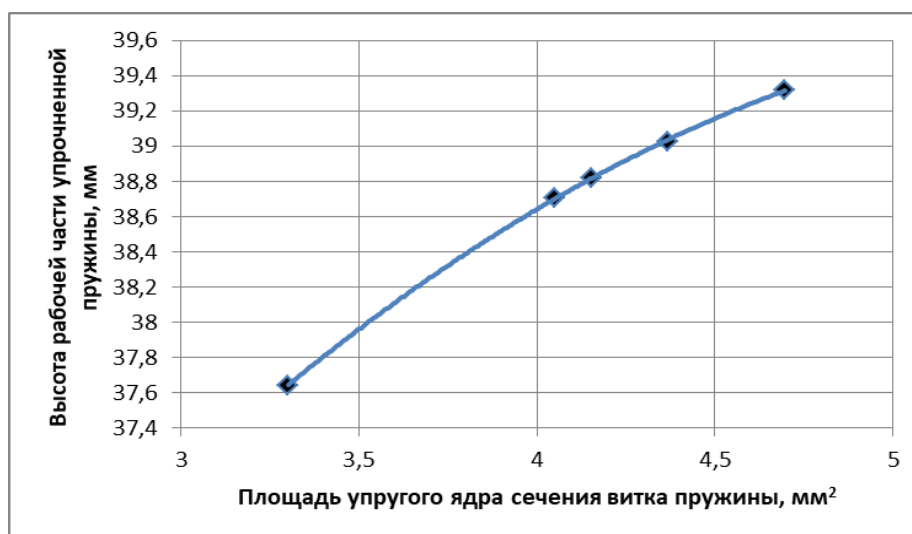


Рисунок 2.4 — График зависимости высоты рабочей части упрочненной пружины от площади упругого ядра сечения её витка

При условии, что $\delta_H = 0,2$ мм [2, 32], площадь упругого ядра внутренней пружины клапана при дробемётной обработке (рисунок 2.1) составляет 4,1548 мм². Такая же площадь упругого ядра из уравнения (2.13) соответствует высоте рабочей части пружины после упрочнения 38,818 мм. Значит, осадка пружины

при дробемётной обработке составит 2,95 %.

Последующий после дробемётной обработки отпуск при температуре 180 °С (≤ 240 °С) не приводит к существенному изменению остаточных напряжений ни по их величине, ни по глубине их распространения [32]. Следует учесть увеличение предела текучести материала пружины в пластической зоне после дробемётной обработки (рисунок 2.1).

Истинные напряжения при дробемётной обработке в наиболее напряженной точке поперечного сечения проволоки достигают значительной величины, поэтому за схему диаграммы упрочнения пружинной проволоки можно принять ломанную линию, состоящую из двух прямых, уклоны которых определяются модулем упругости E и модулем упрочнения Π [42, 115] (рисунок 2.5). Модуль упрочнения мал, а деформации упрочняемого материала значительные, поэтому можно определять предел текучести упрочненного материала пружины при дробемётной обработке на основании испытания растяжением по формуле $\sigma_m = \sigma_\sigma$, где σ_σ — предел прочности на разрыв пружинной проволоки. При расчетах НДС пружины при контактном заневоливании следует для упрочненной после дробемётной обработки зоны (рисунок 2.1) принимать $\sigma_m = \sigma_\sigma$ [42, 111, 115].

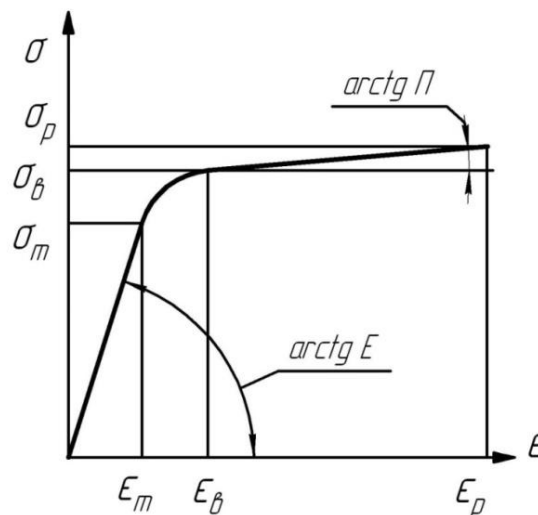


Рисунок 2.5 — Диаграмма упрочнения пружинной проволоки: ε_m , ε_σ , ε_p — относительная деформация при напряжениях, соответствующих пределу текучести σ_m , пределу прочности на разрыв σ_σ и напряжению при разрушении образца σ_p [115]

Таким образом, дробемётная обработка неупрочнённой пружины приведёт:

1) к изменению исходных перед контактным заневоливанием геометрических параметров, в частности к уменьшению высоты рабочей части пружины в свободном состоянии (из (2.13) $H_{0раб} = 38,818$ мм — с учётом влияния дробемётной обработки вместо $H_{0раб} = 40,0$ мм — без учёта влияния дробемётной обработки);

2) увеличению предела текучести материала пружины в сечении витка на глубине $\delta_H = 0,2$ мм ($\sigma_m = 2000$ МПа, вместо $\sigma_m = 1683$ МПа).

Это необходимо учитывать при исследовании зависимостей геометрических параметров пружины от нагрузки контактного заневоливания, что не сделано в работах [6, 80].

Параметры пружины с учётом осадки пружины после дробемётной обработки (2.13) перед контактным заневоливанием: $D = 20,277$ мм; $H_0 = 42,018$ мм; $H_{0раб} = 38,818$ мм; $i = 6,5$; $i_{раб} = 4,5$; $d = 2,7$ мм; материал пружины — проволока 2,7 — Oteva 70 Стандарт «Garphyttan»; $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$; $G = 7,95 \cdot 10^4$ МПа. Предел текучести материала пружины в упругой зоне после дробемётной обработки 1683 МПа, в пластической — 2000 МПа [2, 42, 111].

Используя алгоритм расчета геометрических и силовых параметров контактно заневоленной пружины [6, 80] по выражениям (1.1)...(1.35), проведено исследование зависимости свободной высоты рабочей части пружины от нагрузки контактного заневоливания, а также установлены площадь оставшейся работоспособной части $S_{упр}$ и величина упругого ядра d_0 сечения проволоки пружины при упрочнении контактным заневоливанием при температуре 250 °С с учётом влияния дробемётной обработки (таблица 2.8). Сечение витка пружины для частного случая при нагрузке контактного заневоливания $380F_3$ с учётом дробемётной обработки показано на рисунке 2.10 (б).

Таблица 2.8. Зависимость свободной высоты рабочей части пружины, диаметра и площади упругого ядра от нагрузки контактного заневоливания при температуре упрочнения 250 °С с учётом влияния дробемётной обработки

Параметры пружины	Нагрузка контактного заневоливания, Н						
	0	$20F_3$	$80F_3$	$140F_3$	$220F_3$	$300F_3$	$380F_3$
$H_{раб.}$, мм	36,902	36,901	36,900	36,896	36,828	36,377	35,967
d_0 , мм	2,3000	2,3000	2,1171	1,8968	1,6326	1,3854	1,1466
$S_{упр.}$, мм ²	4,051	4,051	4,016	3,940	3,738	3,652	3,530

По данным таблицы 2.8 построен график зависимости высоты рабочей части пружины от нагрузки контактного заневоливания с учётом влияния дробемётной обработки (рисунок 2.6). Наибольшая величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9834$ соответствует уравнению полиномиальной регрессионной линии

$$H_{раб} = -0,00001 \cdot Q^2 + 0,0019 \cdot Q + 36,872. \quad (2.14)$$

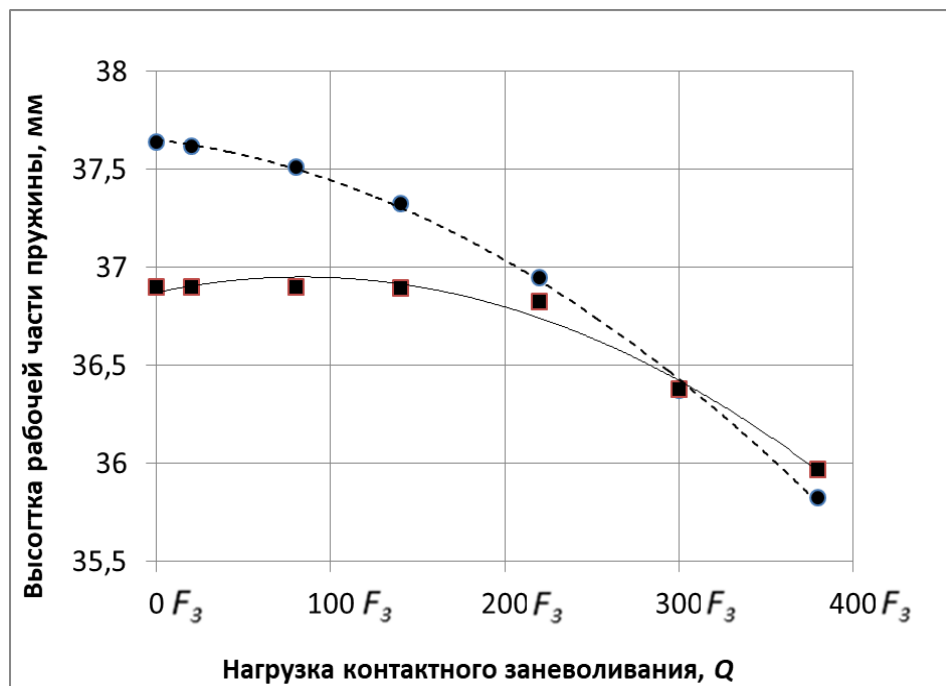


Рисунок 2.6 — Зависимость высоты рабочей части пружины от нагрузки контактного заневоливания:

———— с учётом влияния дробемётной обработки ($H_{0раб} = 38,818$ мм),

— — — без учёта влияния дробемётной обработки ($H_{0раб} = 40,0$ мм)

По данным таблицы 2.8 построен график зависимости диаметра упругого ядра от нагрузки контактного заневоливания с учётом влияния дробемётной обработки (рисунок 2.7).

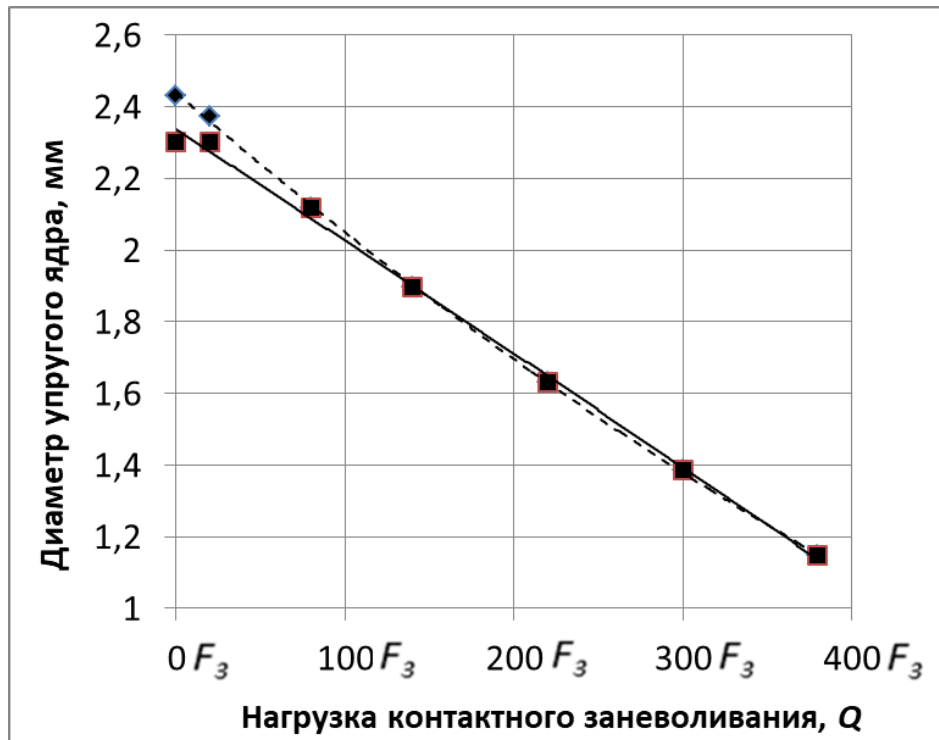


Рисунок 2.7 — Зависимость диаметра упругого ядра пружины от нагрузки контактного заневоливания:

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

Наибольшая величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9974$ соответствует уравнению полиномиальной регрессионной линии

$$d_{\text{упр}} = -0,0000002 \cdot Q^2 - 0,0031 \cdot Q + 2,3363. \quad (2.15)$$

По данным таблицы 2.8 построен график зависимости площади упругого ядра от нагрузки контактного заневоливания с учётом влияния дробемётной обработки (рисунок 2.8). Наибольшая величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9788$ соответствует уравнению полиномиальной регрессионной линии

$$S_{\text{упр}} = -0,000001 \cdot Q^2 - 0,0011 \cdot Q + 4,0745. \quad (2.16)$$

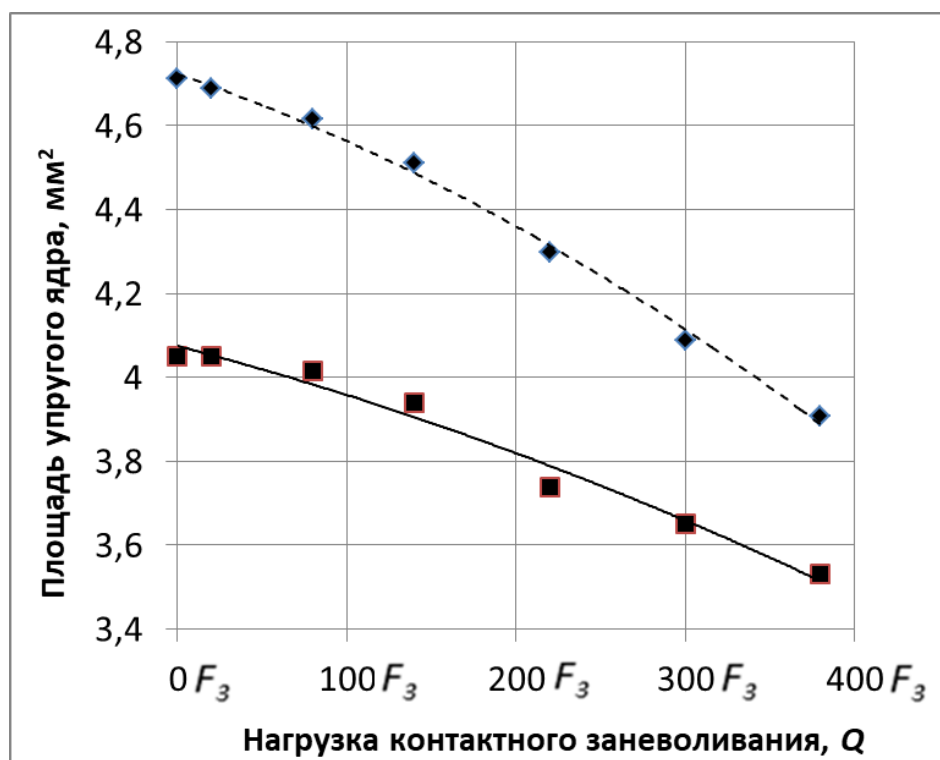


Рисунок 2.8 — Зависимость площади упругого ядра пружины от нагрузки контактного заневоливания:

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

Установлена зависимость (рисунок 2.9) высоты рабочей части заневоленной пружины с учётом влияния дробемётной обработки от высоты рабочей части заневоленной пружины без учёта влияния дробемётной обработки (связывающая уравнения 2.9, 2.14).

Определено уравнение (2.17), описывающее полученную зависимость

$$y = -0,3026 \cdot x^2 + 22,766 \cdot x - 391,27, \quad (2.17)$$

$$R^2 = 0,9902,$$

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

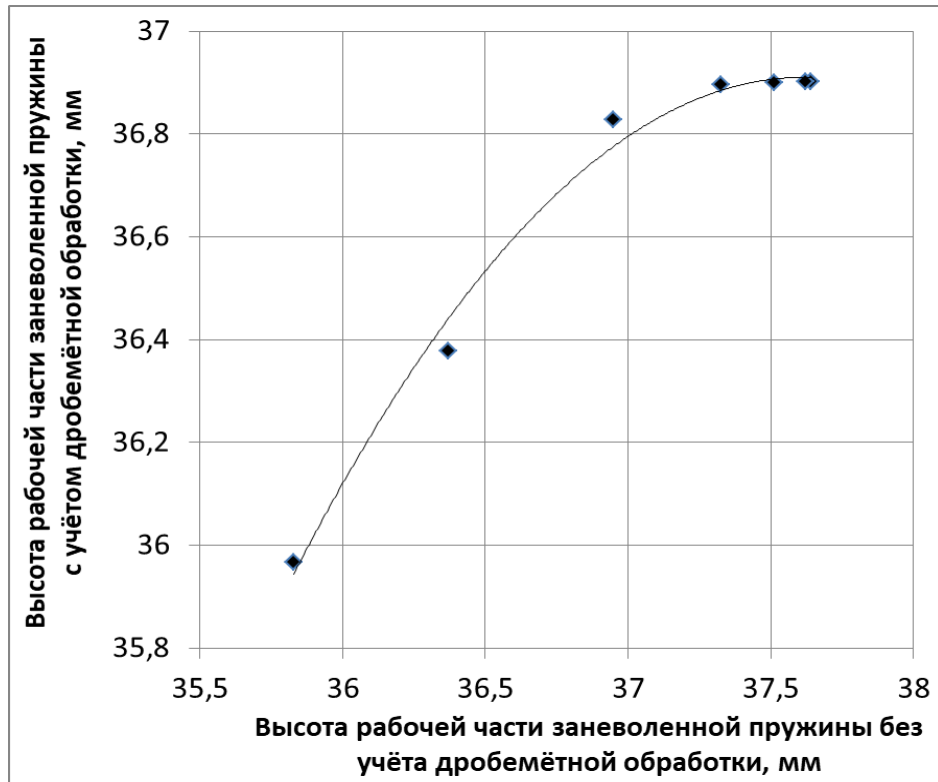


Рисунок 2.9 — Зависимость высоты рабочей части заневоленной пружины с учётом влияния дробемётной обработки от высоты рабочей части заневоленной пружины без учёта влияния дробемётной обработки

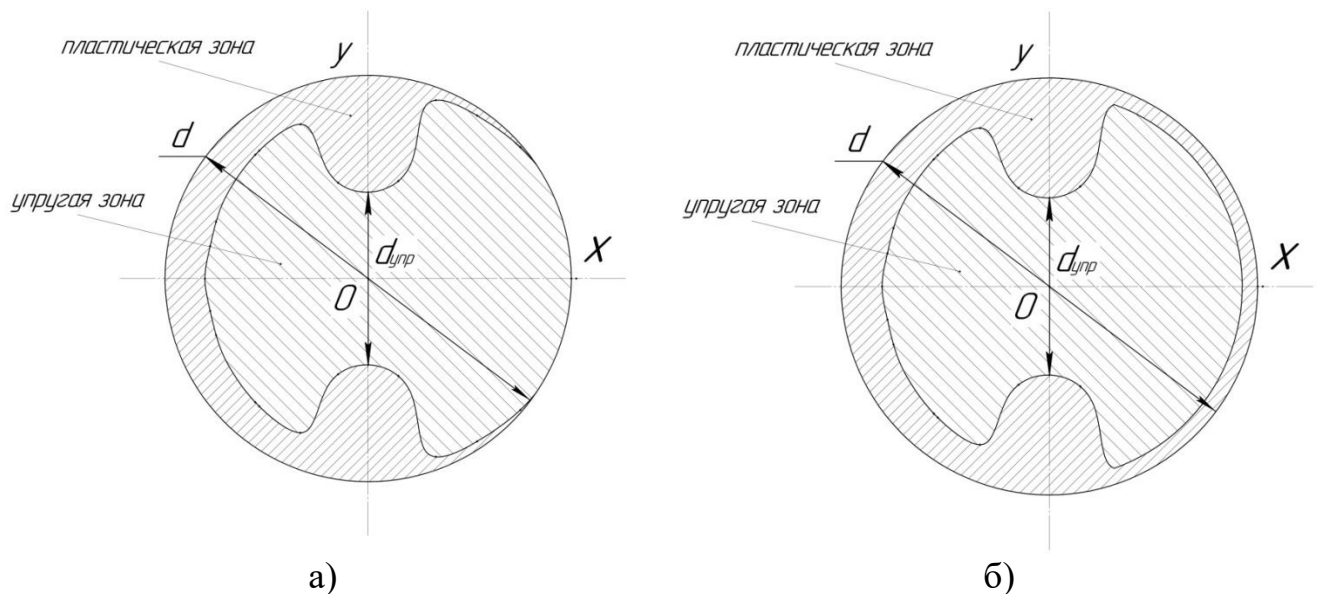


Рисунок 2.10 — Сечение витка пружины при нагрузке контактного заневоливания $380F_3$: а) без учёта дробемётной обработки б) с учётом дробемётной обработки

Свободная высота рабочей части пружины после пластического упрочнения должна составлять $H_{0раб} = 36,9$ мм. Из уравнения (2.15) следует, что нагрузка контактного заневоливания пружины, предварительно прошедшей дробемётную обработку, должна составлять $Q = 16,1 F_3 = 4988$ Н.

Согласно уравнению (2.16) при нагрузке $Q = 16,1 F_3$ диаметр упругого ядра $d_0 = 2,286$ мм, что не выходит за пределы рекомендованного значения $d_0 \geq 0,5d$ [90].

Выводы по разделу

1. Предложен новый способ изготовления высоконагруженных пружин сжатия, на основе которого создан ресурсосберегающий технологический процесс изготовления высоконагруженных пружин.

2. Обоснован выбор пружинной проволоки Oteva 70 для исследований процессов упрочнения внутренних клапанных пружин газораспределительного механизма двигателя автомобиля ВАЗ как наиболее нагруженных.

3. Теоретически установлено, что в результате дробемётной обработки неупрочнённой пружины происходит изменение геометрических параметров, в частности, уменьшается свободная высота рабочей части пружины за счёт уменьшения площади упругого ядра в сечении её витка.

4. 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 упрочненной зоне.

5. Установлены зависимости высоты рабочей части, диаметра упругого ядра и площади упругого ядра пружины от нагрузки контактного заневоливания: без учёта и с учётом влияния предшествующей контактного заневоливания дробемётной обработки. Зависимости позволяют определить требуемую нагрузку контактного заневоливания.

6. Установлена зависимость, позволяющая теоретически определить 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.

3 РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРУЖИН

3.1 Проектирование устройства для упрочнения пружин

С целью устранения указанного в главе 1 (п. 1.5) недостатка устройства [100] предложено устройство [122] (рисунок 3.1), состоящее из пуансона 1 и стакана 2, в котором размещены упрочняемая пружина 3, верхний вкладыш 5 и нижний вкладыш 6. Торцы сжатой пружины контактируют с соответствующими поверхностями и упорами 4 на торцах вкладышей 5 и 6, а витки контактируют с внутренней поверхностью стакана 2.

Пластическое упрочнение пружины в указанном устройстве следует производить при температуре 200...250 °С сжатием осевой нагрузкой (10...300) F_3 [108].

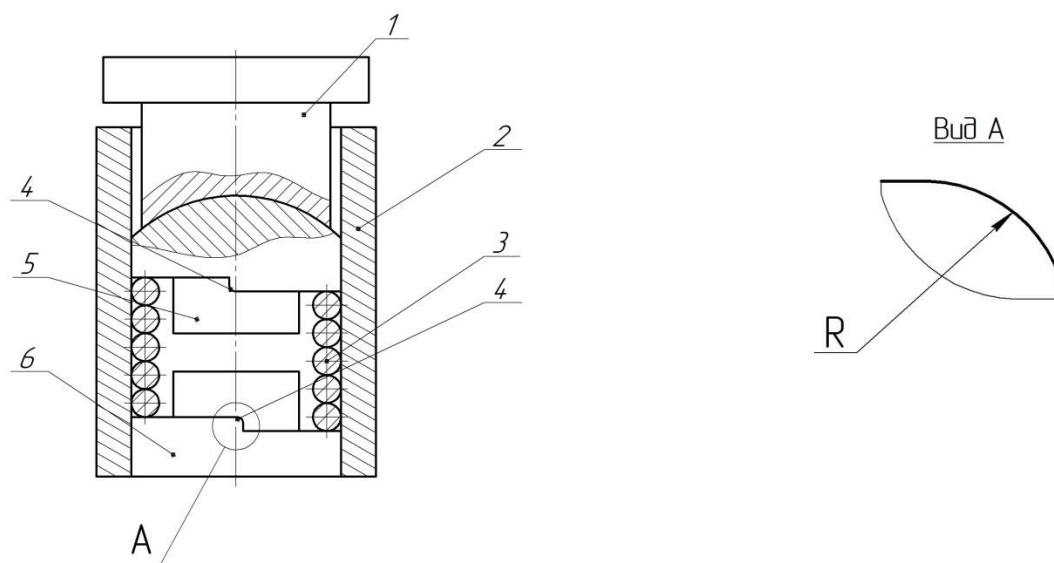


Рисунок 3.1 — Устройство для заневоливания пружин по пат. RU 2457917 [122]

Преимущество устройства [122] относительно описанных в главе 1 (п. 1.5) заключается в том, что скругленный край упора вкладыша (рисунок 3.1, вид А) не оставляет вмятин на первых рабочих витках пружины при пластическом упрочнении. Это исключает поломку первых витков пружин при эксплуатации и увеличивает их ресурс.

Перед заневоливанием должно быть осуществлено базирование и закрепление пружины. Правильно выбранная схема базирования должна обеспечить: требуемое положение пружины при испытании, жесткое и надежное закрепление с учетом воздействия на неё силы заневоливания, свободный доступ упрочняющего инструмента.

Для обеспечения неподвижности пружины достаточно наложить на нее пять двухсторонних геометрических связей: 1, 2, 3 — установочная база, 4, 5 — направляющая база. Для предотвращения смещения витков следует наложить дополнительные направляющие связи — 6, 7, 8 (рисунок 3.2).

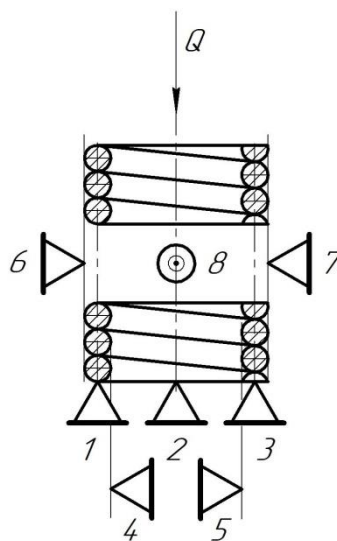


Рисунок 3.2 — Схема базирования пружины при заневоливании

Основные детали устройств для контактного заневоливания пружин показаны на рисунке 3.3. Устройства для заневоливания [79] должны обеспечивать правильную геометрическую форму пружины при приложении нагрузок контактного заневоливания. Поэтому необходимо, чтобы:

- нагрузка равномерно распределялась по окружности пружины;
- витки пружины опирались на внутренний диаметр ограничительной втулки устройства для заневоливания;
- торцы пружины всей своей поверхностью соприкасались с поверхностями вкладышей, а торцы витков пружины упирались в упоры (при их наличии) вкладышей ограничительной втулки.

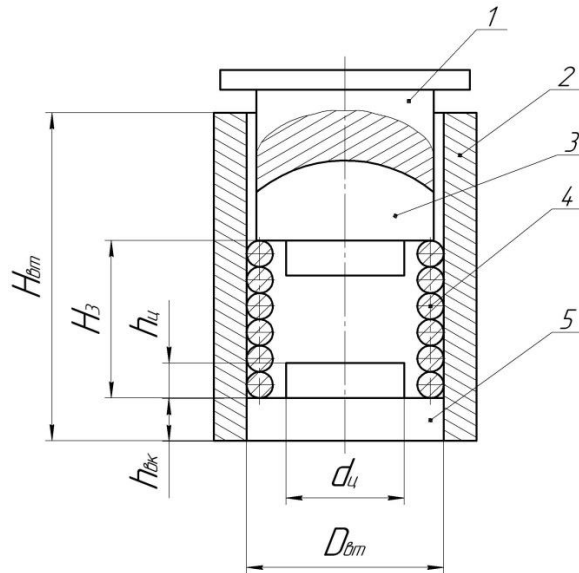


Рисунок 3.3 — Основные детали и технологические размеры устройств для контактного заневоливания: 1 — пуансон; 2 — обойма (ограничительная втулка); 3 — вкладыш верхний; 4 — пружина; 5 — вкладыш нижний; $H_{\text{вт}}$ — высота ограничительной втулки; H_3 — высота сжатой до соприкосновения витков пружины; $h_{\text{ц}}$ — минимальная высота цилиндрической поверхности вкладыша; $h_{\text{вк}}$ — высота опорной поверхности вкладыша; $D_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр ограничительной втулки; $d_{\text{ц}}$ — диаметр цилиндрической поверхности вкладышей

Для выполнения этих условий необходимо и достаточно, чтобы:

— поверхность верхнего вкладыша, воспринимающего нагрузку прессы, была шаровой, а поверхность нижнего вкладыша — плоской;

— внутренний диаметр ограничительной втулки был равен наружному диаметру сжатой до соприкосновения витков пружины, а высота втулки незначительно превышала высоту сжатой до соприкосновения витков пружины и высоту вкладышей;

— поверхности вкладышей, контактирующие с торцами пружины, повторяли поверхность торца пружины, то есть имели плоскую поверхность или винтовую поверхность и упор или их сочетание (упор не должен перерезать витки пружины);

— диаметры вкладышей были равны внутреннему диаметру

ограничительной втулки;

— вкладыши имели цилиндрические поверхности, контактирующие с внутренним диаметром пружины, с высотой не менее диаметра проволоки пружины.

На рисунке 3.4 представлена схема устройства, состоящего [123] из установленного на плите 5 стакана 4, в котором размещены испытуемая пружина, верхний вкладыш 2, связанный с пуансоном 1 ступенчатым винтом 8, и нижний вкладыш 3, связанный штоком 6 с нижним цилиндром пресса.

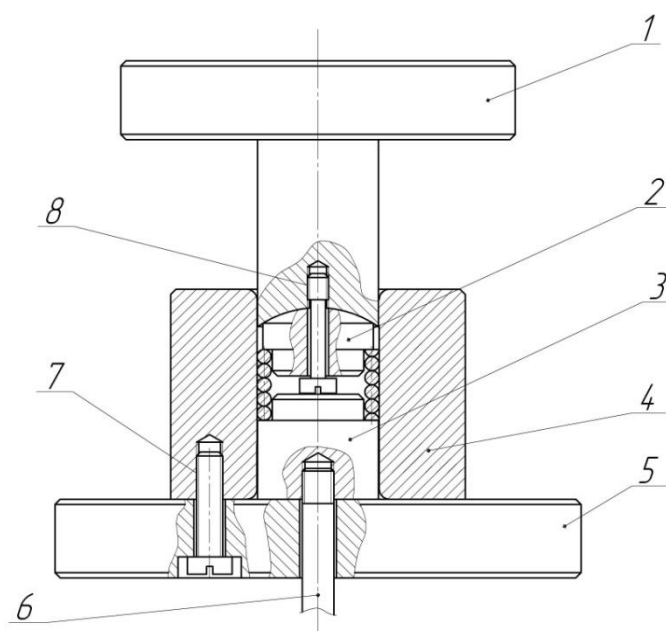


Рисунок 3.4 — Схема устройства для упрочнения внутренней пружины клапана двигателя автомобилей семейства ВАЗ по пат. RU 2481914 [123]

При этом торцы сжатой пружины контактируют с кольцевыми проточками или упорами на торцах вкладышей 2 и 3, упираясь торцами витков в них, а витки контактируют с внутренней поверхностью стакана 4.

Работает устройство [123] следующим образом. Устройство устанавливают на неподвижный стол пресса, а пуансон 1 закрепляют к верхней подвижной плите пресса. В стакан 4 вставляют испытуемую пружину таким образом, чтобы торцы пружины контактировали с кольцевыми проточками или упорами торцов вкладышей 2 и 3. Затем пуансон 1 посредством движения пресса 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 и контакту витков пружины с внутренней поверхностью стакана сжатая пружина займёт 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.

Преимущество предложенного устройства заключается в осуществлении механизации процесса удаления заневоленной пружины из устройства, что ликвидирует ручной труд и повышает производительность труда.

Определим основные параметры устройства по известной методике [79].

Исходные данные: наружный диаметр пружины клапана внутренней двигателя автомобиля ВАЗ (рисунок 1.1) $D_1 = 23$ мм; шаг витков $t = 8$ мм; высота сжатой пружины $H_3 = 17,6$ мм; внутренний диаметр пружины $D_2 = 17,6$ мм; диаметр проволоки $d = 2,7$ мм; количество рабочих витков $i_{раб} = 4,5$; сила сжатия до соприкосновения витков $F_3 = 309,83$ Н.

Внутренний диаметр втулки устройства (рисунок 3.3), D_{BT} , мм, определяем из расчёта, что развёртка внутреннего диаметра ограничительной втулки равна развёртке витка пружины по наружному диаметру

$$D_{BT} = \frac{\sqrt{(\pi \times D_1)^2 + t^2}}{\pi}, \quad (3.1)$$

D_{BT} принимаем 23,2 мм.

Наружный диаметр втулки назначаем конструктивно — 56 мм, высоту H_{BT} , мм, — не менее

$$h_{ц} = 2 \times d, \quad (3.4)$$

$h_{ц}$ принимаем 5 мм.

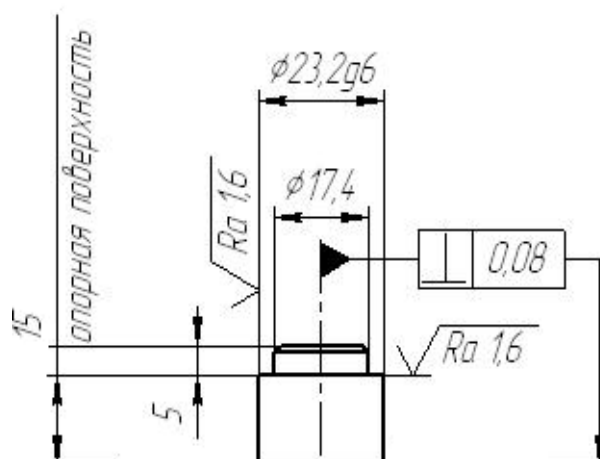


Рисунок 3.6 — Вкладыш нижний

Радиус сферы верхнего вкладыша подбирается конструктивно. Можно принять его равным диаметру сферической рабочей части вкладыша.

Высота рабочей части пуансона $H_{п} = 45$ мм выбрана с учетом необходимости его крепления прихватами к ползуну прессы.

Диаметр рабочей части пуансона $D_{п}$, мм, можно принять немного меньше внутреннего диаметра втулки — 23 мм.

При выборе материалов для деталей устройства, а также размеров плиты пуансона и нижней плиты использованы рекомендации литературы [124].

3.2 Изготовление и испытание экспериментального образца устройства для упрочнения пружин

Наиболее приемлемой для массового производства является конструкция по патентам RU 2457917 и RU 2481914 [122, 123], на основе которой разработано и изготовлено простое в эксплуатации устройство для упрочнения внутренней пружины клапана двигателя автомобилей семейства ВАЗ (рисунки 3.4, 3.7).



Рисунок 3.7 — Устройство для заневоливания внутренней пружины клапана двигателя автомобилей семейства ВАЗ [88]

Известно, что [79] заневоливание является операцией как упрочнения, так и контроля качества изготовления пружин. Пружины, работающие с большими скоростями нагружения и с соударениями витков, должны выдерживаться в сжатом состоянии до 48 часов и/или подвергаться контактному заневоливанию. Обычное заневоливание или выдержку в сжатом состоянии до 48 часов для повышения производительности труда рекомендуется заменять контактном заневоливанием нагрузкой $10F_3$, время выдержки под нагрузкой 1,5...2 секунды.

Для испытания изготовленного устройства проведем заневоливание новых внутренних клапанных пружин двигателя автомобиля ВАЗ нагрузкой $10F_3$. Нагрузка, прикладываемая к пружине, при этом будет состоять из нагрузки контактного заневоливания и силы сжатия пружины до соприкосновения витков (310 Н) и будет равна 3410 Н.

По тарировочному графику (рисунок 3.8) и уравнению полиномиальной регрессионной линии (3.5) с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0,999$ установлена зависимость между показаниями индикатора динамометра и нагрузкой контактного заневоливания. Нагрузке 3410 Н соответствуют 1,76 мкм по шкале индикатора

$$y = -19,075 \cdot x^2 + 4294,5 \cdot x - 4083,3. \quad (3.5)$$

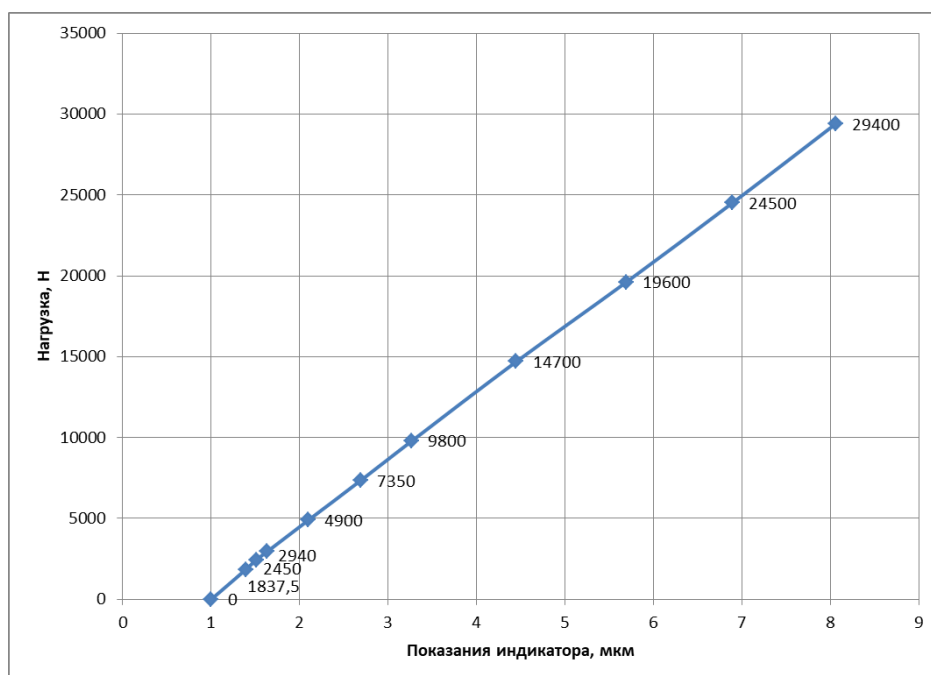


Рисунок 3.8 — Тарировочный график зависимости нагрузки от показаний индикатора динамометра [88]

Последовательность испытания устройства [88].

1. Пружина установлена в устройство для заневоливания.
2. Устройство помещено между захватами разрывной машины Р-5. Между основанием устройства и нижним захватом машины установлен динамометр образцовый сжатия ДОСМ—3—3 (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 — Устройство с пружиной и динамометром между захватами разрывной машины [88]

3. Проведено контактное заневоливание пружины нагрузкой 3410 Н. Время выдержки 1,5...2 секунды.

4. Пружина извлечена из устройства.

5. Проведён замер геометрических параметров пружины. Результаты испытаний представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Параметры пружины клапана до и после заневоливания

№ п/п	Параметры пружины до заневоливания		Параметры пружины после заневоливания	
	H_0 , мм	γ , °	H_0 , мм	γ , °
1	41,4	1°01'	41,4	1°01'
2	41,6	1°17'	41,6	1°17'
3	42,1	1°55'	42,1	1°52'
4	42,2	1°58'	42,2	1°52'
5	42,1	1°32'	42,1	1°32'
6	42,1	1°58'	42,1	1°53'
7	41,8	1°50'	41,8	1°50'
8	41,2	1°06'	41,2	1°06'
9	41,4	1°51'	41,4	1°51'
10	42,0	1°25'	42,0	1°25'

Примечание: γ — неперпендикулярность торца пружины к её оси в градусах.

3.3 Разработка технологии изготовления внутренней пружины клапана 2101-1007021

По предложенному способу [108] совместно с АО «Белебеевский завод „Автонормаль”» разработаны два новых варианта технологии изготовления пружин, представленные в таблице 3.2.

Таблица 3.2. 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	Примечания, оборудование
1	Входной контроль проволоки на соответствие техническим условиям по ТУ 14-4-1380-96.	Входной контроль проволоки на соответствие техническим условиям по ТУ 14-4-	Входной контроль проволоки на соответствие техническим условиям по ТУ 14-	-

№ п/п	Серийные пружины	Вариант 1 (250 °С) Опытные пружины	Вариант 2 (380 °С) Опытные пружины	Примечания, оборудование
	Предел прочности, испытание на навивку, испытание на кручение, вес	1380-96. Предел прочности, испытание на навивку, испытание на кручение, вес	4-1380-96. Предел прочности, испытание на навивку, испытание на кручение, вес	
2	Промывка (обезжиривание)	Промывка (обезжиривание)	Промывка (обезжиривание)	-
3	Контроль проволоки магнитный	Контроль проволоки магнитный	Контроль проволоки магнитный	Дефектоскоп «Ferster»
4	Навивка с отбраковкой дефектных пружин	Навивка с отбраковкой дефектных пружин	Навивка с отбраковкой дефектных пружин	Автомат FS-5 Время пролеживания металла после магнитного контроля до конца навивки — 72 часа
5	Промывка, сушка перед отпуском	Промывка, сушка перед отпуском	Промывка, сушка перед отпуском	-
6	Отпуск при температуре 410 ± 10 °С в течение 30 минут	Отпуск при температуре 410 ± 10 °С в течение 30 минут	Отпуск при температуре 410 ± 10 °С в течение 30 минут	Печь СКЗ 4.30
7	Люминесцентный контроль	Люминесцентный контроль	Люминесцентный контроль	-
6	Шлифовка торцов	Шлифовка торцов	Шлифовка торцов	Полуавтомат FS-6 фирмы «Wafios»
8	Дробемётная обработка в течение 3 минут для снятия заусенцев после шлифовки, ДСЛ-0,5; $A = 0,3$ мм	Дробемётная обработка в течение 10 минут, ДСЛ-0,5; $A = 0,203 \dots 0,303$ мм.	Дробемётная обработка в течение 3 минут для снятия заусенцев после шлифовки, ДСЛ-0,5; $A = 0,3$ мм	Установка 6GT8,5 – 10R ф.«Carlo Banfi»
9	Разборка сцепленных пружин	Разборка сцепленных пружин	Разборка сцепленных пружин	
10	Термоосадка при температуре 380 °С	-	-	Установка «Fiat»
11	Дробемётная обработка в течение 10 минут, ДСЛ-0,5; $A = 0,203 \dots 0,303$ мм	-	-	-
12	Отпуск при температуре 180 °С в течение 25 мин	Отпуск при температуре 180 °С в течение 25 мин	-	Печь СКЗ 4.30
13	Разборка сцепленных пружин	Разборка сцепленных пружин	-	-
14	Трёхкратная осадка до соприкосновения			

№ п/п	Серийные пружины	Вариант 1 (250 °С) Опытные пружины	Вариант 2 (380 °С) Опытные пружины	Примечания, оборудование
	витков с сортировкой по нагрузке F_2	-	-	-
15	-	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	Устройство для контактного заневоливания пружин
16	-	-	Дробемётная обработка, ДСЛ-0,5; $A = 0,203...0,303$ мм. Время обработки 10 мин	Установка 6GT8,5 – 10R ф.«Carlo Banfi»
17	-	-	Разборка сцепленных пружин	-
18	-	-	Отпуск при температуре 180 °С в течение 25 мин	Печь СКЗ 4.30
19	-	-	Разборка сцепленных пружин	
20	Снятие внутренних фасок	Снятие внутренних фасок	Снятие внутренних фасок	
21	Промывка, сушка.	Промывка, сушка.	Промывка, сушка.	
22	Окончательный контроль	Окончательный контроль	Окончательный контроль	
23	Фосфатирование с промасливанием по ТУ 5.00432	Фосфатирование с промасливанием по ТУ 5.00432	Фосфатирование с промасливанием по ТУ 5.00432	
24	Испытания на КРИП (релаксация нагрузки)	Испытания на КРИП (релаксация нагрузки)	Испытания на КРИП (релаксация нагрузки)	
25	Испытания на выносливость циклическим нагрузкам	Испытания на выносливость циклическим нагрузкам	Испытания на выносливость циклическим нагрузкам	Стенд DV8-S2, ф.«Gejrg eicherter»

Примечание: A — прогиб контрольной пластины, мм.

Силовые параметры изготовленных серийных пружин и опытных (по новым технологиям) пружин представлены в таблице 3.3 [1, 107, 109].

Таблица 3.3. Силовые параметры пружин 2101-1007021 серийных и изготовленных по новым технологиям

№ п/п	серийные пружины		опытная партия №1 ($T = 250\text{ °C}$)		опытная партия №2 ($T = 380\text{ °C}$)	
	F_1 , Н	F_2 , Н	F_1 , Н	F_2 , Н	F_1 , Н	F_2 , Н
По ТТ чертежа	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)
1	139,3	277,5	134,4	272,1	141,7	276,6
2	138,3	271,6	132,9	270,7	143,2	277,5
3	139,3	275,6	135,3	273,1	145,1	279,5
4	139,3	275,6	131,9	267,2	143,2	279,5
5	142,2	280,5	132,9	269,2	139,3	279,0
6	139,7	274,6	137,3	277,5	142,7	275,6
7	138,3	273,6	131,4	266,7	141,2	278,5
8	148,1	281,5	132,4	268,7	143,2	279,0
9	141,2	280,5	132,4	268,7	144,2	280,5
10	138,3	271,6	134,4	271,6	143,2	278,5
11	147,1	284,4	139,3	278,5	143,2	276,6
12	139,7	274,6	132,9	272,6	145,6	279,5
13	137,3	270,7	132,4	267,7	140,2	278,5
14	137,3	271,6	135,3	273,1	146,1	277,5
15	145,6	282,4	132,9	270,7	145,1	280,5
16	139,3	275,6	138,3	275,6	142,2	281,0
17	139,3	275,6	137,3	274,6	146,1	283,4
18	138,8	273,6	137,3	275,6	142,7	279,5
19	140,2	278,5	132,4	268,7	142,2	278,0
20	148,1	284,4	137,3	277,5	144,2	280,5
21	137,3	271,6	134,4	271,6	142,2	276,6
22	141,2	279,5	132,4	268,7	143,2	276,1
23	139,3	278,5	131,9	267,7	142,2	277,5
24	143,2	280,5	140,2	278,5	144,2	278,0
min	137,3	270,7	131,4	266,7	139,3	275,6
max	148,1	284,4	140,2	278,5	146,1	283,4
X	140,7	276,8	134,6	271,9	143,2	278,6
R	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 анализе таблицы 3.3 можно сделать следующие выводы [1, 107, 109]. Работы по изготовлению серийной партии пружин, проволока Oteva 70 показали, что сила пружин F_2 находится в пределах 270,7...284,4 Н, что не превышает пределов допускаемых отклонений $275,6\pm 13,7$ Н. Рассеивание рабочей нагрузки составляет 13,7 Н.

Работы по изготовлению опытной партии № 1 ($T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$) пружин 2101-1007021, проволока Oteva 70 показали [1, 107, 109], что сила пружин F_2 находится в пределах 266,7...278,5 Н, что не выходит за пределы допусаемых отклонений. Исключена операция трехкратной холодной осадки. Рассеивание рабочей нагрузки составляет 11,8 Н.

Работы по изготовлению опытной партии № 2 ($T = 380 \text{ }^\circ\text{C}$) пружин 2101-1007021, проволока Oteva 70 показали [1, 107, 109], что сила пружин F_2 находится в пределах 275,6...283,4 Н, что не выходит за пределы допусаемых отклонений. Исключена операция трехкратной холодной осадки. Рассеивание рабочей нагрузки составляет 7,8 Н.

При изготовлении опытной партии пружин № 1 ($T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$) стабилизация силовых параметров пружин увеличена на 14,3 %. При изготовлении опытной партии пружин № 2 ($T = 380 \text{ }^\circ\text{C}$) стабилизация силовых параметров пружин увеличена на 42,9 %.

3.4 Экспериментальная оценка эффективности разработанной технологии

После изготовления все пружины для испытания на стойкость циклическим нагрузкам от H_0 до H_2 были установлены на стенд резонансного типа DV8-S2 фирмы «Gejrg Reicherter», Германия (рисунок 3.10). Результаты испытаний [1, 107, 109] серийных пружин и пружин, изготовленных по новой технологии на стойкость к циклическим нагрузкам — 6 млн циклов — представлены в таблицах 3.4...3.6.



Рисунок 3.10 — Стенд резонансного типа DV8-S2 ф.«Gejrg Reicherter»

Таблица 3.4. Результаты испытаний серийных 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, H	F_2, H	F_1, H	F_2, H		
По ТТ чертежа	136,3+13,7/-6,9 (129,4...150,0)	275,6±13,7 (261,9...289,3)	-	-	-	-
1	139,3	277,5	137,3	273,6	1,41	1,40
2	138,3	271,6	136,8	268,7	1,06	1,10
3	139,3	275,6	137,3	272,6	1,41	1,10
4	139,3	275,6	137,8	273,6	1,05	0,70
5	142,2	280,5	140,2	275,6	1,41	1,70
6	139,7	274,6	137,3	269,7	1,75	1,70
7	138,3	273,6	136,3	269,7	1,41	1,43
8	148,1	281,5	146,6	281,5	0,99	1,00
9	141,2	280,5	138,8	276,5	1,73	1,40
10	138,3	271,6	136,8	268,7	1,06	0,70
11	147,1	284,4	144,2	279,5	2,00	1,70
12	139,7	274,6	137,3	269,7	1,75	1,70
13	137,3	270,7	135,3	267,7	1,43	1,09
14	137,3	271,6	135,3	268,7	1,43	1,08
15	145,6	282,4	144,2	280,5	1,01	0,70
16	139,3	275,6	137,3	272,6	1,41	1,10
17	139,3	275,6	136,8	272,6	1,76	1,10
18	138,8	273,6	137,3	270,7	1,06	1,10
19	140,2	278,5	139,3	277,5	0,70	0,40
20	148,1	284,4	146,1	281,5	1,32	1,03
21	137,3	271,6	135,3	268,7	1,43	1,10
22	141,2	279,5	138,8	274,6	1,73	1,70
23	139,3	278,5	136,3	273,6	2,11	1,76

№ п/п	до испытаний		после испытаний		$\Delta F_1, \%$	$\Delta F_2, \%$
	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$		
24	143,2	280,5	142,2	279,5	0,68	0,30
min	137,3	270,7	135,3	267,7	0,68	0,30
max	148,1	284,4	146,6	281,5	2,00	1,76
X	140,7	276,8	138,8	273,6	1,38	1,17
R	10,8	13,7	11,3	13,7	1,32	1,46

Проверка информации на наличие выпадающих точек осуществлена по критерию Ирвина. Коэффициент Ирвина, опытный для наименьшего значения нагрузки F_2 , после испытания равен 0,24. Опытное значение коэффициента Ирвина сравниваем с табличным [129]. Так как $0,24 \leq 1,26$, информация является достоверной. Коэффициент Ирвина для наибольшего значения нагрузки F_2 после испытания равен 0,24. Так как $0,24 \leq 1,26$, информация является достоверной.

Таблица 3.5. Результаты испытаний опытной партии № 1 ($T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$) пружины 2101-1007021 на стойкость к циклическим нагрузкам 6 млн циклов

№ п/п	до испытаний		после испытаний		$\Delta F_1, \%$	$\Delta F_2, \%$
	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$		
По ТТ чертежа	136,3+13,7/-6,9 (129,4...150,0)	275,6±13,7 (261,9...289,3)	-	-	-	-
1	134,4	272,1	132,9	270,7	1,09	0,54
2	132,9	270,7	131,9	269,7	0,74	0,36
3	135,3	273,1	134,4	271,6	0,72	0,54
4	131,9	267,2	131,4	266,7	0,37	0,18
5	132,9	269,2	131,4	268,2	1,11	0,36
6	137,3	277,5	135,8	277,0	1,07	0,18
7	131,4	266,7	130,4	266,3	0,75	0,18
8	132,4	268,7	131,4	267,7	0,74	0,37
9	132,4	268,7	131,9	268,7	0,37	0
10	134,4	271,6	133,4	271,2	0,73	0,18
11	139,3	278,5	137,8	277,0	1,06	0,53
12	132,9	272,6	131,9	271,6	0,74	0,36
13	132,4	267,7	131,9	267,7	0,37	0
14	135,3	273,1	134,8	273,1	0,36	0
15	132,9	270,7	132,4	270,2	0,34	0,18
16	138,3	275,6	137,3	275,1	0,71	0,18
17	137,3	274,6	136,3	273,1	0,35	0,18
18	137,3	275,6	135,8	274,6	1,07	0,36
19	132,4	268,7	131,4	268,7	0,74	0
20	137,3	277,5	136,8	277,5	0,36	0
21	134,4	271,6	133,4	270,7	0,73	0,36

№ п/п	до испытаний		после испытаний		$\Delta F_1, \%$	$\Delta F_2, \%$
	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$		
22	132,4	268,7	132,4	268,7	0	0
23	131,9	267,7	131,4	267,7	0,37	0
24	140,2	278,5	138,8	277,0	1,04	0,53
min	131,4	266,7	130,4	266,3	0	0
max	140,2	278,5	138,8	277,0	1,11	0,54
X	134,6	271,9	133,6	271,3	0,66	0,23
R	8,8	11,8	8,4	10,7	1,11	0,54

Коэффициент Ирвина для наименьшего значения нагрузки F_2 после испытания равен 0,15. Так как $0,15 \leq 1,26$, информация является достоверной. Коэффициент Ирвина для наибольшего значения нагрузки F_2 после испытания равен 0,15. Так как $0,15 \leq 1,26$, информация является достоверной.

Таблица 3.6. Результаты испытаний опытной партии № 2 ($T = 380 \text{ }^\circ\text{C}$) пружины 2101-1007021 на стойкость к циклическим нагрузкам 6 млн циклов

№ п/п	до испытаний		после испытаний		$\Delta F_1, \%$	$\Delta F_2, \%$
	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$		
По ТТ чертежа	136,3+13,7/-6,9 (129,4...150,0)	275,6±13,7 (261,9...289,3)	-	-	-	-
1	141,7	276,5	139,7	274,6	1,38	0,70
2	143,2	277,5	141,2	275,6	1,37	0,70
3	145,1	279,5	143,2	278,5	1,35	0,35
4	143,2	279,5	142,2	277,5	0,68	0,70
5	139,3	279,0	138,3	277,0	0,70	0,70
6	142,7	275,6	140,7	275,6	1,37	0
7	141,2	278,5	139,3	276,5	1,38	0,70
8	143,2	279,0	142,2	278,0	0,68	0,35
9	144,2	280,5	143,2	278,5	0,68	0,70
10	143,2	278,5	141,2	276,5	1,36	0,70
11	143,2	276,5	141,2	275,6	1,37	0,35
12	145,6	279,5	143,7	278,5	1,33	0,35
13	140,2	278,5	138,3	277,5	1,40	0,35
14	146,1	277,5	145,1	276,5	0,67	0,35
15	145,1	280,5	143,2	279,5	1,35	0,35
16	142,2	281,0	140,2	279,0	1,37	0,70
17	146,1	283,4	144,2	282,4	1,34	0,34
18	142,7	279,5	141,7	278,5	0,68	0,35
19	142,2	278,0	140,2	276,1	1,37	0,70
20	144,2	280,5	142,2	280,5	1,36	0
21	142,2	276,5	140,2	274,6	1,37	0,70
22	143,2	276,1	141,2	276,1	1,37	0

№ п/п	до испытаний		после испытаний		$\Delta F_1, \%$	$\Delta F_2, \%$
	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$		
23	142,2	277,5	141,2	275,6	0,68	0,70
24	144,2	278,0	143,2	278,0	0,68	0
min	139,3	275,6	138,3	274,6	0,67	0
max	146,1	283,4	145,1	282,4	1,40	0,70
X	143,2	278,6	141,5	277,5	1,14	0,45
R	6,8	7,8	6,8	7,8	0,77	0,70

Коэффициент Ирвина для наименьшего значения нагрузки F_2 после испытания равен 0,55. Так как $0,55 \leq 1,26$, информация является достоверной. Коэффициент Ирвина для наибольшего значения нагрузки F_2 после испытания равен 1,11. Так как $1,11 \leq 1,26$, информация является достоверной.

Все пружины выдержали испытания без поломок и недопустимых осадок. Величины F_2 находятся в пределах допуска.

Необходимо отметить [1, 107, 109], что уменьшение рабочей нагрузки у серийных пружин в среднем составило 1,17 %; у пружин опытной партии № 1 ($T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$) — 0,23 %; у пружин опытной партии № 2 ($T = 380 \text{ }^\circ\text{C}$) — 0,45 % .

Пружины опытной партии № 1 ($T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$) были подвергнуты дальнейшим испытаниям до 10 млн циклов (таблица 3.7) [1, 107, 109].

Таблица 3.7. Результаты испытаний опытной партии № 1 ($T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$) пружины 2101-1007021 на стойкость к циклическим нагрузкам 10 млн циклов

№ п/п	до испытаний		после испытаний		$\Delta F_1, \%$	$\Delta F_2, \%$
	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$		
По ТТ чертежа	136,3+13,7/-6,9 (129,4...150)	275,6±13,7 (261,9...289,3)	-	-	-	-
1	134,4	272,1	132,5	268,4	1,38	1,37
2	132,9	270,7	131,3	267,6	1,15	1,14
3	135,3	273,1	133,4	270,1	1,43	1,13
4	131,9	267,2	130,5	265,4	1,04	0,7
5	132,9	269,2	131,0	264,7	1,37	1,68
6	137,3	277,5	134,7	272,6	1,83	1,75
7	131,4	266,7	129,6	263,2	1,35	1,31
8	132,4	268,7	130,9	265,8	1,12	1,09
9	132,4	268,7	130,2	265,1	1,65	1,35
10	134,4	271,6	133,1	269,7	0,97	0,73
11	139,3	278,5	136,6	273,9	1,89	1,64

№ п/п	до испытаний		после испытаний		$\Delta F_1, \%$	$\Delta F_2, \%$
	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$	$F_1, \text{Н}$	$F_2, \text{Н}$		
12	132,9	272,6	130,3	267,4	1,93	1,9
13	132,4	267,7	130,4	264,5	1,47	1,21
14	135,3	273,1	133,3	269,7	1,54	1,24
15	132,9	270,7	131,6	268,7	0,95	0,72
16	138,3	275,6	136,6	272,3	1,23	1,18
17	137,3	274,6	134,8	271,4	1,81	1,17
18	137,3	275,6	135,7	272,7	1,17	1,02
19	132,4	268,7	131,5	267,4	0,67	0,48
20	137,3	277,5	135,2	274,6	1,48	1,05
21	134,4	271,6	132,3	269,0	1,55	0,98
22	132,4	268,7	130,2	264,3	1,6	1,66
23	131,9	267,7	129,2	262,9	2,07	1,81
24	140,2	278,5	139,3	277,5	0,73	0,35
min	131,4	266,7	129,2	262,9	0,67	0,35
max	140,2	278,5	139,3	277,5	2,07	1,9
X	134,6	272,0	132,7	268,7	1,39	1,19
R	8,8	11,8	10,1	14,6	1,4	1,55

Коэффициент Ирвина для наименьшего значения нагрузки F_2 после испытания равен 0,07. Так как $0,07 \leq 1,26$, информация является достоверной. Коэффициент Ирвина для наибольшего значения нагрузки F_2 после испытания равен 0,70. Так как $0,70 \leq 1,26$, информация является достоверной.

Все пружины выдержали испытания без поломок [1, 107, 109]. Величина F_2 после испытаний находится в пределах допуска. Уменьшение рабочей нагрузки в среднем 1,19 %.

Результаты анализов микроструктуры и измерения твердости в лаборатории АО «БелЗАН» испытанных пружин показали, что глубина дефектов поверхности образцов не превышает 0,01 мм (рисунок 3.11).

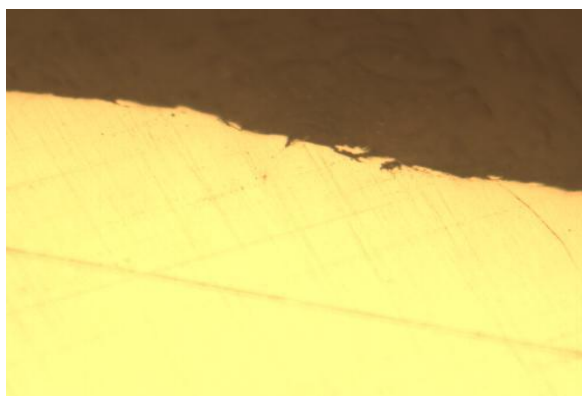
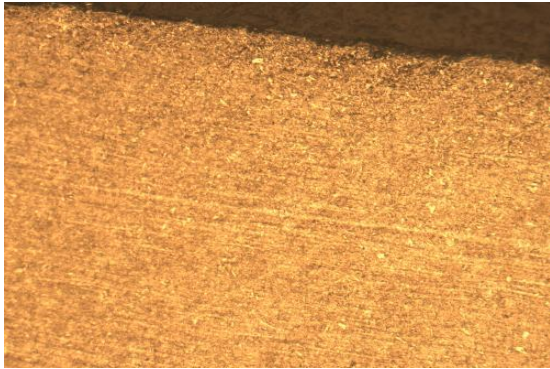
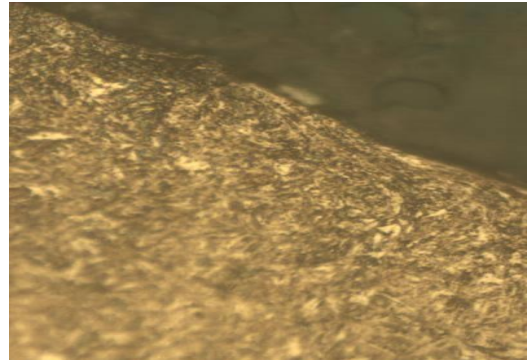


Рисунок 3.11 — Дефекты в продольном сечении образца при увеличении в 500 раз

Структура поверхности образца (рисунок 3.12) — троосто-сорбит с игольчатой ориентацией по мартенситу 3 балла (ГОСТ 8233).



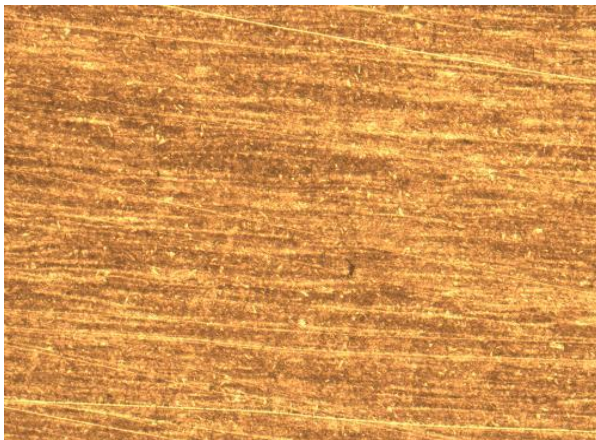
а)



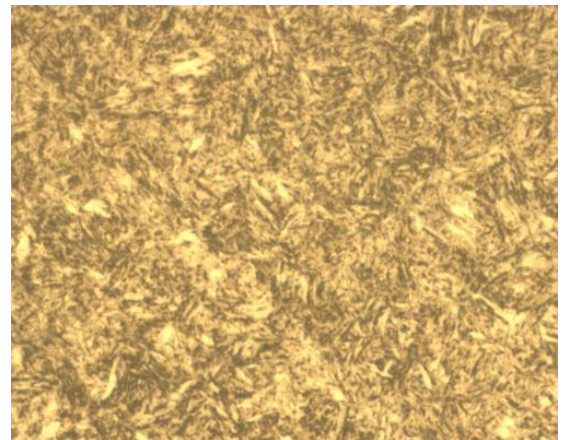
б)

Рисунок 3.12 — Микроструктура поверхности образца: а) — продольное сечение при увеличении в 200 раз; б) — поперечное сечение при увеличении в 1000 раз

Структура сердцевины образца (рисунок 3.13) — троосто-сорбит с игольчатой ориентацией по мартенситу 3-4 балла (ГОСТ 8233).



а)



б)

Рисунок 3.13 — Микроструктура сердцевины образца: а) — продольное сечение при увеличении в 200 раз; б) — поперечное сечение при увеличении в 1000 раз

Твердость образцов составила 48...52 HRC. Обезуглероженного слоя и окарины не обнаружено.

3.5 Сравнение теоретических и экспериментальных исследований

Из уравнения (2.9) определим свободную рабочую высоту пружины $H_{раб}$ при нагрузке контактного заневоливания $Q = 16,1F_3$ (250 °C) без учёта влияния дробемётной обработки. $H_{раб} = 37,63$ мм, тогда с учётом высоты опорных витков $H_0 = 40,83$ мм.

По формуле инженера Сажина (2.8) определим силу F_2 рабочей нагрузки при $H_0 - H_2 = 20,83$ мм. $F_2 = 285,4$ Н.

Разница между теоретическими, не учитывающими влияния 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 %. Это доказывает преимущество предложенной математической модели.

Выводы по разделу

1. Разработано устройство для контактного заневоливания пружин, при испытаниях которого установлено, что пружина после заневоливания имеет правильную геометрическую форму.

2. Разработана новая технология изготовления внутренних пружин клапана 2101-1007021. Термоосадка при температуре 380 °С заменена на контактное заневоливание (пластическое упрочнение сжатием дополнительной осевой нагрузкой) при температуре 250 °С. Дробемётная обработка выполняется до пластического упрочнения.

При испытаниях изготовленных пружин установлено, что разработанная технология работоспособна и обеспечивает:

- снижение рассеивания рабочей нагрузки на 14,3 %;
- повышение циклической долговечности до 40 %.

Проверка результатов испытаний разработанной технологии по критерию Ирвина показала отсутствие в них грубой погрешности.

Исследование микроструктуры и твердости испытанных пружин показали, что разработанная технология обеспечивает требуемое качество материала пружин.

3. По результатам экспериментальных исследований установлено, что учёт увеличения предела текучести материала пружинной проволоки в упрочнённой зоне после дробемётной обработки повышает точность математической модели определения параметров пружин сжатия при изготовлении с применением совместных операций пластического упрочнения — дробемётной обработки и контактного заневоливания на 3,43 %.

4 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРУЖИН УМЕНЬШЕННОГО СЕЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ С ПОВЫШЕННЫМ РЕСУРСОМ

4.1 Актуальность изготовления клапанных пружин уменьшенного сечения проволоки

Одним из важных показателей [1, 100] современных автомобилей является экономичность, поэтому актуальна проблема снижения (в своем классе) массы как самих автомобилей, так и массы входящих в них узлов, в том числе и двигателей. В современном автомобильном мире давно наметилась тенденция к снижению рабочего объема (литража) ДВС при той же, а порой и при более высокой мощности.

Основными показателями степени совершенства ДВС являются удельный расход топлива и удельная мощность. Для улучшения данных показателей требуется снизить массы и габариты входящих в устройство ДВС узлов, агрегатов, а соответственно, самих деталей.

За последние десятилетия [110] масса пружины клапана снизилась примерно в 2...3 раза, мощность при том же рабочем объеме выросла более чем в 2 раза. Рабочие напряжения пружин клапанов у новых ДВС приблизились к 900 МПа. Например, современные зарубежные двигатели объемом 1,4 литра имеют мощность 140 лошадиных сил (л.с.) (102 970 Вт), а в 80-е годы отечественный автомобиль при объеме двигателя 1,6 литра имел всего 75 л.с. (55 162,5 Вт). Проблема снижения массы и габаритов деталей остается актуальной.

Зарубежные производители, например, фирма «SCHERDEL» (Германия), предложили на АО «АвтоВАЗ» новые конструкции пружин клапанов с уменьшенными сечениями проволок под действующие тарелки и опорные шайбы:

- $d = 3,5$ мм вместо $d = 3,6$ мм для пружин 2101-1007020 и 2108-1007020;
- $d = 2,5$ мм вместо $d = 2,7$ мм для пружин 2101-1007021 и 2108-1007021.

Актуальной является задача изготовления пружин с повышенным ресурсом уменьшенного сечения проволоки, не уступающих по качеству импортным аналогам.

4.2 Проектирование пружин клапана двигателя автомобиля ВАЗ уменьшенного сечения проволоки

Исходные данные для проектирования пружин: диаметр проволоки d , мм; внутренний диаметр D_1 , мм; средний диаметр D , мм; предварительная длина H_1 , мм; рабочая длина H_2 , мм; сумма сил F_1 , Н; сумма сил F_2 , Н; материал — проволока Oteva 70.

Сила пружины F , Н, заданная требованиями чертежа, определяется по зависимости [130]

$$F_x = \frac{G \cdot d^4 \cdot H_{\Pi}}{8 \cdot D^3 \cdot i_{\text{раб}}}, \quad (4.1)$$

где $x = 1, 2, 3$;

$G = 7,95 \cdot 10^4$ МПа — модуль упругости второго рода проволоки Oteva 70 [32];

H_{Π} — абсолютная линейная деформация пружины, мм;

$i_{\text{раб}}$ — число рабочих витков;

$$H_{\Pi} = H_0 - H_x.$$

Касательное напряжение, возникающее в пружине [130]

$$\tau_x = k \cdot \frac{8 \cdot F_x \cdot D}{\pi \cdot d^3}, \quad (4.2)$$

$$k = \frac{4 \times c - 1}{4 \times c + 1} + \frac{0,615}{c}, \quad c = \frac{D}{d},$$

где k — коэффициент, учитывающий увеличение напряжений от кривизны витка;

c — индекс пружины.

По зависимостям (4.1) и (4.2) методом последовательных приближений

определены параметры пружин 2101-1007020 (наружная пружина) и 2101-1007021 (внутренняя пружина) с учётом получения минимальных касательных напряжений τ_2 , МПа, и требуемых сумм силовых параметров наружной и внутренней пружин (сумма сил предварительного поджатия и рабочей нагрузки наружной и внутренней пружин соответственно: $\sum F_1 = 420 \pm 17$ Н, $\sum F_2 = 727 \pm 32$ Н).

Например, для первого варианта (таблица 4.1 ($d_n = 3,5$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм)):

для наружной пружины при $d_n = 3,5$ мм, $H_0 = 50$ мм, $H_l = 33,7$ мм, $D = 29$ мм, $i_{раб} = 3,5$: $H_{п} = 16,3$ мм, $F_l = 282,97$ Н, $c = 8,29$, $k = 1,18$, $\tau_l = 573,73$ МПа;

для внутренней пружины при $d_{вн} = 2,6$ мм, $H_{в0} = 39,6$ мм, $H_l = 29,7$ мм, $D = 20,2$ мм, $i_{раб} = 3,9$: $H_{п} = 9,9$ мм, $F_l = 138,98$ Н, $c = 7,77$, $k = 1,19$, $\tau_l = 484,00$ МПа.

$$\sum F_1 = 421,95 \text{ Н.}$$

Жесткость пружин Z , Н/мм, определена по известной зависимости [130]

$$Z = \frac{F_x}{H_{п}} \quad (4.3)$$

Максимальная высота пружины, сжатой до соприкосновения витков [130]

$$H_{3max} = [i + \Delta i + 1 - (i_{оп} - 0,1)] \times (d + \Delta d), \quad (4.4)$$

где i — полное число витков пружины;

Δi — предельное отклонение числа витков пружины (ГОСТ 16118-70);

$i_{оп}$ — число опорных витков;

Δd — предельные отклонения диаметра проволоки пружины, мм, (ГОСТ 16118-70).

Например, для экспериментальной пружины из проволоки диаметром 3,5 мм, спроектированной по первому варианту ($d_n = 3,5$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм) при $i = 5,5$; $\Delta i = 0,15$; $i_{оп} = 2$; $\Delta d = 0,04$ мм: $H_{3max} = 16,82$ мм.

Масса заготовки пружины m , гр., [130]

$$m = 19,25 \times 10^{-3} \times D \times d^2 \times i. \quad (4.5)$$

По данным завода-изготовителя при шлифовке торцов пружина наружная теряет 3,87 г, внутренняя — 2,82 г.

Данные завода по серийным пружинам [110], а также результаты проектирования экспериментальных пружин по зависимостям (4.1...4.5) представлены в таблицах 4.1, 4.2.

Таблица 4.1. Параметры пружин серийных и экспериментальных (вариант 1 ($d_n = 3,5$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм), вариант 2 ($d_n = 3,4$ мм, $d_{вн} = 2,5$ мм))

	Серийные пружины ($d_n = 3,6$ мм, $d_{вн} = 2,7$ мм)		Новые пружины, вариант 1 ($d_n = 3,5$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм)		Новые пружины, вариант 2 ($d_n = 3,4$ мм, $d_{вн} = 2,5$ мм)	
	2101- 1007020	2101- 1007021	Э2101- 1007020-11	Э2101- 1007021-11	Э2101- 1007020-12	Э2101- 1007021-12
Тип пружины	цилиндр	цилиндр	цилиндр	цилиндр	цилиндр	цилиндр
Диаметр проволоки d , мм	3,60 VD SiCr SC	2,70 VD SiCr SC	3,50 VD SiCr SC	2,60 VD SiCr SC	3,40 VD SiCr SC	2,50 VD SiCr SC
Внутренний диаметр D_I , мм	25,50±0,25	17,6±0,20	25,50±0,25	17,6±0,20	25,50±0,25	17,6±0,20
Средний диаметр D , мм	29,10	20,30	29,00	20,20	28,90	20,10
Общее число витков i	6,00	6,50	5,50	5,90	5,10	5,70
Рабочее число витков $i_{раб}$	4,00	4,50	3,50	3,90	3,10	3,70
Свободная длина H_0 , мм	51,25	39,82	50,00	39,60	50,00	41,00
Предварительная длина H_I , мм	33,70	29,70	33,70	29,70	33,70	29,70
Рабочая длина H_2 , мм	24,00	20,00	24,00	20,00	24,00	20,00
Длина сжатой до соприкосновения витков пружины H_{3max} , мм	19,11	15,78	16,82	13,49	14,96	12,47
Ход кулачка h , мм	9,70		9,70		9,70	
Сила F_1 , Н	283± 23/15	136,2±14/7	282,97	138,98	287,47	145,07
Сила F_2 , Н	452 ± 22,50	275,40 ± 13,70	451,36	275,15	458,53	269,60
Сумма F_1 , Н	420 ± 17		420 ± 17		420 ± 17	
Сумма F_2 , Н	727± 32		727± 32		727± 32	
Напряжение τ_1 , МПа	526,00*	423,00*	573,73*	484,00*	631,02*	562,21*
Напряжение τ_2 , МПа	842,00*	856,00*	915,15*	958,23* max 1006*	1006,54*	1044,81* max 1098*
$\tau_2 - \tau_1$, МПа	316,00	433,00	341,42	474,23	375,52	482,60
Жесткость Z ,	16,59	13,90	17,36	14,04	17,64	12,84

	Серийные пружины ($d_n = 3,6$ мм, $d_{вн} = 2,7$ мм)		Новые пружины, вариант 1 ($d_n = 3,5$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм)		Новые пружины, вариант 2 ($d_n = 3,4$ мм, $d_{вн} = 2,5$ мм)	
	2101- 1007020	2101- 1007021	Э2101- 1007020-11	Э2101- 1007021-11	Э2101- 1007020-12	Э2101- 1007021-12
Тип пружины	цилиндр	цилиндр	цилиндр	цилиндр	цилиндр	цилиндр
H/мм						
Масса пружины m , г	$\approx 39,69$ $m_{заг} \approx 43,56$	$\approx 15,70$ $m_{заг} \approx 18,52$	$\approx 33,74$ $m_{заг} \approx 37,61$	$\approx 12,69$ $m_{заг} \approx 15,51$	$\approx 28,93$ $m_{заг} \approx 32,80$	$\approx 10,96$ $m_{заг} \approx 13,78$

* - расчеты без учета сил инерции.

Таблица 4.2. Параметры пружин серийных и экспериментальных (вариант 3 ($d_n = 3,5$ мм, $d_{вн} = 2,5$ мм)), вариант 4 ($d_n = 3,4$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм))

	Серийные пружины ($d_n = 3,6$ мм, $d_{вн} = 2,7$ мм)		Новые пружины, вариант 3 ($d_n = 3,5$ мм, $d_{вн} = 2,5$ мм)		Новые пружины, вариант 4 ($d_n = 3,4$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм)	
	2101- 1007020	2101- 1007021	Э2101- 1007020-13	Э2101- 1007021- 13	Э2101- 1007020-14	Э2101- 1007021-14
Тип пружины	цилиндр	цилиндр	цилиндр	цилиндр	цилиндр	цилиндр
Диаметр проволоки d , мм	3,60 VD SiCr SC	2,70 VD SiCr SC	3,50 VD SiCr SC	2,50 VD SiCr SC	3,40 VD SiCr SC	2,60 VD SiCr SC
Внутренний диаметр D_1 , мм	25,50±0,25	17,60±0,20	25,50±0,25	17,60±0,20	25,50±0,25	17,60±0,20
Средний диаметр D , мм	29,10	20,30	29,00	20,10	28,90	20,20
Общее число витков n_1	6,00	6,50	5,20	5,70	5,10	5,90
Рабочее число витков n	4,00	4,50	3,20	3,70	3,10	3,90
Свободная длина H_0 , мм	51,25	39,82	49,00	40,00	49,00	40,50
Предварительная длина H_1 , мм	33,70	29,70	33,70	29,70	33,70	29,70
Рабочая длина H_2 , мм	24,00	20,00	24,00	20,00	24,00	20,00
Длина сжатой до соприкосновения витков пружины H_{3max} , мм	19,11	15,78	15,75	12,47	14,96	13,49
Ход кулачка h , мм	9,70		9,70		9,70	

	Серийные пружины ($d_n = 3,6$ мм, $d_{вн} = 2,7$ мм)		Новые пружины, вариант 3 ($d_n = 3,5$ мм, $d_{вн} = 2,5$ мм)		Новые пружины, вариант 4 ($d_n = 3,4$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм)	
	2101- 1007020	2101- 1007021	Э2101- 1007020-13	Э2101- 1007021- 13	Э2101- 1007020-14	Э2101- 1007021-14
Сила F_1 , Н	283± 23/15	136,2±14/ 7	290,51	132,23	269,83	151,62
Сила F_2 , Н	452 ± 22,5	275,4 ± 13,7	474,69	256,77	440,90	287,78
Сумма F_1 , Н	420 ± 17		420 ± 17		420 ± 17	
Сумма F_2 , Н	727± 32		727± 32		727± 32	
Напряжение τ_1 , МПа	526,00*	423,00*	589,02*	512,45*	592,31*	528,00*
Напряжение τ_2 , МПа	842,00*	856,00*	962,45*	995,06* max 1048*	967,83*	1002,23* max 1050*
$\tau_2 - \tau_1$, МПа	316,00	433,00	373,43	482,60	375,52	474,23
Жесткость Z , Н/мм	16,59	13,90	18,99	12,84	17,64	14,05
Масса пружины m , г	≈ 39,69 $m_{заг} \approx 43,56$	≈15,70 $m_{заг} \approx$ 18,52	≈ 31,69 $m_{заг} \approx 35,56$	≈ 10,96 $m_{заг} \approx$ 13,78	≈ 28,93 $m_{заг} \approx 32,80$	≈ 12,69 $m_{заг} \approx 15,51$

* - расчеты без учета сил инерции.

Наиболее напряженными [110] являются внутренние пружины клапана Э2101-1007021. Рабочие напряжения в пружине (изготовленной по определенной технологии) должны быть ниже допустимых для данной марки проволоки.

Как правило, производитель проволоки проводит необходимые исследования и знает поведение материала при циклических напряжениях, вызывающих усталостное разрушение, а также имеет информацию по допустимым касательным напряжениям для каждой марки проволоки. Фирма «Suzuki-Garphytan» (Швеция) предоставляет своим потребителям подобную информацию в виде диаграммы предельных напряжений («Goodman Diagram»).

Диаграмма Гудмана [2, 32, 131] показывает зависимость предела выносливости проволоки от размаха изменения напряжений $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ (где τ_1 и τ_2 — условные напряжения, соответствующие нагрузкам F_1 и F_2), т. е. от коэффициента асимметрии цикла $r = \tau_1 / \tau_2 = F_1/F_2$. Например, на рисунке 4.1 диаграмма для проволоки Oteva 60. Сплошной линией показан уровень τ_1 и τ_2 ,

обеспечивающий количество циклов до разрушения $N_{Ц} \geq 25 \cdot 10^6$.

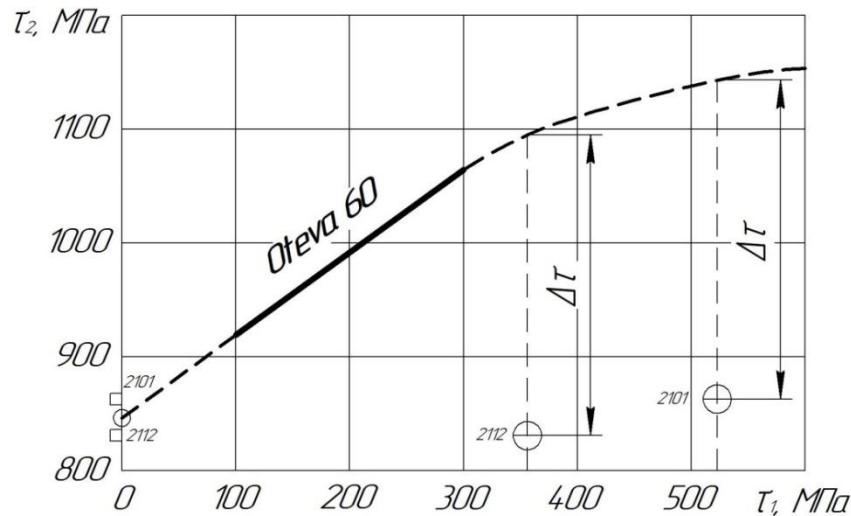


Рисунок 4.1 — Диаграмма усталостных свойств (Гудмана) [32]

Анализируя диаграмму Гудмана (рисунок 4.2) для пружин из проволоки Oteva 70 (изготовленных по рекомендациям фирмы Suzuki-Garphyttan, Швеция), можно сделать выводы, что при $\tau_1 = 300$ МПа допускаемые рабочие напряжения $\tau_2 = 1075$ МПа, а при увеличении $\tau_1 > 300$ МПа появляется возможность увеличить и $\tau_2 \geq 1075$ МПа.

Для внутренних пружин, проектируемых по первому варианту ($d_n = 3,5$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм), $\tau_1 = 484,00$ МПа, $\tau_2 = 958,23$ МПа, ориентировочно коэффициент запаса n_τ выносливости по уровню напряжений

$$n_{\tau_1} = \frac{\tau_N}{\tau_2} = \frac{1075,00}{958,23} = 1,122; (12,2\%).$$

Результаты определения [1] коэффициента запаса n_τ выносливости по уровню напряжений, а также величина снижения суммарной массы пружин $\Delta \Sigma m$, г, для предлагаемых вариантов внутренних пружин клапанов представлены в таблице 4.3.

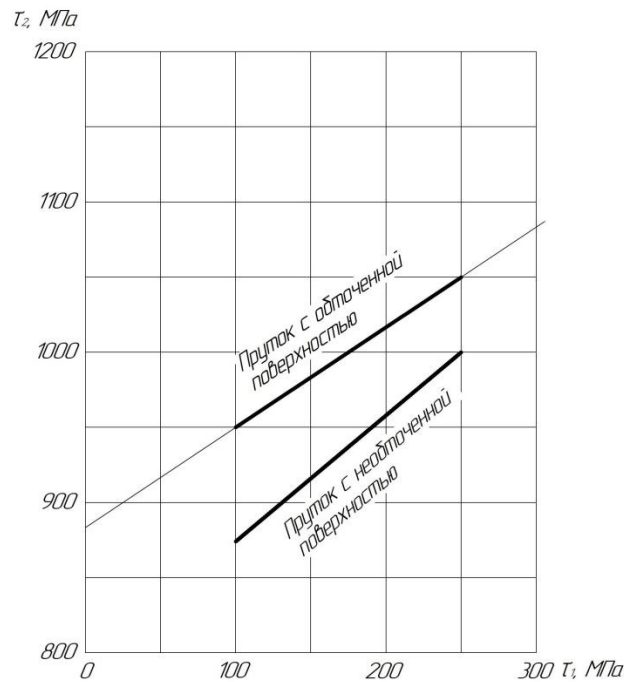


Рисунок 4.2 — Диаграмма усталостных свойств (Гудмана) для пружин из проволоки Oteva 70

Примечание: диаметр прутка $d = 4$ мм; индекс пружины $c = 6$; дробемётно обработанная и отпущенная.

Таблица 4.3. Параметры экспериментальных пружин в сравнении с серийными

	$\tau_2 - \tau_1$, МПа	τ_2 , МПа	n_τ	$\sum m$, гр.	$\Delta \sum m$, гр.
Серийные ($d_n = 3,6$ мм, $d_{вн} = 2,7$ мм)	433,00	856,00	1,26	55,39	0
Вариант 1 ($d_n = 3,5$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм)	474,23	958,23	1,12	46,43	8,96
Вариант 2 ($d_n = 3,4$ мм, $d_{вн} = 2,5$ мм)	482,60	1044,81	1,03	39,89	15,50
Вариант 3 ($d_n = 3,5$ мм, $d_{вн} = 2,5$ мм)	482,60	995,06	1,08	42,65	12,74
Вариант 4 ($d_n = 3,4$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм)	474,23	1002,23	1,07	41,62	13,77

$\sum m$ — суммарная масса внутренней и наружной пружины, гр.;

$\Delta \sum m$ — разность суммарной массы серийных и предлагаемых пружин.

Из анализа таблицы 4.3 можно сделать следующие выводы. Все пружины 2101-1007021 должны работать в двигателе без поломок. Наибольший интерес представляют варианты 2 ($d_n = 3,4$ мм, $d_{вн} = 2,5$ мм) и 4 ($d_n = 3,4$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм). Во втором варианте ($d_n = 3,4$ мм, $d_{вн} = 2,5$ мм) достигается максимальное облегчение массы пружин, однако τ_2 достигает предельных значений (таблица 4.1). В четвертом варианте ($d_n = 3,4$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм) приемлемый коэффициент запаса выносливости по уровню напряжений при значительном снижении

суммарной массы пружин на 24,86 %. При изготовлении экспериментальных пружин следует использовать новый способ изготовления высоконагруженных пружин сжатия [108] и устройства для их упрочнения [122, 123].

4.3 Определение технологических параметров экспериментальных пружин при пластическом упрочнении

Наиболее напряженные — внутренние пружины клапанов, поэтому их следует изготовить и испытать на циклическую прочность.

Технологическими параметрами при пластическом упрочнении пружин являются: нагрузка и геометрические параметры пружин до и после упрочнения.

Вариант 2 ($d_n = 3,4$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм)

По зависимостям (2.1...2.7) определим силу сжатия до соприкосновения витков внутренней пружины клапана двигателя автомобиля ВАЗ (рисунок 4.3) F_3 и её геометрические параметры в сжатом состоянии.

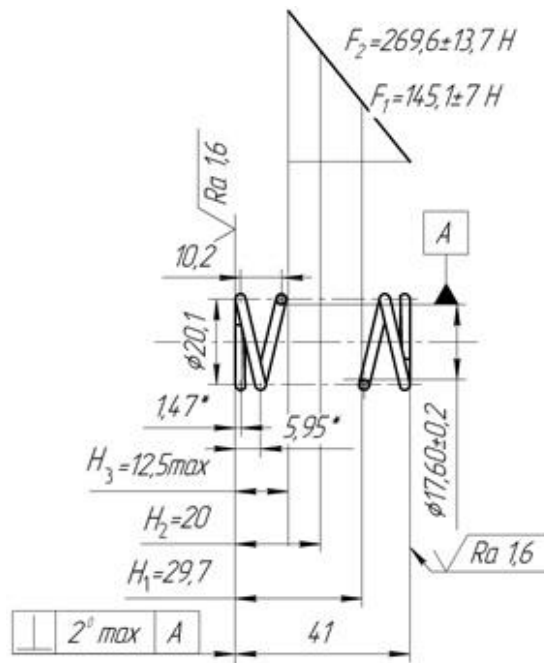


Рисунок 4.3 — Пружина экспериментальная клапана внутренняя 2101-1007021-12 (вариант 2): свободная высота пружины (41 мм) — размер для справок

Параметры пружины: $D = 20,1$ мм; $H_0 = 41,0$ мм; $i = 5,7$; $i_{раб} = 3,7$; $d = 2,5$ мм; материал пружины — проволока 2,5 — Oteva 70 Стандарт «Garphyttan»; направление навивки левое; $t = 10,2$ мм; $\sigma_m = 1683$ МПа (с учётом влияния остаточных напряжений после навивки); $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$; $G = 7,95 \cdot 10^4$ МПа; $H_{оrab} = 37,74$ мм. Высота опорных (нерабочих) витков 3,26 мм.

Угол подъёма (2.1) витков рабочей части пружины $\alpha_0 = 9^\circ 18'$.

Используя пропорции, показанные на рисунке 4.3, определяем силу (2.2) сжатия пружины до соприкосновения витков $F_3 = 365,88$ Н.

Высота (2.3) сжатой до соприкосновения рабочей части витков пружины $H_{3раб} = 9,25$ мм.

Осевое перемещение (2.4) концов рабочей части пружины $H_{праб} = 28,5$ мм.

Длина (2.5) развернутой рабочей части пружины $L = 236,74$ мм.

Угол подъёма (2.6) сжатой до соприкосновения витков пружины $\alpha_3 = 2^\circ 14'$.

Величина среднего диаметра (2.7) сжатой до соприкосновения пружины $D_{сж} = 20,40$ мм.

Сечение витка пружины разделено на 77 элементов (таблицы 4.4, 4.5). с использованием выражений (1.1)...(1.35) исследовано напряженно-деформированное состояние неупрочненной пружины $d = 2,5$ мм (рисунок 4.3) при сжатии до соприкосновения витков. Установлено, что осадка неупрочненной пружины при сжатии до соприкосновения витков составит 4,4 мм, величина упругого ядра — $d_0 = 1,797$ мм.

Таблица 4.4. Деление сечения витка пружины на элементы

x, мм y, мм	-1,25	-1,10	-0,90	-0,70	-0,50	-0,30	-0,10	0,10	0,30	0,50	0,70	0,90	1,10	1,25
0														
0,10						M74	M75	M76	M77					
0,30				M65	M66	M67	M68	M69	M70	M71	M72			
0,50			M54	M55	M56	M57	M58	M59	M60	M61	M62	M63		
0,70		M41	M42	M43	M44	M45	M46	M47	M48	M49	M50	M51	M52	
0,90		M28	M29	M30	M31	M32	M33	M34	M35	M36	M37	M38	M39	
1,10		M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	M22	M23	M24	M25	M26	
1,25	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	

Таблица 4.5. Деление периферии сечения витка пружины на элементы

x, мм y, мм	-1,25	-1,241	-1,20	-1,122	-1,00	-0,812	-0,49	0,49	0,812	1,00	1,122	1,20	1,241	1,25
0														
0,10							M73	M77						
0,30						M64			M72					
0,50					M53					M63				
0,70				M40							M52			
0,90			M27									M39		
1,10		M14											M26	
1,25	M1													M13

Для высокоскоростных пружин, работающих при циклических нагрузках необходимо применять заневоливание на 48 часов или контактное заневоливание нагрузкой $10F_3$ [79]. Нагрузочная способность упрочненных пружин на 25...30 % выше [42], осадка при сжатии до соприкосновения витков отсутствует [80], ресурс пружин повышается до 40 %.

Методом последовательных приближений определим требуемую высоту рабочей части пружины $H_{заг}$ такую, чтобы после приложения нагрузки упрочнения $10F_3$ высота рабочей части упрочненной пружины $H_{раб}$ составила 37,74 мм (рисунок 4.3).

Заготовка 1. Высота рабочей части пружины до упрочнения в свободном состоянии — $H_{заг} = 41,4$ мм; рабочее число витков — $i_{раб} = 3,7$; $d = 2,5$ мм — диаметр поперечного сечения витка пружины;

Угол подъёма (2.6) витков рабочей части пружины $\alpha_{0заг} = 10^\circ$.

Средний диаметр (2.5) заготовки $D_{заг} = 20,057$ мм.

Исследования проведены по зависимостям (1.1)...(1.35) с учётом влияния дробемётной обработки. Свободная высота после упрочнения $H_{раб}$ составит 34,76 мм, величина упругого ядра d_0 при этом будет равна 1,63 мм. Результаты исследований отражены в таблице 4.6.

По данным таблицы построены график зависимости высоты рабочей части пружины до упрочнения от высоты рабочей части пружины после упрочнения (рисунок 4.4) и график зависимости величины упругого ядра пружины от высоты рабочей части пружины до упрочнения (рисунок 4.5).

Таблица 4.6. Результаты исследований пружины из проволоки диаметром 2,5 мм при упрочнении нагрузкой $10F_3$ (3658,8 Н)

Параметры пружины	Заготовка 1	Заготовка 2	Заготовка 3	Заготовка 4	Заготовка 5
$H_{заг}$, мм	41,40	44,40	50,00	57,00	68,00
$i_{раб}$	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70
d , мм	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50
$\alpha_{0заг}$, °	10°	10°48'	12°12'	13°56'	16°41'
$D_{заг}$, мм	20,06	20,01	19,91	19,77	19,51
$H_{раб}$, мм	34,76	35,11	35,91	36,85	37,74
d_0 , мм	1,63	1,48	1,28	1,09	0,87

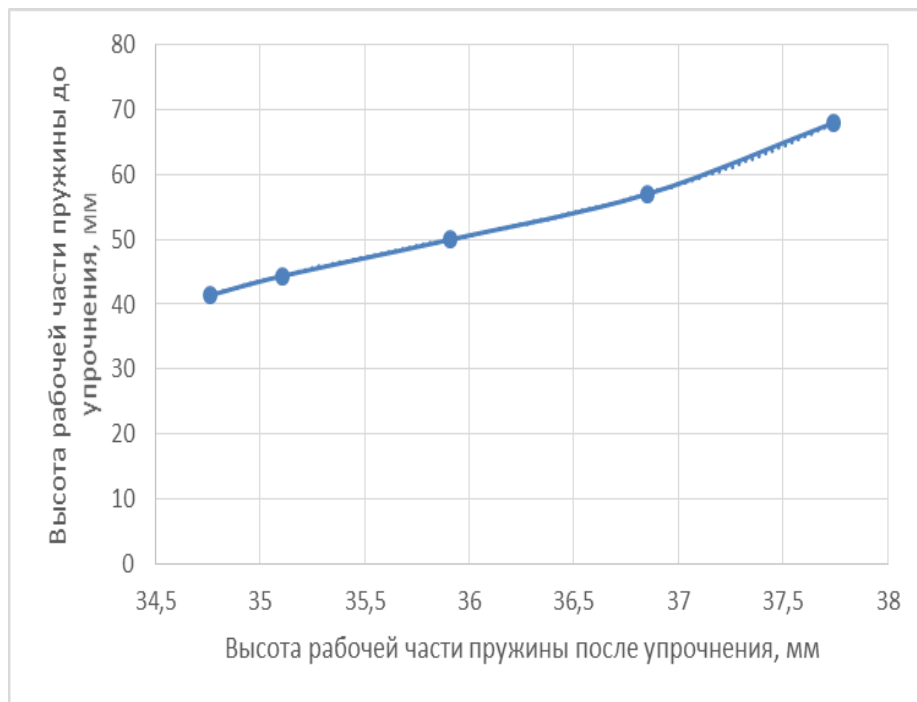


Рисунок 4.4 — График зависимости высоты рабочей части пружины до упрочнения от высоты рабочей части пружины после упрочнения

$$y = 1,1375x^2 - 73,828x + 1233,8, \quad (4.6)$$

$$R^2 = 0,9963.$$

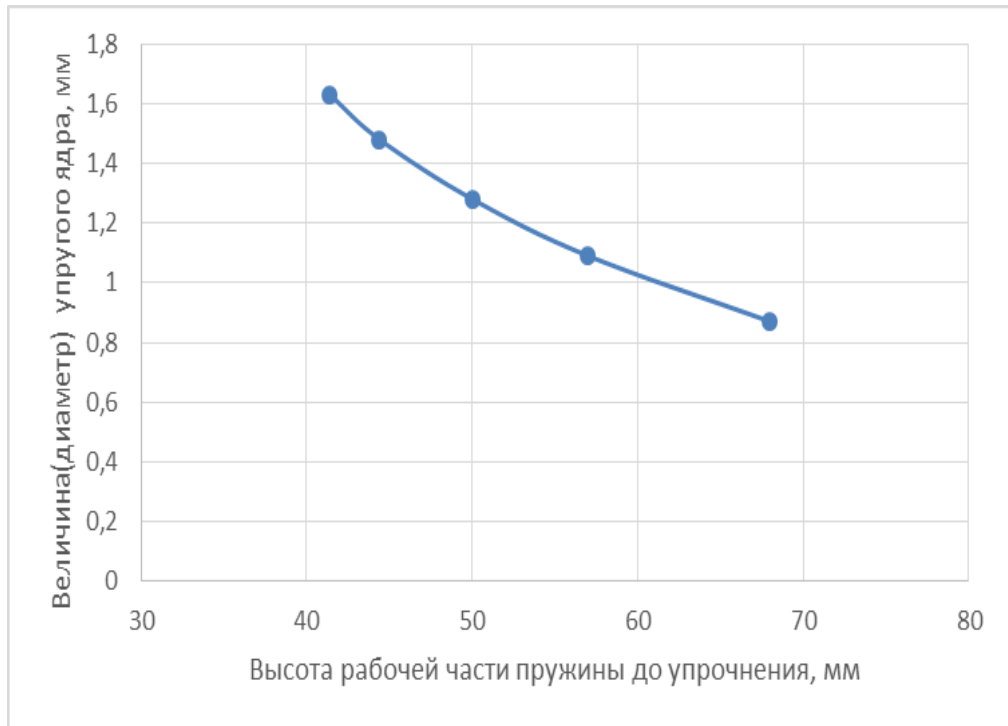


Рисунок 4.5 — График зависимости величины упругого ядра от высоты рабочей части пружины до упрочнения

$$y = 174,35x^{-1,256}, \quad (4.7)$$

$$R^2 = 0,9998.$$

Из уравнений (4.6) и (4.7) рабочая часть пружины будет равна 37,74 мм при высоте заготовки рабочей части перед упрочнением — 67,68 мм. Величина упругого ядра d_0 при этом составит 0,83 мм, что выходит за пределы рекомендованного значения $d_0 \geq 0,5 d [90]$ ($0,83 < 0,5 \cdot 2,50$).

Исследованная пружина клапана двигателя автомобиля ВАЗ из проволоки 2,5 — Oteva 70 Стандарт «Garphyttan» при упрочнении рекомендованной нагрузкой $10F_3$ окажется неработоспособной, поэтому её изготавливать нецелесообразно.

Вариант 4 ($d_n = 3,4$ мм, $d_{вн} = 2,6$ мм)

Определим силу сжатия до соприкосновения витков внутренней пружины клапана двигателя автомобиля ВАЗ (рисунок 4.6) F_3 и её геометрические

параметры в сжатом состоянии.

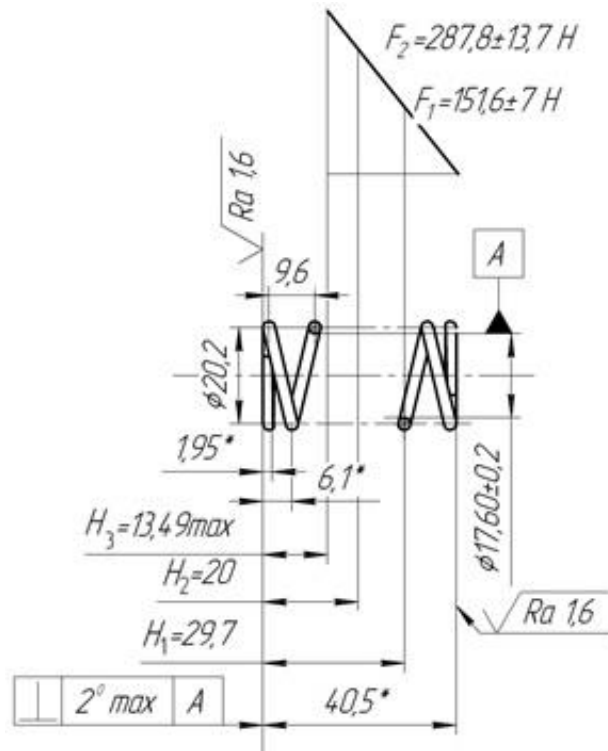


Рисунок 4.6 — Пружина экспериментальная клапана внутренняя 2101-1007021-14 (вариант 4): свободная высота пружины (40,5 мм) — размер для справок

Параметры пружины: $D = 20,2$ мм; $H_0 = 40,5$ мм; $i = 5,9$; $i_{\text{раб}} = 3,9$; $d = 2,6$ мм; материал пружины — проволока 2,6 — Отева 70 Стандарт «Garphyttan»; направление навивки левое; $t = 9,6$ мм; $\sigma_m = 1683$ МПа (с учётом влияния остаточных напряжений после навивки); $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа; $\mu = 0,3$; $G = 7,95 \cdot 10^4$ МПа; $H_{\text{о раб}} = 37,44$ мм. Высота опорных (нерабочих) витков — 3,06 мм.

Тогда из зависимостей (2.1...2.7): $\alpha_0 = 8^\circ 42'$, $F_3 = 379,17$ Н, $H_{3\text{раб}} = 10,14$ мм, $H_{\text{праб}} = 30,36$ мм, $L = 250,3761$ мм, $\alpha_3 = 2^\circ 19'$, $D_{\text{сж}} = 20,418$ мм.

Сечение витка пружины разделено на 77 элементов (таблицы 4.7, 4.8). Используя выражения (1.1)...(1.35) исследовано напряженно-деформированное состояние неупрочненной пружины $d = 2,6$ мм (рисунок 4.6) при сжатии до соприкосновения витков с учётом влияния дробемётной обработки. Установлено, что осадка неупрочненной пружины при сжатии до соприкосновения витков составит 3,24 мм, величина упругого ядра — $d_0 = 1,99$ мм.

Методом последовательных приближений определим требуемую высоту рабочей части пружины $H_{заг}$ такую, чтобы после приложения нагрузки упрочнения $10F_3$ высота рабочей части упрочненной пружины $H_{раб}$ составила 37,44 мм (рисунок 4.6). Результаты исследований отражены в таблице 4.9.

По данным таблицы 4.9 построены график зависимости высоты рабочей части пружины до упрочнения от высоты рабочей части пружины после упрочнения (рисунок 4.7) и график зависимости величины упругого ядра пружины от высоты рабочей части пружины до упрочнения (рисунок 4.8).

Таблица 4.7. Деление сечения витка пружины на элементы

x, мм y, мм	-1,3	-1,1	-0,9	-0,7	-0,5	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3
0														
0,1						M74	M75	M76	M77					
0,3				M65	M66	M67	M68	M69	M70	M71	M72			
0,5			M54	M55	M56	M57	M58	M59	M60	M61	M62	M63		
0,7		M41	M42	M43	M44	M45	M46	M47	M48	M49	M50	M51	M52	
0,9		M28	M29	M30	M31	M32	M33	M34	M35	M36	M37	M38	M39	
1,1		M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	M22	M23	M24	M25	M26	
1,3	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	

Таблица 4.8. Деление периферии сечения витка пружины на элементы

x, мм y, мм	-1,3	-1,285	-1,237	-1,153	-1,025	-0,831	-0,5	0,5	0,831	1,025	1,153	1,237	1,285	1,3
0														
0,1							M73	M77						
0,3						M64			M72					
0,5					M53				M63					
0,7				M40						M52				
0,9			M27								M39			
1,1		M14											M26	
1,3	M1													M13

Таблица 4.9. Результаты исследований пружины из проволоки диаметром 2,6 мм при упрочнении нагрузкой $10F_3$ (3791,7 Н)

Параметры пружины	Заготовка 1	Заготовка 2	Заготовка 3	Заготовка 4	Заготовка 5	Заготовка 6
$H_{заг}$, мм	42,44	46,00	48,00	50,00	52,00	54,00
$i_{раб}$	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90
d , мм	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60
$\alpha_{0заг}$, °	9°46'	10°35'	11°03'	11°31'	11°59'	12°27'

$D_{\text{заг}}$, мм	20,14	20,09	20,06	20,02	19,99	19,95
$H_{\text{раб}}$, мм	35,77	36,52	36,91	37,19	37,42	37,58
d_0 , мм	1,71	1,54	1,46	1,38	1,32	1,26

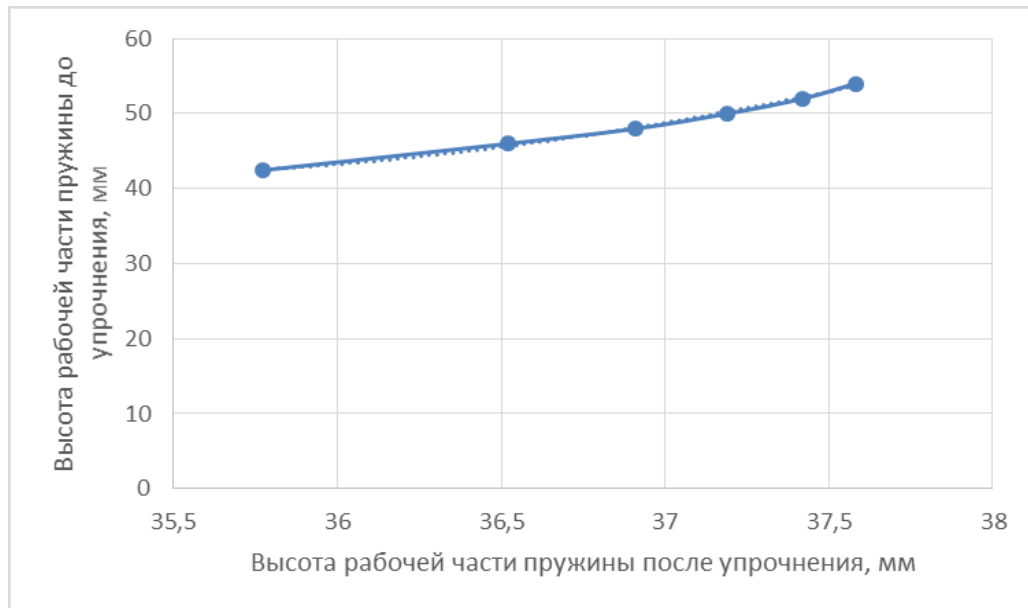


Рисунок 4.7 — График зависимости высоты рабочей части пружины до упрочнения от высоты рабочей части пружины после упрочнения

$$y = 1,892x^2 - 132,61x + 2365,2, \quad (4.8)$$

$$R^2 = 0,9961.$$

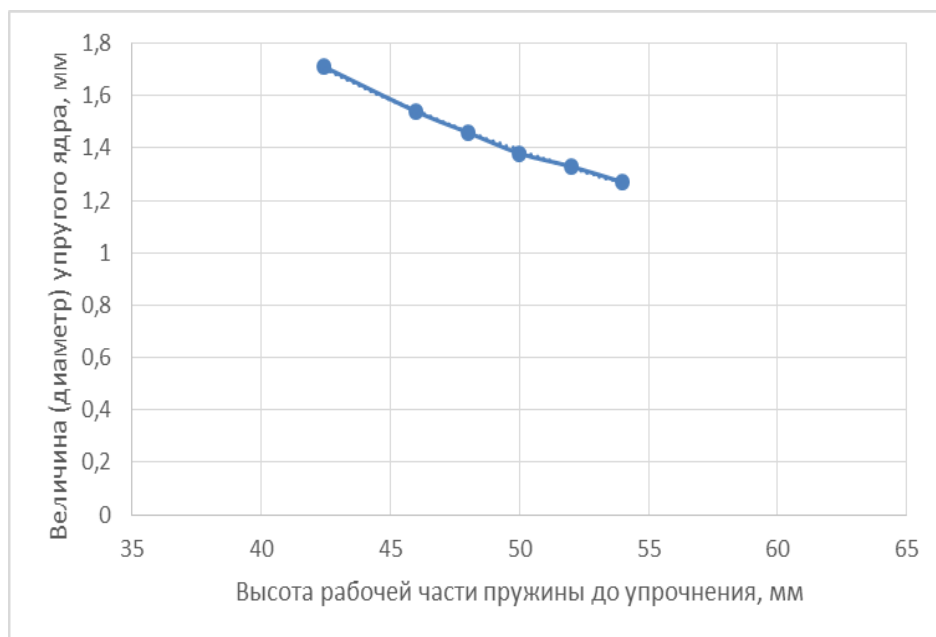


Рисунок 4.8 — График зависимости величины упругого ядра от высоты рабочей части пружины до упрочнения

$$y = 174,58x^{-1,235}, \quad (4.9)$$

$$R^2 = 0,998$$

Из уравнений (4.8) и (4.9) рабочая часть пружины будет равна 37,44 мм при высоте заготовки рабочей части перед упрочнением — 52,29 мм. Величина упругого ядра d_0 при этом составит 1,32 мм, что не выходит за пределы рекомендованного значения $d_0 \geq 0,5 d [90]$ ($1,32 \geq 0,5 \cdot 2,60$).

Исследованная пружина клапана двигателя автомобиля ВАЗ из проволоки диаметром 2,6 мм при упрочнении рекомендованной нагрузкой $10F_3$ окажется работоспособной, поэтому необходимо провести экспериментальное обоснование изготовления и испытания пружины.

4.4 Разработка технологии изготовления пружины уменьшенного сечения проволоки

По предложенному способу [108], совместно с АО «Белебеевский завод „Автонормаль”» разработана технология изготовления пружин [110], представленная в таблице 4.10.

Таблица 4.10. Варианты технологий изготовления внутренней пружины клапана 2101-1007021 (серийные ($d = 2,7$ мм) и экспериментальные ($d = 2,6$ мм))

№ п/п	Серийные пружины 2101-1007021, $d = 2,7$ мм	Экспериментальные пружины Э2101-1007021-12, $d = 2,6$ мм	Примечания, оборудование
1	Входной контроль проволоки на соответствие техническим условиям по ТУ 14-4-1380-91. Предел прочности, испытание на навивку, испытание на кручение, вес	Входной контроль проволоки на соответствие техническим условиям по ТУ 14-4-1380-91. Предел прочности, испытание на навивку, испытание на кручение, вес	-
2	Промывка (обезжиривание)	Промывка (обезжиривание)	-
3	Контроль проволоки магн	Контроль проволоки магн	Дефектоскоп «Ferster»
4	Навивка с отбраковкой дефектных пружин	Навивка с отбраковкой дефектных пружин	Автомат FS-5 Время пролеживания металла после магн. контроля

№ п/п	Серийные пружины 2101-1007021, $d = 2,7$ мм	Экспериментальные пружины Э2101-1007021-12, $d = 2,6$ мм	Примечания, оборудование
			до конца навивки — 72 часа
5	Промывка, сушка перед отпуском	Промывка, сушка перед отпуском	-
6	Отпуск при температуре 410 ± 10 $^{\circ}\text{C}$ в течение 30 минут	Отпуск при температуре 410 ± 10 $^{\circ}\text{C}$ в течение 30 минут	Печь СКЗ 4.30
7	Люминесцентный контроль	Люминесцентный контроль	-
8	Шлифовка торцов	Шлифовка торцов	Полуавтомат FS-6 фирмы «Wafios»
9	Дробемётная обработка в течение 3 минут для снятия заусенцев после шлифовки; ДСЛ-0,5 $A = 0,3$ мм	Дробемётная обработка в течение 10 минут. ДСЛ-0,5; $A = 0,3$ мм	Установка 6GT8,5 – 10R ф.«Carlo Banfi»
10	Разборка сцепленных пружин	Разборка сцепленных пружин	
11	Термоосадка при температуре 380°C . Нагрузка 108...118 Н	-	Установка «Fiat»
12	Дробемётная обработка в течение 10 минут. ДСЛ-0,5; $A = 0,3$ мм	-	-
13	Отпуск при температуре 180°C в течение 25 мин	Отпуск при температуре 180°C в течение 25 мин	Печь СКЗ 4.30
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°C . Нагрузкой $10F_3$ — 3791,7 Н. Время выдержки под нагрузкой 1...1,5 с	Устройство для контактного заневоливания
17	Снятие внутренних фасок	Снятие внутренних фасок	
18	Промывка, сушка	Промывка, сушка	
19	Окончательный контроль	Окончательный контроль	
20	Фосфатирование с промасливанием по ТУ 5.00432	Фосфатирование с промасливанием по ТУ 5.00432	
21	Испытания на КРИП (релаксация нагрузки)	Испытания на КРИП (релаксация нагрузки)	
22	Испытания на выносливость циклическим нагрузкам	Испытания на выносливость циклическим нагрузкам	Стенд DV8-S2, ф.«Gejrg eicherter»

Пластически упрочнять (заневоливать) пружины клапана рекомендуется с использованием устройства [123].

Определим основные параметры устройства по методике [79], описанной в 3 главе.

Исходные данные для проектирования деталей устройства: наружный диаметр пружины клапана внутренней (рисунок 4.6, таблица 4.2) $D_1 = 22,80$ мм; $t = 9,60$ мм; высота сжатой пружины $H_3 = 13,49$ мм; внутренний диаметр пружины $D_2 = 17,60$ мм; $d = 2,60$ мм; $i_{раб} = 3,90$; $F_3 = 379,2$ Н.

Тогда из формул (3.1...3.4): $D_{ВГ} = 23,00$ мм; $H_{ВГ} = 36,49$ мм, примем конструктивно 45 мм; $d_{Ц} = 17,4$ мм; $h_{Ц} = 5,2$ мм, принимаем 5 мм. Диаметр рабочей части пуансона $D_{П}$, мм, можно принять немного меньше внутреннего диаметра втулки — 21 мм.

4.5 Экспериментальное обоснование разработанной технологии

По разработанным технологии [110] (таблица 4.10) с использованием разработанного 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 4.11.

Таблица 4.11. 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
По ТТ чертежа	$136,2+13,7/-6,8$ (129,4...149,9)	$275,4\pm 13,7$ (261,7...289,1)	$151,6\pm 7$ (144,6...158,6)	$287,8\pm 13,7$ (274,1...301,5)
1	135,1	271,6	145,2	284,6
2	139,7	275,3	144,9	287,3
3	141,7	278,2	146,1	285,9
4	141,6	277,6	145,3	285,1
5	133,1	265,9	151,1	275,0
6	139,5	275,0	151,0	275,1
7	138,9	273,8	146,3	286,0
8	136,5	270,0	147,1	289,0
9	132,8	264,1	145,5	285,2
10	130,5	263,5	149,0	277,1
11	133,6	264,4	151,2	276,0

№ п/п	Серийные пружины		Экспериментальные пружины	
	12	139,5	278,0	155,5
13	139,4	275,0	151,3	276,2
14	136,5	270,1	149,1	277,5
15	138,1	267,3	150,1	274,1
16	133,4	266,3	145,0	284,7
17	139,0	276,1	146,1	286,1
18	136,0	270,0	156,0	292,0
19	135,0	271,1	151,0	275,0
20	133,5	267,2	145,3	285,0
21	134,0	268,1	146,1	286,0
22	139,0	274,1	151,2	275,9
23	135,8	271,6	144,8	287,1
24	138,0	269,1	156,0	293,0
min	130,5	263,5	144,8	273,1
max	141,7	278,2	156,0	293,0
X	136,7	271,0	148,8	282,8
R	11,2	14,7	11,2	19,9

При анализе таблицы 4.11 можно сделать следующие выводы. Замеры серийной пружины клапана 2101-1007021 показали, что сила F_2 находится в пределах 263,5...278,2 Н, что не превышает допусковых отклонений $275,4 \pm 13,7$ Н. Рассеивание рабочей нагрузки составляет 14,7 Н.

Работы по изготовлению экспериментальной партии пружин Э2101-1007021-11 ($T = 250$ °С) из проволоки 2,6 Oteva 70SC (2,6 VD SiCr DIN EN 10270-2) показали, что сила пружин F_2 находится в пределах 274,1...293,0 Н и не выходит за пределы допусковых (расчетных) отклонений $287,8 \pm 13,7$ Н. Исключена операция трехкратной холодной осадки. Рассеивание рабочей нагрузки составляет 19,9 Н, что на 35 % больше, чем у серийных пружин.

Разработанные способ изготовления пружин с применением термомеханического упрочнения и устройство для контактного заневоливания пружины клапана работоспособны.

Новая технология изготовления пружин клапанов с применением устройства для упрочнения обеспечивает внутренней пружине клапанов (Э2101-1007021-12) из проволоки сечением 2,6 мм по стандарту DIN EN10270.2-VD SiCr соответствие геометрическим и силовым параметрам.

Для оценки эффективности применения нового устройства для упрочнения пружин уменьшенного сечения и технологии их изготовления следует провести сравнительные испытания на стойкость к циклическим нагрузкам партий серийных и экспериментальных пружин.

4.6 Оценка эффективности применения разработанной технологии

После изготовления [110] как экспериментальные пружины, так и серийные для испытания на стойкость циклическим нагрузкам от H_0 до H_2 в количестве по 96 шт. были установлены на стенд резонансного типа DV8-S2 фирмы «Gejrg Reicherter», Германия (рисунок 3.12).

Результаты сравнительных испытаний [110] серийных и экспериментальных пружин, изготовленных по новой технологии на стойкость к циклическим нагрузкам, представлены в таблицах 4.12...4.13.

Таблица 4.12. Результаты испытаний серийных пружин 2101-1007021 ($d = 2,7$ мм) на стойкость к циклическим нагрузкам 6 млн циклов

№ п/п	до испытаний		после испытаний		ΔF_1 , %	ΔF_2 , %
	F_1 , Н	F_2 , Н	F_1 , Н	F_2 , Н		
По ТТ чертежа	136,2+13,7/-6,8 (129,4...149,9)	275,4±13,7 (261,7...289,1)	-	-	-	-
1	135,1	271,6	134,0	268,6	0,81	1,11
2	139,7	275,3	139,2	273,5	0,36	0,65
3	141,7	278,2	140,3	274,8	0,99	1,18
4	141,6	277,6	141,1	275,6	0,35	0,72
5	133,1	265,9	132,9	263,5	0,22	0,90
6	139,5	275,0	139,0	272,3	0,36	0,98
7	138,9	273,8	138,7	272,5	0,14	0,47
8	136,5	270,0	136,2	268,1	0,07	0,70
9	132,8	264,1	132,7	262,9	0,22	0,45
10	130,5	263,5	130,4	262,3	0,08	0,46
11	133,6	264,4	133,5	264,4	0,07	0
12	139,5	278,0	138,9	275,0	0,43	1,08
13	139,4	275,0	138,9	273,0	0,35	0,73
14	136,5	270,1	136,1	267,3	0,29	1,04
15	138,1	267,3	137,6	265,3	0,36	0,75
16	133,4	266,3	133,4	266,0	0	0,11
17	139,0	276,1	138,6	273,5	0,29	0,94

18	136,0	270,0	135,8	268,4	0,14	0,59
19	135,0	271,1	134,6	268,2	0,29	0,11
20	133,5	267,2	133,5	267,0	0	0,07
21	134,0	268,1	133,9	267,1	0,07	0,37
22	139,0	274,1	138,7	271,4	0,21	0,98
23	135,8	271,6	135,5	268,8	0,22	1,03
24	138,0	269,1	137,8	266,5	0,15	0,97
min	130,5	263,5	130,4	262,3	0	0
max	141,7	278,2	141,1	275,6	0,99	1,18
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

Проверка информации на наличие выпадающих точек осуществлена по критерию Ирвина. Коэффициент Ирвина, опытный для наименьшего значения нагрузки F_2 , после испытания равен 0,16. Опытное значение коэффициента Ирвина сравниваем с табличным [129]. Так как $0,16 \leq 1,26$, информация является достоверной. Коэффициент Ирвина для наибольшего значения нагрузки F_2 после испытания равен 0,16. Так как $0,16 \leq 1,26$, информация является достоверной.

Таблица 4.13. Результаты испытаний экспериментальных пружин ($d = 2,6$ мм) Э2101-1007021-12 на стойкость к циклическим нагрузкам 10 млн циклов

№ п/п	до испытаний		после испытаний		ΔF_1 , %	ΔF_2 , %
	F_1 , Н	F_2 , Н	F_1 , Н	F_2 , Н		
По ТТ чертежа	151,6±7 (144,6...158,6)	287,8±13,7 (274,1...301,5)	-	-	-	-
1	145,2	284,6	144,5	283,0	0,48	0,56
2	144,9	287,3	144,1	285,5	0,55	0,62
3	146,1	285,9	146,0	285,7	0	0
4	145,3	285,1	144,7	283,8	0,41	0,46
5	151,1	275,0	150,6	274,0	0,33	0,36
6	151,0	275,1	150,8	274,3	0,13	0,29
7	146,3	286,0	146,2	285,8	0	0
8	147,1	289,0	146,5	287,1	0,40	0,65
9	145,5	285,2	145,3	284,9	0	0
10	149,0	277,1	148,9	276,8	0	0
11	151,2	276,0	150,7	275,0	0,33	0,36
12	155,5	290,2	154,1	287,1	0,90	1,08
13	151,3	276,2	150,8	275,1	0,33	0,39
14	149,1	277,5	148,8	276,5	0,20	0,36
15	150,1	273,1	150,0	272,9	0	0,07
16	145,0	284,7	144,4	282,6	0,41	0,74
17	146,1	286,1	146,0	285,9	0	0

18	156,0	292,0	154,4	288,9	1,03	1,06
19	151,0	275,0	150,7	274,2	0,20	0,29
20	145,3	285,0	144,7	283,7	0,41	0,46
21	146,1	286,0	146,0	285,6	0	0,14
22	151,2	275,9	150,6	275,1	0,40	0,29
23	144,8	287,1	144,8	286,7	0	0,14
24	156,0	293,0	154,5	290,5	0,96	0,92
min	144,8	273,1	144,1	272,9	0	0
max	156,0	293,0	154,5	290,5	1,03	1,08
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

Коэффициент Ирвина для наименьшего значения нагрузки F_2 после испытания равен 0,18. Так как $0,18 \leq 1,26$, информация является достоверной. Коэффициент Ирвина для наибольшего значения нагрузки F_2 после испытания равен 0,26. Так как $0,26 \leq 1,26$, информация является достоверной.

Партия серийных пружин 2101-1007021 выдержала форсированные испытания на стойкость к циклическим нагрузкам 6 млн циклов. Партия экспериментальных пружин Э2101-1007021-12 выдержала форсированные испытания на стойкость циклическим нагрузкам 10 млн циклов без поломок. Необходимо отметить, что при этом уменьшение рабочей нагрузки серийных пружин ΔF_{2max} составило 1,18 %, экспериментальных пружин — $\Delta F_{2max} = 1,08$ %.

Испытания пружин [110] на релаксационную стойкость «КРИП» проведены согласно требованиям FIAT-BAZ. Методика заключается в следующем:

- замер силы пружины F_2 , Н;
- сжатие пружин (5 шт.) в специальном приспособлении для испытаний на «КРИП» до высоты $H_2 = 20$ мм;
- выдержка в течение 48 часов в лабораторной печи при температуре 130 ± 2 °С;
- замер силы пружины после испытаний F_2' , Н;
- расчет потери силы $\Delta F_2 = [(F_2 - F_2') / F_2] \cdot 100$, %.

Результаты испытаний представлены в таблицах 4.14, 4.15.

Таблица 4.14. Результаты испытаний серийных пружин 2101-1007021 ($d = 2,7$ мм) на релаксационную стойкость «КРИП»

№ п.п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>X</i>	<i>R</i>
$\Delta F_2, \%$	1,43	1,45	1,80	1,46	1,43	1,43	1,43	2,13	1,44	1,92	1,43	2,13	1,59	0,70

Таблица 4.15. Результаты испытаний экспериментальных пружин ($d = 2,6$ мм) Э2101-1007021-12 на релаксационную стойкость «КРИП»

№ п.п	1	2	3	4	5	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>X</i>	<i>R</i>
$\Delta F_2, \%$	2,12	0,70	1,50	1,50	1,50	0,70	2,12	1,46	1,42

Испытания на КРИП и расчеты показали, что у серийных пружин потеря силы F_2 составила от 1,43 % до 2,13 %, а у экспериментальных 0,7 % до 2,12 %.

Новая технология изготовления пружин клапанов с применением устройства для упрочнения обеспечивают внутренней пружине клапанов (Э2101-1007021-12) из проволоки сечением 2,6 мм по стандарту DIN EN10270.2-VD SiCr повышение ресурса более чем на 40 % [110].

Выводы по разделу

1. Предложено 4 варианта экспериментальных клапанных пружин ДВС автомобиля ВАЗ уменьшенного сечения проволоки. В результате расчета технологических параметров определен наиболее эффективный вариант с точки зрения снижения массы и обеспечения работоспособности пружин.

2. Установлено, что разработанная технология изготовления пружин клапанов обеспечивает внутренней пружине клапанов из проволоки Oteva 70 уменьшенного сечения диаметром 2,6 мм:

- соответствие геометрических и силовых параметров;
- повышение циклической долговечности более чем на 40 %.

Проверка результатов испытаний разработанной технологии по критерию Ирвина показала отсутствие в них грубой погрешности.

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 упрочненной зоне. Предложена методика определения зависимости высоты рабочей части пластически упрочненной 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.

Результаты работы рекомендованы к внедрению в производственные процессы АО «БелЗАН» (г. Белебей, Приложение А), ООО «Фирма „Спринг-Центр”» (г. Санкт-Петербург, Приложение Б) и другие предприятия России.

Результаты работы рекомендованы к внедрению в учебный процесс направления подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (г. Ставрополь, Приложение В).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Землянушнов, Н.А. Повышение ресурса высоконагруженных пружин сжатия: монография / Н.А. Землянушнов, Н.Ю. Землянушнова, А.А. Порохня. — Ставрополь: СКФУ, 2019. — 169 с.
2. Лавриненко, Ю.А. Разработка технологии изготовления высоконагруженных пружин сжатия: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.09. — Орёл, 2018. — 284 с.
3. Тебенко, Ю.М. Оценка ремонтпригодности винтовых цилиндрических пружин сжатия / Ю.М. Тебенко, Н.Ю. Землянушнова, Е.Г. Белков, Н.А. Землянушнов // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. — 2010. — № 2. — С. 37-41.
4. Белков, Е.Г. Основы проектирования технологических процессов и оборудования для безопрочной навивки пружин, пружинных шайб и колец: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.05. — Челябинск, 1988. — 426 с.
5. Белогур, В.П. Исследование релаксационной стойкости винтовых цилиндрических пружин при длительной выдержке под нагрузкой / В.П. Белогур, В.В. Ворошилин, Г.А. Данилин, А.В. Титов, Ю.С. Кукуня // Металлообработка. — 2014. — № 3(81). — С. 30-35.
6. Землянушнова, Н.Ю. Совершенствование процесса контактного заневоливания винтовых цилиндрических пружин: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05. — Новочеркасск, 2007. — 193 с.
7. Знаменский, Д.В. Исследование изменения характеристик клапанных пружин при эксплуатации / Д.В. Знаменский, Н.Ю. Землянушнова, В.В. Фадеев // Вестник АПК Ставрополя. — Ставрополь. — 2014. — № 2 (14). — С. 43-47.
8. Фадеев, В.В. Совершенствование технологии изготовления клапанных пружин для обеспечения энергосбережения и повышения качества: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05. — Белебей, 2003. — 185 с.

9. Шаврин, О.И. Производство высокопрочных винтовых пружин: монография / О.И. Шаврин. — Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2019. — 196 с.
10. Manouchehrynia, R. Fatigue-based reliability in assessing the failure of an automobile coil spring under random vibration loadings / R. Manouchehrynia, S. Abdullah, S.S.K. Singh // *Engineering Failure Analysis*. — 2022. — Vol. 131. — pp. 105808.
11. Землянушнов, Н.А. К анализу отказов агрегатов и систем автотранспортных средств, вызванных релаксацией автомобильных пружин / Н.А. Землянушнов // *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. — 2018. — № 10. — С. 81-86.
12. Землянушнова, Н.Ю. Экспериментальное обоснование новых технологий восстановления внутренней пружины клапана / Н.Ю. Землянушнова, Ю.М. Тебенко, В.В. Фадеев, Н.А. Землянушнов // *Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России*. — 2012. — № 1. — С. 10-16.
13. Лянденбургский, В. В. Анализ первичных неисправностей топливной аппаратуры дизелей / В. В. Лянденбургский, С. А. Кривобок, И. В. Кучин // *Мир транспорта и технологических машин*. — 2013. — № 4(43). — С. 13-18.
14. Лянденбургский, В. В. Определение неисправностей коробки передач автомобилей встроенными средствами диагностирования / В. В. Лянденбургский, М. В. Нефедов, В. Н. Боровков // *Транспортные и транспортно-технологические системы : Материалы международной научно-технической конференции, Тюмень, 16 апреля 2015 года / Ответственный редактор Н. С. Захаров*. — Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. — С. 188-191.
15. Ali, M. The needs to investigate the effect of road surface vibrations to the fatigue life of a coil spring / Ali, M., Husaini, Putra, T. E., Ali, N. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2019. Vol. 602 (1), 012089.
16. Putra, T. E. Analysis of surface failure of coil spring in passenger vehicle suspension system // Putra, T. E., Husaini, Ali, N., Machmud, M. N., Bakhtiar, A.,

Hendrayana // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. Vol. 523 (1), 012072.

17. Putra, T. E. Numerical analysis of the stress leading to fatigue failure on a coil spring of the front suspension of a car / Putra, T.E., Email Author, Husaini, Ali, N., Hasanuddin, I., Hendrayana, Bakhtiar, A. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. Vol. 523 (1), 012066.

18. Марков, М. А. Пружины рессорного комплекта тележек грузовых вагонов / А. М. Марков, А. В. Габец, Д. А. Габец, Д. В. Гавриков // Актуальные проблемы в машиностроении. — 2016. — № 3. — С. 194-198.

19. Способ формообразования профильного участка вагонной пружины железнодорожного транспорта / С. Г. Емельянов, М. С. Разумов, С. А. Чевычелов [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. — 2013. — № 2. — С. 023-028.

20. Шаврин, О. И. Высокопрочные пружины для подвижного состава железных дорог / О. И. Шаврин // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. — 2012. — № 3(19). — С. 71-80.

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

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

23. Лавриненко, Ю. А. Изготовление высоконагруженных пружин сжатия. М.: Инновационное машиностроение, 2017. — 224 с.

24. Лавриненко, Ю. А. Исследование влияния температуры и времени выдержки под нагрузкой на величину остаточной деформации при термоосадке пружин сжатия / Ю. А. Лавриненко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2017. — № 6(326). — С. 61-63.

25. Лавриненко, Ю. А. Математическая модель процесса упрочнения пружин клапана двигателей автомобилей / Ю. А. Лавриненко // Заготовительные производства в машиностроении. — 2017. — Том 15. № 7. — С. 302-310.

26. Лавриненко, Ю. А. Метод форсированных испытаний пружин клапана на выносливость / Ю. А. Лавриненко // Автомобильная промышленность. — 2010. — № 8. — С. 26-27.

27. Лавриненко, Ю. А. Параметры тройного упрочнения пружин клапана двигателей ВАЗ / Ю. А. Лавриненко // Пружины. — 2016. — № 1. — С. 34-36.

28. Лавриненко, Ю. А. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления высоконагруженных пружин сжатия / Ю.А. Лавриненко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2017. — № 9 (1). — С. 421-428.

29. Лавриненко, Ю. А. Рассеивание геометрических и силовых параметров при изготовлении пружин сжатия / Ю. А. Лавриненко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2017. — № 5(325). — С. 86-90.

30. Лавриненко, Ю. А. Схематизированная диаграмма деформирования τ - γ пружинной проволоки, построенная по результатам пластической осадки пружин / Ю. А. Лавриненко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2017. — № 4-1 (324). — С.124-127.

31. Лавриненко, Ю. А. Требования к материалам и способы упрочнения пружин клапана двигателей внутреннего сгорания / Ю. А. Лавриненко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2017. — № 3(323). — С. 117-124.

32. Лавриненко, Ю. А. Упрочнение пружин / Ю. А. Лавриненко, Е. Г. Белков, В. В. Фадеев. — Уфа: Изд. Дом «Бизнес-Партнёр», 2002. — 124 с.

33. Фадеев, В. В. Повышение эффективности технологий высокоресурсных клапанных пружин для двигателей ВАЗа / В. В. Фадеев // Повышение качества пружин, торсионов и рессор: сб. науч. тр. II Всероссийской науч. - техн. конф. с международным участием. — Белорецк, 2001. — С. 90-96.

34. Zemlyanushnov, N. A. Theoretical background of method of springs recovering / N. A. Zemlyanushnov, N. Y. Zemlyanushnova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2018. — Vol. 194(4). — pp. 042027.

35. Zemlyanushnova, N. Y. Stress—strain state of the valve spring in an auto engine during plastic hardening / N. Y. Zemlyanushnova, A. A. Porokhin, N. A. Zemlyanushnov // Russian Engineering Research. — 2016. — Vol. 36(7). — pp. 535-540.

36. Землянушнов, Н. А. Совершенствование способа восстановления автомобильных пружин / Н. А. Землянушнов, Н. Ю. Землянушнова // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2020. — № 2. — С. 100-106.

37. Мкртумян, В. С. Исследование работы клапанных пружин и разработка рационального способа их восстановления: дис.... канд. техн. наук: 05.20.03. — Москва, 1958. — 196 с.

38. Элькин, С. Ю. Разработка технологии восстановления клапанных пружин двигателей мобильной сельскохозяйственной техники с использованием электромеханической обработки : дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03. — Саратов, 1984. — 198 с.

39. Гребенников, С. А. Изменение технического состояния и способ диагностирования механизма газораспределения ДВС / С. А. Гребенников, М. Г. Петров, А. С. Гребенников // Автомобильная промышленность. — 2011. — № 9. — С. 25-30.

40. Белков, Е. Г. Исследование процесса навивки пружин с межвитковым давлением на автоматах / Е. Г. Белков // Кузнечно-штамповое производство. — 1974. — № 9. — С. 18—20.

41. Белков, Е. Г. Оптимальный угол приложения усилия шагообразования при безоправочной навивке пружин / Е. Г. Белков, Ю. А. Лавриненко, М. Г. Соломатов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Машиностроение. Вып. 2. — 2002. — № 6. — С. 41-45.

42. Белков, Е. Г. Холодная навивка пружин / Е. Г. Белков. — Иркутск: Изд. Иркутского ун-та, 1987. — 96 с.

43. Заседателев, С. М. О навивке пружин с межвитковым давлением / С. М. Заседателев // Расчёты упругих элементов машин и приборов: Тр. МВТУ. — 1952. — № 16. — С. 90-95.
44. Навроцкий, Г. А. Навивка пружин на автоматах / Г. А. Навроцкий, Е. Г. Белков. — М.: Машиностроение, 1978, — 143 с.
45. Соломатов, М. Г. Совершенствование процесса безоправочной навивки ответственных пружин сжатия: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05. — Челябинск, 2003. — 148 с.
46. Белков, Е. Г. Технология изготовления и упрочнения пружин: монография / Е. Г. Белков. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. — 168 с.
47. Тебенко, Ю. М. Проблемы производства высокоскоростных пружин и пути их решения. Монография. — Ставрополь: ООО «Мир данных», 2007. — 152 с.
48. Остроумов, В. П. Повышение динамической прочности пружин / В. П. Остроумов, В. А. Карпунин. — Москва: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. — 111 с.
49. Лавриненко, В. Ю. Разработка математической модели упрочнения высоконагруженных пружин сжатия дробемётной обработкой // В. Ю. Лавриненко, Ю. А. Лавриненко // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2018. — Т. 14. — № 11(167). — С. 508-511.
50. Саверин, М. М. Дробеструйный наклёп. — М.: Машгиз, 1955. — 136 с.
51. Шаврин, О. И. К вопросу об эффективности обработки дробью винтовых пружин сжатия / О. И. Шаврин // Вестник Ижевского государственного технического университета. — 2013. — № 1. — С. 27-29.
52. А. с. 122920 СССР, Класс 42к, 25. Способ заневоливания винтовых пружин сжатия / Шалин В. Н., Епифанов А. М. — № 621371/25; заявлено 06.03.59; опубл. 1959. Бюл. № 19. — 4 с.
53. Лавриненко, Ю. А. О рассеивании геометрических и силовых параметров при изготовлении пружин / Ю. А. Лавриненко, Е. Г. Белков //

Прогрессивные технологии в машиностроении : сб. науч. тр. Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 2002. — С. 129-131.

54. Зайдес, С. А. Оценка напряженно-деформированного состояния при упрочнении цилиндрических деталей роликом с асимметричным профилем / С. А. Зайдес, А. В. Колесник // Научно-технические технологии в машиностроении. — 2019. — № 9(99). — С. 18-25.

55. Применение вибрационных технологий для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей / А. П. Бабичев, П. Д. Мотренко, В. А. Лебедев [и др.] ; Донской государственный технический университет. — Ростов-на-Дону, 2006. — 213 с.

56. Фролов, Г. Н. Точность изготовления упругих элементов приборов / Г. Н. Фролов. — М.: Машиностроение. — 1966. — 175 с.

57. Пат. EP 0645462 B1, Int. Cl.⁷ C 21 D 9/02, C 21 D 7/06, F 16F 1/02. Verfahren zur Optimierung der Eigenspannungsverteilung in Federelementen / Vondracek, Hans, Ing. — № 94113265.6; заявлено 11.09.93; опублик. 29.03.95, Patentblatt № 13. — 5 с.

58. А. с. 1579613 A2 SU, МКЛ. В 21 F 3/04. Способ изготовления пружин / Редькин Л. М., Потапов А. С., Селезнев А. П. — № 4484986/25-12; заявл. 20.09.88; опублик. 23.07.90. Бюл. №27. — 3 с.

59. Семаков, В. О многообразии моделей пружин подвесок автомобилей ВАЗ, их производстве, эксплуатации и взаимозаменяемости / В. Семаков // За рулём. — 1998. — №5. — С. 244-245.

60. Пат. RF 2467646, Int. Cl.³ B 21 F 35/00, 3/04; B 60 G 11/14; F 16 F 1/06. Procédé de fabrication d'un ressort h'licoïdal léger / Bernard Criqui, Georges Decouzon. — № 7926209; заявлено 23.10.79; опублик. 30.04.81. Listes № 18. — 8 с.

61. Пат. US 3847678 Int. Cl. C21 d 9/02, C21 d 7/14, C22 c 39/44. Helical Steel Springs and Method / Samuel T. Furr, Emmaus, Pa. № 307,282; заявлено 16.11.72; опублик. 12.11.74. — 7 с.

62. Пат. US 5225008 МПК С 21 D 9/02. Способ изготовления высоконагруженных пружин / Hiroshi Koyama, Yasio Sato, Katsuyuki Nishioka,

Akira Tange, Taday Akutsu. — № 851,989; заявлено 13.03.92; опубл. 06.07.93. — 10 с.

63. Пат. RU 2208056 С2, МПК С 21 D 9/02. Способ изготовления высоконагруженных пружин сжатия / Лавриненко Ю. А., Белков Е. Г., Фадеев В. В., Хайруллин А. А. — № 2001103765/02; заявлено 08.02.01; опубл. 10.07.03. Бюл. № 19. — 4 с.

64. А. с. 257430 СССР, МПК В 21f Кл. 7d, 2. Способ изготовления пружин / Кальнер Д. А., Степанянц М. И., Морозов А. П., Шахов М. А., Шибалова С. С., Перминов Г. М., Нахалов В. А. — № 1219846/25—27; заявлено 19.11.68; опубл. 20.11.69, Бюл. № 36. — 2 с.

65. А. с. 1186659 SU А1, МПК С 21 D 8/00, 9/02. Способ отпуска пружин из среднеуглеродистых сталей / Исмагилов М. М., Забильский В. В. — № 3722317/22—02; заявлено 04.04.84; опубл. 23.10.85. Бюл. № 39. — 2 с

66. А. с. 688528 СССР, МПК С 21 D 9/02, С 21 D 7/14, В 21F 3/02. Способ изготовления пружин / Ясенчук П. Д., Ясенчук Б. Д., Ясенчук Г. Д., Ясенчук О. Д. — № 2500621/22—02; заявлено 27.06.77; опубл. 30.09.79, Бюл. № 36. — 2 с.

67. Редькин, Ю. А. Разработка научных основ управления качеством производства пружин с применением ВТМО: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08. — Ижевск, 1999. — 445 с.

68. А. с. 1234018 SU, МПК В 21 F 35/00. Способ изготовления крупногабаритных пружин / Шаврин О. И., Редькин Л. М., Щербаков В. И., Маслов Л. Н., Коньшев В. Н. — № 3781269/25—12; заявлено 13.08.84; опубл. 30.05.86. Бюл. № 20. — 2 с.

69. Гурьянов, Г. Н. Эффективность старения проволочных пружин из сплава ЭП—543У в свободном и напряжённом состояниях / Г. Н. Гурьянов, А. В. Копьев, В. В. Покачалов // Материаловедение и современные технологии. Межрег. сб. науч. тр. под ред. Ю. А. Баландина / МГТУ. — Магнитогорск, 2002. — С. 98—107.

70. Белков, Е. Г. Исследование напряжённо-деформированного состояния при формообразовании винтовых цилиндрических пружин с витком круглого сечения / Е. Г. Белков // Изв. ВУЗов. Машиностроение. — 1988. — С. 31-36.

71. Белков, Е. Г. О предельном нагружении круглого стержня при одновременном воздействии изгибающего и крутящего моментов, осевой и перерезывающей сил / Е. Г. Белков, Ю. А. Лавриненко, М. Г. Соломатов // Технологии и машины обработки давлением : Юбилейный сборник научных трудов каф. КТБОМД, Челябинск : Издат АН РФ. — 2003. — С. 127-129.

72. Белков, Е. Г. Результаты испытаний на выносливость пружин клапана двигателя ВАЗ-2112 / Е. Г. Белков, Ю. А. Лавриненко, В. В. Фадеев, Г. В. Шеркунов // Абразивный инструмент и металлообработка : сб. науч. тр. — Челябинск: ЦНТИ. — 2001. — С. 122-125.

73. Редькин, Л. М. Эффективность управления пространством качества в производстве пружин / Л. М. Редькин, О. И. Шаврин // Труды «Университеты России». Машиностроение, приборостроение, экономика «Фундаментальные исследования новых технологий и автоматизации производства в машиностроении». — М., МГУ, 1994. — Вып. 1. — С. 117-121.

74. Шаврин, О. И. Влияние ВТМО на повышение долговечности жестких винтовых пружин / О. И. Шаврин, Л. М. Редькин // Сб. докладов «Современные материалы и методы упрочнения пружин и упругих элементов машин и приборов». — М., ЦНИИинформация, 1978. — С. 41-43.

75. Шаврин, О. И. Высокотемпературная термомеханическая обработка пружин / О. И. Шаврин, Л. М. Редькин, В. В. Игнатъев // Производственно-технический бюллетень (ПТБ). — 1974. — № 11. — С. 15-17.

76. Redkin, L. M. The unity of design and technical solutions in the basis of the quality range control at the spring manufacture / L. M. Redkin, O. I. Shavrin // Сб. МАТК «Motauto'97». — Болгария, Russe, 1997. — Vol.1. — ISBN 954-90272-I-X. — P. 202-206.

77. ГОСТ 16118—70. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Технические условия. М.: Госстандарт, 1985.

78. Крюков, Б. Н. О влиянии контактных напряжений от соударения витков пружин на их живучесть / Б. Н. Крюков // Производственно-технический бюллетень. — 1977. — № 4. — С. 58-61.

79. Землянушнова, Н. Ю. Повышение качества пружин. Монография / Н. Ю. Землянушнова, Ю. М. Тебенко. — Ставрополь : СевКавГТУ, 2001. — 92 с.

80. Землянушнова, Н. Ю. Расчёт винтовых цилиндрических пружин сжатия при контактном заневоливании: монография / Н. Ю. Землянушнова. — Ставрополь: АГРУС, 2008. — 136 с.

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

82. Дорохов, Д. О. Управляемое градиентное упрочнение осесимметричных изделий комплексным локальным нагружением очага деформации: дис. докт. техн. наук: 05.02.09. — Орел: 2018. — 283 с.

83. Дорохов, Д. О. Перспективы применения комплексного локального деформирования к изготовлению биметаллических подшипников / Д. О. Дорохов, А. А. Кисловский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2013. — № 3-2(299). — С. 99-102.

84. Голенков, В. А. Формирование градиентных субмикро- и наноструктурных состояний комплексным локальным нагружением очага деформации / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, Д. О. Дорохов // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2009. — № 3(51). — С. 54-56.

85. Голенков, В. А. Классификация процессов комплексного локального деформирования / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, Д. О. Дорохов, И. М. Грядунюв // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2010. — № 6(284). — С. 85-89.

86. Голенков, В. А. Научноёмкая технология обработки давлением с комплексным локальным нагружением очага деформации / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, Д. О. Дорохов // Научноёмкие технологии в машиностроении. — 2011. — № 3. — С. 31-37.

87. Голенков В. А. Научные основы упрочнения комплексным локальным деформированием / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, Д. О. Дорохов, Г. П. Короткий. — Москва, Орёл: ООО «Издательство Машиностроение» Госуниверситет - УНПК, 2013. — 122 с. — ISBN 978-5-94275-655-0.

88. Землянушнов, Н. А. Совершенствование устройства для упрочнения винтовых цилиндрических пружин методом комплексного локального нагружения / Н. А. Землянушнов, Д. О. Дорохов, С. Ю. Радченко, Н. Ю. Землянушнова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2023. — № 3(359). — С. 33-43.

89. Рахштадт, А. Г. Пружинные стали и сплавы. — 3-е изд. перераб. и доп. / А. Г. Рахштадт. — М.: Металлургия, 1982. — 400 с.

90. Пономарев, С. Д. К обоснованию размеров упругого ядра в заневоленных пружинах / С. Д. Пономарёв // Изв. вузов. — Машиностроение, 1974. — № 10. — С. 24-27.

91. Блинник, С. И. Расчёт пружин в связи с их заневоливанием / С. И. Блинник // Новые методы расчёта пружин / Под общей редакцией С. Д. Пономарёва — М. : Машигиз. — 1946. — С. 26-46.

92. А. с. 198747 СССР, Класс 42к, 25, М. Кл. G01 m. Приспособление для контактного заневоливания пружин / Крюков Б. Н. — № 813750/25-28; заявл. 10.01.1963; опубл. 24.08.1967. Бюл. № 14 за 1967 г. — 2 с.

93. А. с. 348792 СССР, МПК F16f 1/00. Устройство для контактного заневоливания пружин / Тебенко Ю. М. — № 1318771/25—28; заявлено 07.04.69; опубл. 23.08.72, Бюл. № 25. — 2 с.

94. А. с. 419660 СССР, МПК F16f 1/00. Устройство для контактного заневоливания пружин / Тебенко Ю. М. — № 1857065/25—27; заявлено 15.12.72; опубл. 15.03.74, Бюл. № 10. — 3 с.

95. А. с. 634684 СССР, М. Кл. F16F1/04. Устройство для контактного заневоливания пружин / Крюков Б. Н., Вишнев М. И., Вендров И. Я. — № 2443609/25-28; заявл. 19.01.1977; опубл. 25.01.1979. Бюл. № 3. — 2 с.

96. Пат. RU 2251036 С1, МПК F16F 1/04, B21F 35/00. Устройство для контактного заневоливания пружин / Землянушнова Н. Ю. — № 2003130451/11; заявлено 14.10.03; опубл. 27.04.05, Бюл. № 12. — 3 с.

97. Пат. RU 2251037 С1, МПК F16F 1/04, B21F 35/00. Устройство для контактного заневоливания пружин / Землянушнова Н. Ю. — № 2003130491/11; заявлено 15.10.03; опубл. 27.04.05, Бюл. № 12. — 3 с.

98. Пат. RU 2286556 С1, МПК G01M 13/00, F16 F1/04. Устройство для контактного заневоливания пружин / Землянушнова Н. Ю. — № 2005108794/28; заявлено 28.03.2005; опубл. 27.10.2006, Бюл. № 30. — 4 с.

99. Пат. RU 2296968 С2, МПК G01M 13/00, B21F 35/00. Устройство для контактного заневоливания пружин / Землянушнова Н. Ю. — № 2005108799/28; заявлено 28.03.2005; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 10. — 5 с.

100. Пат. RU 2390667 С1, МПК F16F 1/06, B21F 35/00. Устройство для контактного заневоливания пружин / Тебенко Ю. М., Землянушнова Н. Ю., Землянушнов Н. А. — № 2009109521/11; заявлено 16.03.2009; опубл. 27.05.2010, Бюл. № 15. — 5 с.

101. Пономарев, С. Д. Упругопластические расчёты в связи с холодной навивкой цилиндрических пружин / С. Д. Пономарёв // Труды МАИ. — М. : Государственное издательство оборонной промышленности, 1952. — № 17. — С. 10-25.

102. Иосилевич, Г. Б. Прикладная механика / Г. Б. Иосилевич, П. А. Лебедев, В. С. Стреляев. — М. : Машиностроение, 1985. — 576 с.

103. Пономарёв, С. Д. Расчёты на прочность в машиностроении. Т. II / С. Д. Пономарёв, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарёв, В. М. Макушин, Н. Н. Малинин, В. И. Феодосьев. — М. : МАШГИЗ, 1958. — 974 с.

104. Чепа, П. А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным деформированием / П. А. Чепа. — Минск : Наука и техника. — 1981. — 127 с.

105. Веселовский, В. А. Разработка технологии пластической обработки прядей стальных канатов двойной свивки: Дис... канд. техн. наук / В. А. Веселовский. — Новочеркасск, 1988. — 174 с.

106. Пономарев, С. Д. Пружины, их расчёт и конструирование / С. Д. Пономарев. — Москва: МАШГИЗ, 1954. — 183 с.

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

108. Пат. RU 2464119 C1, МПК В21F 35/00, С21D 9/02. Способ изготовления высоконагруженных пружин сжатия / Землянушнов Н. А., Тебенко Ю. М., Землянушнова Н. Ю. — № 2011118220/02; заявлено 05.05.2011; опубл. 20.10.2012, Бюл. № 29. — 3 с.

109. Zemlyanushnova, N. Y. Increasing the resource of high load compression springs / N. Y. Zemlyanushnova, N. A. Zemlyanushnov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2017. — Vol. 87(8). — pp. 082056.

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

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

112. Крымчанский И. И. Пружинная проволока в мировой и отечественной промышленности // Пружины. — 2016. — № 1(1). — С. 19-26.

113. Лавриненко Ю. А. Разработка технологии изготовления пружины клапана двигателя легкового автомобиля // Заготовительные производства в машиностроении. — 2017. — Т. 15. — № 12. — С. 547-554.
114. Батанов, М. В. Пружины / М. В. Батанов, Н. В. Петров. — Ленинград: Машиностроение, 1968. — 216 с.
115. Землянушнов, Н. А. К теоретическому обоснованию восстановления автомобильных пружин из упрочненной проволоки / Н. А. Землянушнов, Н. Ю. Землянушнова // Интеллект. Инновации. Инвестиции. — 2018. — № 5. — С. 68-79.
116. Остроумов, В. П. Производство винтовых цилиндрических пружин / В. П. Остроумов. — Москва: Машиностроение, 1970. — 135 с.
117. Джонсон, К. Л. Механика контактного взаимодействия: монография (Пер. с англ.) / К. Л. Джонсон. — Москва: Мир, 1989. — 510 с.
118. Bishop, R. F. The theory of indentation and hardness tests / R. F. Bishop, R. Hill, N. F Mott // Proceedings of the Physical Society. — 1945. — Vol. 57. — pp. 147-159.
119. Johnson, K. L. The correlation of indentation experiments / K. L. Johnson // Journal of The Mechanics and Physics of Solids. — 1970. — Vol. 18. — pp. 115-126.
120. Mulhearn, T. O. The deformation of metals by Vickers-type pyramidal indenters / T. O. Mulhearn // Journal of The Mechanics and Physics of Solids. — 1959. — Vol. 7. — pp. 85-96.
121. Samuels, L. E. An experimental investigation of the deformed zone associated with indentation hardness impressions / L. E. Samuels, T. O. Mulhearn // Journal of The Mechanics and Physics of Solids. — 1957. — Vol. 5. — pp. 125-134.
122. Пат. RU 2457917 С1, МПК В21F 35/00, F16F 1/06. Устройство для контактного заневоливания пружин / Тебенко Ю. М., Землянушнова Н. Ю., Землянушнов Н. А. — № 2011105212/02; заявлено 11.02.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 22. — 5 с.
123. Пат. RU 2481914 С1, МПК В21F 35/00, В26F1/06. Устройство для контактного заневоливания пружин / Тебенко Ю. М., Землянушнова Н. Ю.,

Землянушов Н. А. — № 2012107298; заявлено 28.02.2012; опубл. 20.05.2013, Бюл. № 14. — 5 с.

124. Ковка и штамповка. Листовая штамповка. Т4. / Под ред. А. Д. Матвеева // Справ. в 4 т. — М. : Машиностроение, 1987. — 544 с.

125. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. — М. : Наука, 1986. — 544 с.

126. Александров, А. В. Сопротивление материалов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин. — М. : Высш. шк., 2003 — 560 с.

127. Дунаев, П. Ф. Детали машин. Курсовое проектирование / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. — М.: Машиностроение, 2003. — 536 с.

128. Золотников, С. Л. Техника безопасности при работе в кузнечно-штамповочных цехах / С. Л. Золотников, В. Л. Михайлова. — М. : Высшая школа, 1978. — 96 с.

129. Зубрилина, Е. М. Основы надежности машин : учебное пособие / Е. М. Зубрилина, Ю. И. Жевора, А. Т. Лебедев и др. — Ставрополь : АГРУС, 2010. — 120 с.

130. Ливотов, В. С. Технологические расчеты упругих элементов. Часть I. Поверочные расчеты витых пружин и пружинных колец. Руководящий технический материал / В. С. Ливотов, А. С. Просвиров, А. В. Напалков. — Волгоград, 2002. — 16 с.

131. Гаврилюк В. Отчёт Хельсинского университета по качеству пружинной проволоки для клапанов. Хельсинки, 1990. — 67 с.

Приложение А — Акт о внедрении результатов НИР ОАО «БелЗАН»

«У Т В Е Р Ж Д А Ю

Директор по техническому
развитию ОАО «БелЗАН»

Т.Ш.Галиахметов



« 20 » 05. 2016

А К Т

**о внедрении результатов научно-исследовательской
(опытно-конструкторской) работы**

Разработки магистранта кафедры технической эксплуатации автомобилей ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет» Землянушнова Н.А.:

- Способ изготовления высоконагруженных пружин сжатия,
 - Устройство для контактного заневоливания пружин,
- испытанные на ОАО «БелЗАН», г. Белебей, рекомендуются к внедрению для изготовления высоконагруженных пружин сжатия уменьшенного сечения проволоки.

Назначение внедряемых разработок:

повышение ресурса пружин сжатия, изготовление облегченных компактных высоконагруженных пружин.

Вид внедрения:

изготовление пружины клапана двигателя автомобильного по новому способу с применением нового устройства для упрочнения.

Эффективность внедрения нового способа и устройства просматривается в повышении ресурса серийных пружин клапана двигателя автомобильного до 40% и в возможности уменьшения массы экспериментальных пружины до 20 %.

Главный конструктор ОАО «БелЗАН»

В.В. Фадеев

ПРИЛОЖЕНИЕ Б — Заключение о внедрении результатов НИР ООО «Фирма «Спринг-Центр»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**о внедрении результатов научно-исследовательской работы
Землянушнова Никиты Андреевича на тему «Разработка способа
повышения ресурса высоконагруженных пружин сжатия для
высокоскоростных транспортных средств»**

Результаты научно-исследовательской работы старшего преподавателя ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» Землянушнова Н.А., заключающиеся в разработанном способе изготовления высоконагруженных пружин (патент на изобретение РФ № 2464119) и устройствах для контактного заневоливания пружин (патенты на изобретения РФ № 2457917 и 2481914) используются в производственных процессах ООО «Фирма «Спринг-Центр».

Использование указанных результатов позволит стабилизировать силовые параметры, повысить ресурс пружин сжатия при их эксплуатации не только в клапанных узлах, но и осуществить их трансфер на пружины, используемые в оборонном комплексе, пружины рессорного подвешивания высокоскоростного подвижного состава и автомобилей.

Генеральный директор
ООО «Фирма «Спринг-Центр»,
лауреат Премии Правительства РФ
в области науки и техники,
кандидат технических наук



В.П. Белогур

ПРИЛОЖЕНИЕ В — Акт внедрения результатов НИР в учебный процесс ФГАОУ
ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

УТВЕРЖДАЮ
И.о. директора Инженерного института
кандидат технических наук, доцент
_____ А.А. Порохня
« _____ » _____ 2023 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ
результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

Комиссия в составе: заведующего кафедрой технологии машиностроения и технологического оборудования кандидата технических наук Землянушовой Надежды Юрьевны, доцента кафедры технологии машиностроения и технологического оборудования кандидата технических наук Шпак Марии Александровны, доцента кафедры технологии машиностроения и технологического оборудования кандидата технических наук Костенко Константина Васильевича составила настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы по теме «Повышение эффективности изготовления пружин за счет совершенствования методов их упрочнения», выполненной старшим преподавателем кафедры технологии машиностроения и технологического оборудования Землянушиным Никитой Андреевичем, внедрены в учебный процесс кафедры технологии машиностроения и технологического оборудования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет».

Разработанная автором 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, позволяющая повысить точность расчётов технологических параметров при производстве, используется при подготовке бакалавров по направлению подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в следующих дисциплинах: «Технология машиностроения», «Бережливое производство», «Технологические процессы в машиностроении».

Заведующий кафедрой технологии машиностроения
и технологического оборудования, к.т.н.



Землянушова Н.Ю.

Доцент кафедры технологии машиностроения и
технологического оборудования, к.т.н.



Шпак М.А.

Доцент кафедры технологии машиностроения и
технологического оборудования, к.т.н.

Костенко К.В.