

На правах рукописи

**Лавриненко Юрий Андреевич**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРУЖИН СЖАТИЯ**

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора  
технических наук



Орел 2018

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт» (ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор

Е.Г. Белков

Официальные оппоненты: Демин Виктор Алексеевич,  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор

Шibaков Владимир Георгиевич,  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Набережночелнинский институт (филиал), заведующий кафедрой

Вдовин Сергей Иванович,  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева», профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»

Защита состоится «11» октября 2018 г. в 12-00 на заседании объединённого диссертационного совета Д999.115.03 при ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И. С. Тургенева», ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» по адресу: г. Орёл, Наугорское шоссе, 29, ауд. 212.

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

Автореферат разослан «    » 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Канатников Никита  
Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Роль пружин в технике огромна. Локомотивы, вагоны, сельскохозяйственные машины, автомобили, тракторы, авто- и авиадвигатели, точные приборы и механизмы, текстильные машины, штампы, станки имеют большое количество разнообразных пружин, выполняющих ответственные и разнообразные функции. Расширяется применение высоконагруженных пружин сжатия, которые экономят монтажное пространство, массу и габариты механизмов и устройств.

Разрабатываются новые марки пружинных сталей, совершенствуется технология производства и контроля пружинной проволоки, которая должна обеспечивать высокое качество и сопротивление усталости высоконагруженных пружин при их эксплуатации. Требования к закаленно-отпущенной проволоке должны соответствовать европейскому стандарту EN 10270-2:2012. Качество пружинной проволоки оказывает большое влияние на сопротивление усталости пружин, но в рамках данной диссертации не изучается.

Важным направлением работ является совершенствование технологии изготовления высоконагруженных пружин сжатия, включая навивку, горячую осадку, холодную 3-х кратную осадку, испытания пружин. Особенность технологии состоит в том, что наклеп от дробеметной обработки снижает упрочняющий эффект от горячей осадки и наоборот. При этом суммарный упрочняющий эффект выше эффектов от каждой операции в отдельности. Несколько способов упрочняющей обработки, влияя друг на друга, создают напряженно-деформированное состояние (НДС), отличающееся от НДС при каждом отдельном виде упрочнения. Но, исследований в области совершенствования технологий упрочнения высоконагруженных пружин сжатия выполняется недостаточно. Методик и соответствующих рекомендаций по разработке технологии изготовления высоконагруженных пружин сжатия для их массового производства в известной литературе недостаточно.

Примерами высоконагруженных пружин сжатия являются пружины клапанов двигателей легковых и грузовых автомобилей. К этим пружинам предъявляются высокие требования по соблюдению допусков на геометрические размеры, силовые характеристики, крипу, а также требования неограниченной выносливости. Количество дефектных пружин на 1 миллион произведенных изделий (PPM) должно быть равным нулю.

В связи с этим можно отметить, что разработка технических решений, основанных на научных исследованиях и направленных на повышение качества высоконагруженных пружин сжатия за счет разработки технологии их

изготовления является актуальной. Комплексные исследования процесса изготовления, включающего операции безоправочной навивки, упрочнения и испытаний ответственных высоконагруженных пружин сжатия позволят создать их математические модели и разработать рекомендации по разработке технологии изготовления высоконагруженных пружин сжатия для обеспечения их высокого качества, снижения энергозатрат и трудоемкости в условиях массового производства.

В работе используются методы теоретических и экспериментальных исследований с использованием теорий малых упругопластических деформаций, течения, рентгеновского метода и метода травления пружин и пластинки, методы математической статистики. В частности, при построении математических моделей пластического деформирования использованы метод малых упругопластических деформаций и теория течения. Расчеты выполнены на персональных компьютерах с использованием стандартных пакетов программ «MathCAD», «Maple» и др.

**Цель работы:** повышение качества высоконагруженных пружин сжатия за счет разработки технологии их изготовления путем проведения комплексного исследования операций безоправочной навивки и упрочнения.

**Задачи работы:**

1. Выполнение обзора и анализ данных о современном состоянии производства, технологиях изготовления, упрочнении и материалах высоконагруженных пружин сжатия.
2. Проведение теоретических исследований формообразования высоконагруженных пружин сжатия под воздействием комбинированной нагрузки от сжатия, изгиба, кручения и сдвига.
3. Проведение теоретических исследований процесса безоправочной навивки высоконагруженных пружин сжатия.
4. Разработка математической модели процесса тройного упрочнения и определение напряженно-деформированного состояния высоконагруженных пружин сжатия.
5. Разработка метода испытаний высоконагруженных пружин сжатия с завышенной длиной и шагом и построение кривых усталости для сталей 70ХГФА и «Oteva 60».
6. Проведение экспериментальных исследований влияния технологических параметров изготовления и упрочнения на качество высоконагруженных пружин сжатия.

7. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления высоконагруженных пружин сжатия, обеспечивающей повышение их качества.

8. Разработка технологических процессов изготовления высоконагруженных пружин сжатия двигателей ВАЗ, обеспечивающих их высокое качество и снижение затрат на производство.

**Объект исследования.** Процесс безоправочной навивки и упрочнения высоконагруженных пружин сжатия.

**Предмет исследования.** Формообразование и напряженно-деформированное состояние в зоне деформации высоконагруженных пружин при выполнении безоправочной навивки под воздействием четырех силовых факторов: сжатия, изгиба, кручения и сдвига; напряженно-деформированное состояние пружины после проведения операций горячей осадки, дробеметной обработки, холодной трехкратной осадки.

**Методы исследования.** Теоретические исследования особенностей формообразования и напряженно-деформированного состояния процесса безоправочной навивки высоконагруженных пружин сжатия сделаны с применением теории малых упругопластических деформаций и теории течения.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием современных методов проверки остаточных напряжений рентгеновским методом и методом травления, испытания на сопротивление усталости выполнены с использованием специализированного испытательного стенда. Экспериментальные работы по изготовлению опытных и опытно-промышленных партий, замеры силовых, геометрических и функциональных параметров проводили на АО «БЕЛЗАН» и НТЦ АО «АВТОВАЗ». Обработку экспериментальных данных проводили с помощью методов математической статистики с использованием современной вычислительной техники и пакетов прикладных программ «MathCAD» и «Maple».

**Автор защищает:**

1. Результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса формообразования пружин сжатия при безоправочной навивке с учетом четырех силовых факторов.

2. Результаты исследования процесса тройного упрочнения и напряженно-деформированного состояния высоконагруженных пружин сжатия.

3. Метод испытаний высоконагруженных пружин сжатия с завышенной длиной и шагом.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров изготовления и упрочнения на качество высоконагруженных пружин сжатия.

5. Методику проектирования технологических процессов изготовления высоконагруженных пружин сжатия, обеспечивающую повышение их качества.

6. Технологический процесс изготовления высоконагруженных пружин сжатия двигателей ВАЗ.

**Научная новизна работы состоит:**

- в установлении особенностей формообразования и определении напряженно-деформированного состояния витка пружины при навивке под воздействием силовых факторов: сжатия, изгиба, кручения и сдвига;
- в определении остаточных напряжений по сечению витка пружины и уточнении силовых факторов операции безоправочной навивки;
- в математической модели процесса тройного упрочнения пружин сжатия, описывающей влияние горячей осадки, дробемётного наклепа и холодной осадки на напряженно-деформированное состояние пружин сжатия;

**Научная значимость** работы состоит в развитии теории процессов безоправочной навивки и упрочнения высоконагруженных пружин сжатия, заключающееся в определении влияния технологических параметров навивки, термической обработки и упрочняющих операций на качество высоконагруженных пружин сжатия. Построенные математические модели процессов безоправочной навивки и упрочнения позволяют расширить возможности и подходы к анализу и проектированию процессов изготовления высоконагруженных пружин сжатия.

**Практическая ценность работы** заключается:

- в повышении качества высоконагруженных пружин сжатия за счет совершенствования технологии их изготовления (навивка, термическая обработка и упрочняющие операции);
- в определении минимального необходимого времени прогрева пружин в печах для горячей осадки и установлении температурных интервалов деформирования пружин;
- в создании на основе результатов экспериментальных и теоретических исследований процесса безоправочной навивки пружин методики проектирования технологических процессов изготовления высоконагруженных пружин сжатия, обеспечивающей повышение их качества, снижения энергозатрат и трудоемкости в условиях массового производства;

- в разработке технологических процессов производства высоконагруженных пружин сжатия двигателей ВАЗ, обеспечивающих их высокое качество и экономию затрат;

- в разработанном методе испытаний высоконагруженных пружин сжатия с завышенной длиной и шагом на сопротивление усталости и построении кривых усталости для сталей 70ХГФА и «Oteva 60».

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Работа соответствует п. 1 «Закономерности деформирования материалов и повышения их качества при различных термомеханических режимах, установление оптимальных режимов обработки» паспорта специальности 05.02.09 «Технологии и машины обработки давлением».

**Достоверность результатов,** представленных в диссертационной работе, подтверждается использованием современного лабораторного и промышленного оборудования, современных методов проверки динамической прочности и остаточных напряжений рентгеновским методом и методом травления, а также методов проведения усталостных испытаний, повторяемостью результатов исследований, высокой согласованностью теоретических и экспериментальных данных, применением современных статистических методов обработки экспериментальных данных, а также использованием данных, полученных в производственных процессах изготовления высоконагруженных пружин сжатия.

**Реализация работы.** Разработанные технологические процессы изготовления высоконагруженных пружин сжатия внедрены в производство на АО «БЕЛЗАН», ООО «Волгоградский метизный завод» и других предприятиях.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены на 2-х международных научно-технических конференциях: АО «Белорецкий завод тракторных рессор и пружин» (г. Белорецк, 2001г.) и ФГБОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (г. Севастополь, 2017г.), АО «БЕЛЗАН (г. Белебей, 2001г.); ФГБОУ ВО «Южноуральский государственный университет» и ЦНТИ (г. Челябинск, 2003г. и 2004г.); на заседаниях технических советов машиностроительных предприятий АО «Центральный научно-исследовательский институт материалов» и ОАО «Кировский завод» (г. Санкт-Петербург, 2003г. и 2004г.), АО «АВТОВАЗ» (г. Тольятти, 2003г.); АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (г. Коломна, 2004 г.); АО «Красная Этна» (г. Нижний Новгород, 2005г.); АО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод» (г. Нижний Тагил, 2003г.), Государственном научном центре Российской Федерации Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-

исследовательский автомобильный и автомоторный институт» (г. Москва, 2017г.).

**Публикации.** Всего по теме диссертации опубликовано 40 работ, в том числе: 2 монографии, 1 глава в справочнике, а также 15 статей в рецензируемых изданиях и сборниках, входящих в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук»; 20 статей в различных сборниках научно-технических трудов; 2 патента на изобретения. Общий объем – 25 печ. л., авторский вклад – 18 печ. л.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 8 глав, основных результатов и выводов по работе, списка используемых источников из 195 наименований, приложения и включает 217 страниц основного текста, содержит 73 рисунка и 23 таблицы. Общий объем диссертации составляет 284 страницы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность решения рассматриваемой в данной работе научно-технической проблемы, сформулирована цель и поставлены задачи работы, методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, достоверность, научная значимость, практическая ценность и реализация работы, приведены данные об апробации работы, публикациях, структуре и объеме диссертации и дано краткое содержание каждого раздела.

**В первой главе** выполнен анализ данных о современном состоянии производства, технологических процессах изготовления высоконагруженных пружин сжатия, обеспечивающих их высокое качество, высокопрочной пружинной проволоке, методах испытаний и уточнены задачи исследования. Отмечена значимость работ в области технологии изготовления и упрочнения пружин следующих ученых: Пономарёв С.Д., Шаврин О.И., Заседателев С.М., Быков В.А., Берман М.Э., Штода А.В., Фролов Г.Н., Хвингия М.В., Шалин В.Н., Ушаков Н.Н., Полищук Д.Ф., Белогур В.П., Мазеин П.Г. и других. Большое значение имеют основополагающие работы Навроцкого Г.А. и Белкова Е.Г. по теории и практическим вопросам технологии изготовления, включая операции упрочнения пружин массового производства при безоправочной навивке, а также и по проектированию оборудования и оснастки для навивки пружин.



Вместе с тем, в существующих работах отмечено отсутствие анализа причин, снижающих качество высоконагруженных пружин сжатия, ограниченность практических рекомендаций по разработке технологических процессов и выбору рациональных режимов изготовления и упрочнения высоконагруженных пружин сжатия, обеспечивающих высокое качество и долговечность изготавливаемых пружин. На основании анализа литературных данных уточнены задачи исследования.

**Во второй главе** проведено теоретическое исследование и расчет напряжений и деформаций при навивке пружин под воздействием: крутящего момента  $M_k$ , изгибающего момента  $M_{и}$ , осевой силы  $N$  и перерезывающей силы  $Q$ , а также определены величины силовых факторов, при которых происходит потеря несущей способности стержня, получены решения, согласующиеся с решениями других авторов, полученными ранее.

На рис. 1 приведена схема приложения сил и моментов в сечении витка при навивке.

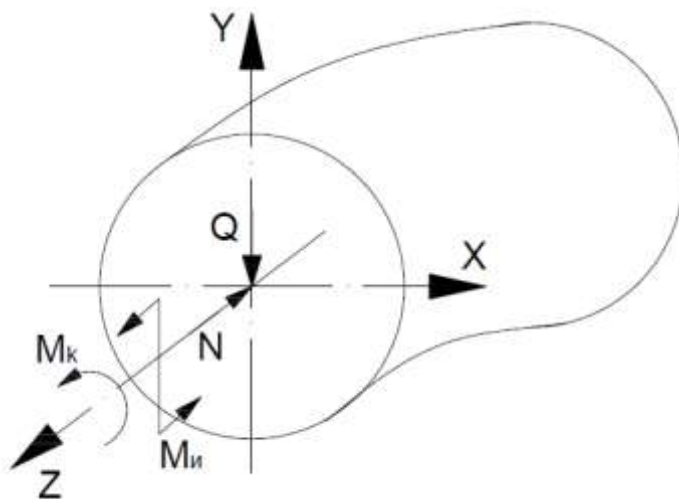


Рис. 1. Схема приложения сил и моментов в сечении витка

Для расчета напряжений в сечении были использованы показатели нагружения в относительном виде, показывающие соотношение наибольших величин деформаций от действия осевой силы, крутящего момента и перерезывающей силы к наибольшей деформации при изгибе:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_0^{\max}}{\varepsilon_{II}^{\max}}; \quad \beta = \frac{\gamma_k^{\max}}{\varepsilon_{II}^{\max}}; \quad \delta = \frac{\gamma_Q^{\max}}{\varepsilon_{II}^{\max}}. \quad (1)$$

Здесь  $\bar{\varepsilon}_0^{\max} = \frac{\varepsilon_0^{\max}}{\varepsilon_s}$ ;  $\varepsilon_s$  - деформация при напряжении предела текучести от осевой силы. Таким же образом обозначили относительные деформации от действия крутящего момента  $M_n$  и перерезывающей силы  $Q$ .

В итоге были составлены уравнения, позволяющие рассчитать напряжения в сечении витка при разных показателях  $\alpha, \beta, \gamma$ :

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma} &= \frac{\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi}{\sqrt{(\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi)^2 + (\beta \bar{\rho} \sin \varphi)^2 + [\beta \bar{\rho} \cos \varphi + \delta(1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)]^2}}; \\ \bar{\tau}_x &= \frac{\beta \bar{\rho} \sin \varphi}{\sqrt{(\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi)^2 + (\beta \bar{\rho} \sin \varphi)^2 + [\beta \bar{\rho} \cos \varphi + \delta(1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)]^2}}; \\ \bar{\tau}_y &= \frac{\beta \bar{\rho} \cos \varphi + \delta(1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)}{\sqrt{(\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi)^2 + (\beta \bar{\rho} \sin \varphi)^2 + [\beta \bar{\rho} \cos \varphi + \delta(1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)]^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При значительных деформациях упругая область приближается к минимальным точечным размерам и во всем сечении являются действительными напряжения, соответствующие пластической области.

Для проведения анализа смещения границы упругой области при разных показателях  $\alpha, \beta, \gamma$  выполнили решение уравнений связи напряжений и деформаций с учетом условия пластичности Губера-Мизеса и получили уравнение границы упругой и пластической областей сечения:

$$(\alpha + \bar{y})^2 + [\beta \bar{x} + \delta(1 - \bar{y}^2)]^2 + (\beta \bar{y})^2 = \frac{1}{(\bar{\varepsilon}_I^{\max})^2} \quad (3)$$

Графическим представлением данного уравнения является кривая, форма которой зависит от соотношения силовых факторов нагружения в очаге деформации. Если отсутствует перерезывающая сила, тогда граница имеет эллипсообразную форму.

На рис.2 приводится графическое представление смещения границы упругой области, выполненное в программе «Maple».

Если приложить только изгибающий момент  $M_n$ , тогда граница упругой и пластической областей представляется двумя прямыми. (рис. 2. а).

Если приложить изгибающий  $M_{из}$  и крутящий моменты  $M_{кр}$ , тогда граница представляется в виде эллипса (рис. 2, б).

Если приложить изгибающий  $M_{из}$  и крутящий  $M_{кр}$  моменты, а также осевую силу сжатия  $N$ , тогда происходит смещение границы по оси  $y$  (рис. 2, в)

Если приложить изгибающий  $M_{из}$ , крутящий  $M_{кр}$  моменты, осевую силу сжатия  $N$  и перерезывающую силу  $Q$ , тогда граница эллипсной формы имеет дополнительное смещение по оси  $x$  (рис. 2, г).

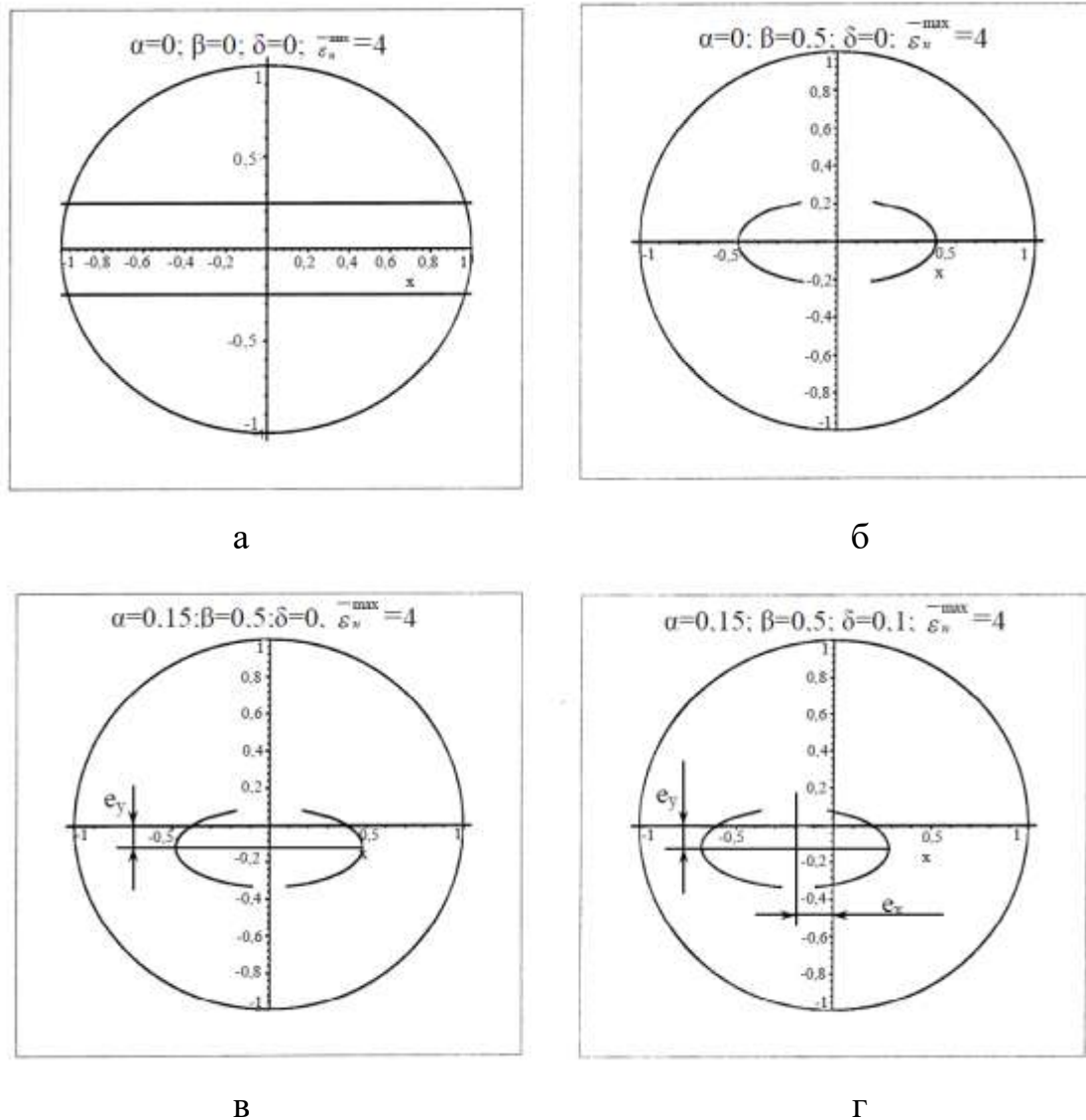


Рис. 2. Графическое представление смещения границы упругой и пластической областей сечения: а – нагружение только изгибающим моментом; б – нагружение изгибающим и крутящим моментом; в - нагружение изгибающим и крутящим моментом и осевой силой; г - нагружение изгибающим и крутящим моментом, осевой и перерезывающей силой

Для стандартных пружин, имеющих индекс навивки в пределах  $c = D/d = 4...12$  сочетание силовых параметров создает упругую область, незначительную по размерам.

В этом случае ошибка при расчете изгибающего  $M_{и}$  и крутящего  $M_{к}$  моментов составит не более 1,04 % и 1,9 %.

Следует подчеркнуть важное допущение, принятое в работе о том, что закаленно-отпущенная пружинная проволока имеет низкий показатель деформационного упрочнения, близкий к нулю, а в области деформации образовался пластический шарнир.

Для расчета моментов и сил, при воздействии которых образуется пластический шарнир, численно интегрировали уравнения равновесия (4)

$$\left. \begin{aligned} \overline{M}_{и}^{\text{ПСКИ}} &= \frac{3}{4} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \overline{\sigma} \cdot \overline{\rho}^2 \sin \varphi \cdot d\overline{\rho} \cdot d\varphi; \\ \overline{M}_{к}^{\text{ПСКИ}} &= \frac{3}{2\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} (\overline{\tau}_y \cos \varphi + \overline{\tau}_x \sin \varphi) \cdot \overline{\rho}^2 d\overline{\rho} d\varphi; \\ \overline{N}^{\text{ПСКИ}} &= \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \overline{\sigma} \overline{\rho} d\overline{\rho} d\varphi; \\ \overline{Q}^{\text{ПСКИ}} &= \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \overline{\tau}_y \overline{\rho} d\overline{\rho} d\varphi. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь напряжения рассчитаны по формулам (2).

Решали уравнения (4) с помощью разработанной программы pruzpere, согласно которой можно определить  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\delta$  при заданной величине одного из параметров  $\overline{M}_{и}, \overline{M}_{к}, \overline{N}, \overline{Q}$ .

**В третьей главе** выполнен анализ операции безоправочной навивки пружин сжатия, а также определены причины, существенно влияющие на обеспечение окончательного качества пружин.

Установлены основные виды возможного брака и снижения качества пружин при навивке: нестабильность размеров пружин при навивке в процессе работы автомата, образование поверхностных дефектов в виде царапин и продольных рисок при навивке пружин, непараллельность и неперпендикулярность опорных торцев пружины свыше установленных допусков. Также было проведено сравнение разных схем шагообразования по силе поперечного нагружения и определен оптимальный угол приложения этой силы, равного  $222,5^\circ$ , использование которого позволяет уменьшить вероятность образования рисок на поверхности витков. Можно отметить высокое согласование теоретических и экспериментальных значений, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели.

Также проведены исследования по величинам рассеивания длины пружины по всем технологическим переходам. Разработаны рекомендации для операторов пружинонавивочных автоматов. Разработан способ и калибр для контроля угла навивки при поджатии опорных витков.

Холодная навивка пружин на автомате является первой технологической операцией, параметры которой существенно влияют на обеспечение окончательного качества пружин.

При выполнении данной операции необходимо исключить образование поверхностных дефектов на проволоке от контактов с формообразующим инструментом, т.к. эти дефекты будут снижать сопротивление усталости при использовании пружин.

Геометрическая точность окончательно изготовленных пружин по непараллельности торцев и их неперпендикулярности к оси зависят не только от параметров их шлифовки, но и от угла подъема при поджатии опорных витков.

Необходимо также исключить отклонения от заданных допусков по высоте при работе пружинонавивочного автомата, которое отрицательно влияет на последующее обеспечение силовых параметров и их допусков.

Формирование шага при навивке на пружинонавивочных автоматах возможно выполнять разными способами: или с помощью клина, или с помощью лапки.

Образование поверхностных дефектов при формировании шага зависит в основном от величины сил на контактных поверхностях между проволокой и упорными штифтами.

Были сделаны расчеты и определена сила, действующая в перпендикулярном направлении от плоскости изгиба, требуемая для формирования шага и установлен угол, при котором эта сила имеет наименьшую величину.

Было проведено сравнение разных схем шагообразования по силе поперечного нагружения и определение оптимального угла приложения этой силы.

На рис.3. представлены схемы шагообразования с применением клина и шаговой цапфы, применяемые на современных пружинонавивочных автоматах.

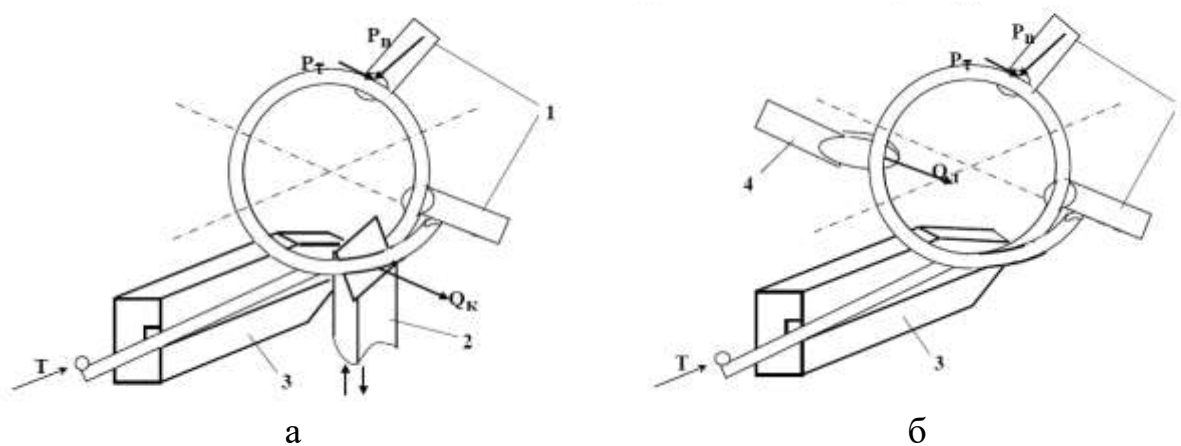


Рис.3. Схемы шагообразования: а - с применением клина для формирования шага, б - с применением цапфы для формирования шага.

В расчетах приняты следующие допущения: виток считается круговым, а моменты  $\bar{M}_{21}$  и  $\bar{M}_{22}$  – сосредоточенными. Упрочнение материала не учитывалось.

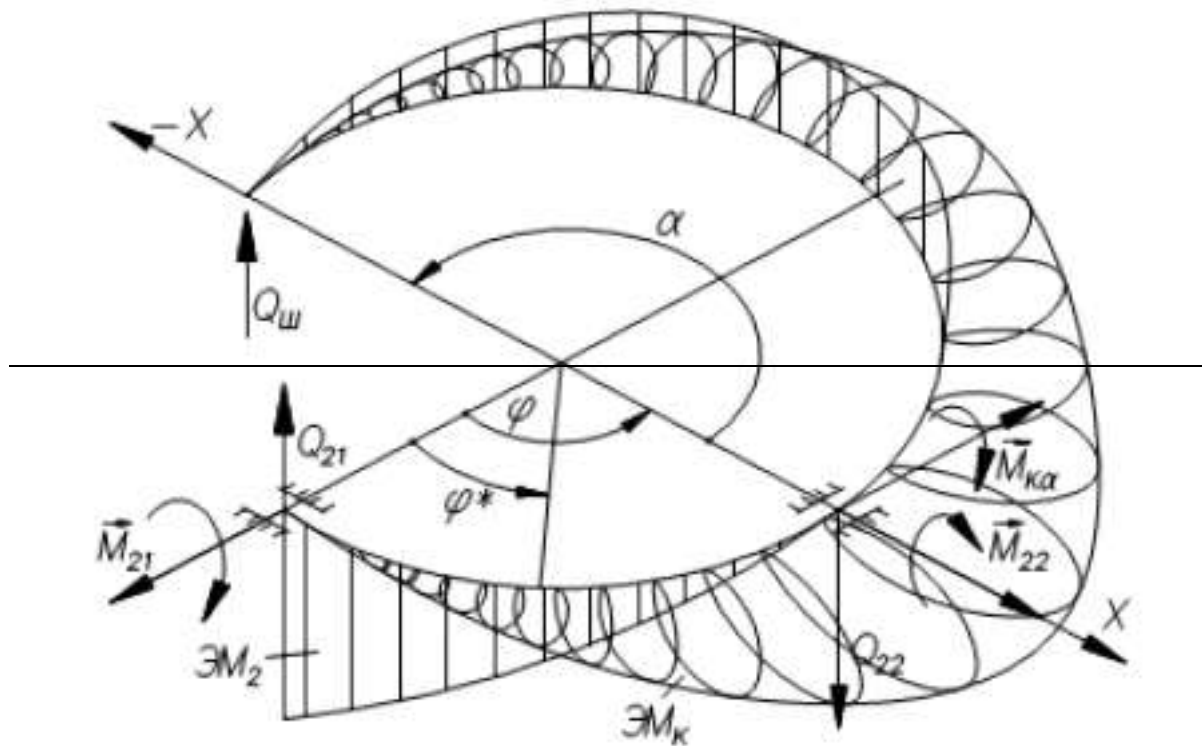


Рис.4. Схема для расчета сил в перпендикулярном направлении от плоскости изгиба

Представим действие сил и моментов в диапазоне угла  $\varphi_1$  в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_2}{d\varphi} - M_K + Q_2 R &= 0 \\ \frac{dM_K}{d\varphi} + M_2 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Если принять граничные условия  $\varphi=0, M_K=0, \varphi=\varphi_1, M_K=-M_{K\alpha}$ , тогда при решении уравнений (5) получим моменты в диапазоне действия  $\varphi=0 \dots 90^\circ$ .

$$\left. \begin{aligned} M_K &= \frac{Q_2 R(1 - \cos \varphi_1) - M_{K\alpha} \sin \varphi + Q_2 R(\cos \varphi - 1)}{\sin \varphi_1} \\ M_2 &= \frac{M_{K\alpha} - Q_2 R(1 - \cos \varphi_1)}{\sin \varphi_1} \cos \varphi + Q_2 R \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Пружинонавивочные автоматы имеют, как правило,  $\varphi_1=90^\circ$ . Поэтому крутящий и изгибающий моменты (6) преобразуем и представим следующим образом:

$$\begin{aligned} M_K &= RQ_{III}[(\sin\alpha + \cos\alpha - 1)\sin\alpha + \sin\alpha(\cos\varphi - 1)] \\ M_2 &= RQ_{III}[(1 - \cos\alpha - \sin\alpha)\cos\varphi + \sin\alpha \cdot \sin\varphi] \end{aligned} \quad (7)$$

При четырехфакторном нагружении при совместном приложении сил и моментов (см. рис. 4) в зоне деформации при  $\varphi=\varphi^*$  возникает пластический шарнир – полная пластическая область, при этом изгибающий момент имеет наибольшее влияние на его образование, а осевая и перерезывающая силы сравнительно малы, а именно  $\leq 1\%$ . Однако, с увеличением кривизны витка их доля возрастает.

Силу, которая необходима для образования шага, можно определить после преобразования уравнения (7) по следующей формуле:

$$Q_{III} = \frac{108\overline{M}_K}{[(\sin\alpha + \cos\alpha - 1)\sin\varphi + \sin\alpha(\cos\varphi - 1)]} = \frac{108\overline{M}_K}{F(\alpha)}. \quad (8)$$

Сила шагообразования будет иметь минимальное значение когда  $\varphi=\rho=10^\circ$ .

Из функции  $F(\alpha)$  получили уравнение (9), решая которое получили значение угла  $\alpha=222,5^\circ$ , при котором сила шагообразования будет иметь наименьшую величину. Рассчитанная величина угла равна углу при безоправочной навивке пружин сжатия на автоматах с шаговым клином.

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\sin\rho + \cos\rho - 1}{\sin\rho} = -0,915, \quad (9)$$

Для расчета  $Q_{III}$  по уравнению (8), требуется рассчитать крутящий момент  $\overline{M}_K$ , который зависит от  $\overline{M}_{II}$

$$\overline{M}_{II} = \frac{1}{8} \left\{ 3\overline{\epsilon}_{II}^{\max} \cdot \arcsin \frac{1}{\overline{\epsilon}_{II}^{\max}} + \left[ 5 - \frac{2}{\left(\overline{\epsilon}_{II}^{\max}\right)^2} \right] \sqrt{1 - \frac{1}{\left(\overline{\epsilon}_{II}^{\max}\right)^2}} \right\} \quad (10)$$



Относительный момент  $\overline{M}_K$  рассчитаем следующим образом:

$$\overline{M}_K = \sqrt{1 - \overline{M}_и^2} . \quad (11)$$

Расчетные значения силы шагообразования  $Q_{ш}$  представлены на рис. 5.

Опытным путем с помощью динамометра измеряли силы формообразования шага, которые совпали с расчетными величинами.

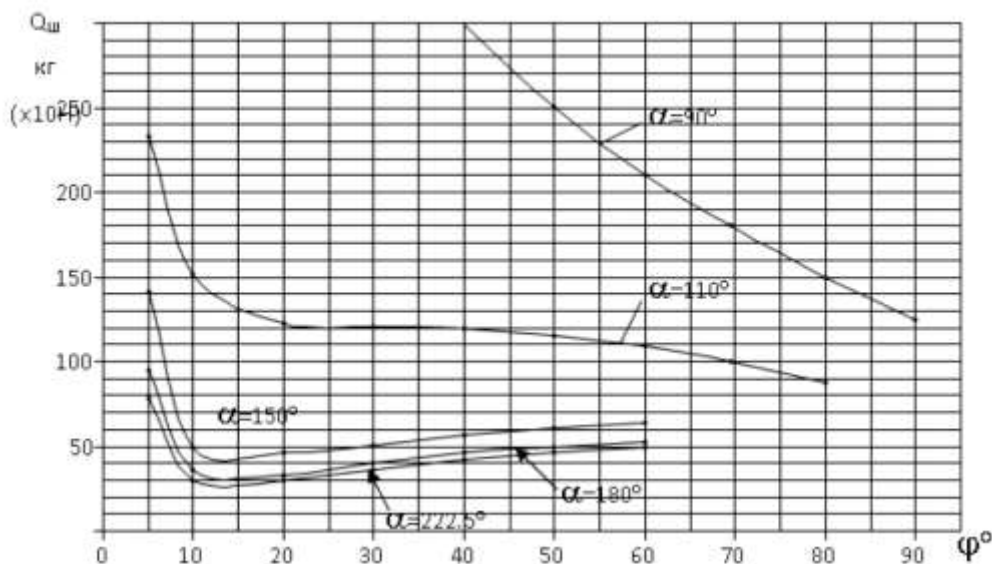


Рис. 5. Расчетные значения  $Q_{ш}$

Также в третьей главе приведены результаты исследований отклонений геометрических размеров и силовых параметров высоконагруженных пружин сжатия при их изготовлении.

Соблюдение заданных технологических допусков на высоту пружин при их изготовлении напрямую влияет на обеспечение предельных отклонений силовых характеристик  $P_1$  и  $P_2$ .

Соблюдение заданных допусков на высоту пружин во многом зависит от разброса предела прочности и предела текучести проволоки в мотке, коэффициента трения между поверхностью проволоки и формообразующей оснасткой, поверхностного покрытия проволоки, скорости деформации, технического состояния пружинонавивочного оборудования, точности настройки автомата.

При изготовлении пружин возникает разброс размеров высоты на каждой технологической операции.

При наборе статистических данных было отмечено, что при термической

операции – отпуск после навивки, разброс по высоте не изменяется, но размер высоты увеличивается на 0,4-0,5 мм.

Во время шлифования торцев и горячей осадке разброс по высоте становится больше. Однако, для исключения недопустимого разброса сверх установленных пределов, очень важно не смешивать между собой партии навитых пружин

Следует отметить важность соблюдения назначенных технологических допусков на суммарную высоту  $\Sigma=S_1+ S_2+2d$ , которые значительно влияют на точность обеспечения силовых характеристик пружин

При рассмотрении факторов, влияющих на качество высоконагруженных пружин сжатия был установлен фактор геометрической точности пружин по непараллельности торцевых плоскостей и их перпендикулярности относительно образующей пружины. В соответствии с требованиями по геометрической точности высоконагруженных пружин сжатия, установленных в конструкторской документации на пружины, например, в нормалях 9.01.344 для пружин клапана двигателей внутреннего сгорания непараллельность торцевой плоскости и перпендикулярность к образующей пружины должны быть 0,6 мм и 1,2° соответственно. Геометрическая точность пружин оказывает влияние на циклическую долговечность высоконагруженных пружин сжатия.

Национальные стандарты устанавливают следующие нормы

- I группа точности....0,02 Н<sub>0</sub> (~1° 9')
- II группа точности....0,04 Н<sub>0</sub> (~2° 17')
- III группа точности...0,08 Н<sub>0</sub> (~ 4° 34')

Исследование расположения данных отклонений при разных углах  $\alpha$  (см. рисунок 3.9а) подтвердили причину возникновения этих отклонений, которая заключается в нарушении угла подъема и неравномерности оформления крайних витков. Впоследствии, после шлифовки торцев, при дальнейших технологических операциях горячей или холодной осадки возникают отклонения по геометрии в направлении осей X и Y.

В рамках данной работы предложена и внедрена конструкция настроечной оправки и втулки, имеющей на торце профиль, соответствующий правильному расположению крайнего витка (см. рис. 6, б).

Это позволило полностью исключить несправимый брак по геометрической точности высоконагруженных пружин сжатия двигателей ВАЗ

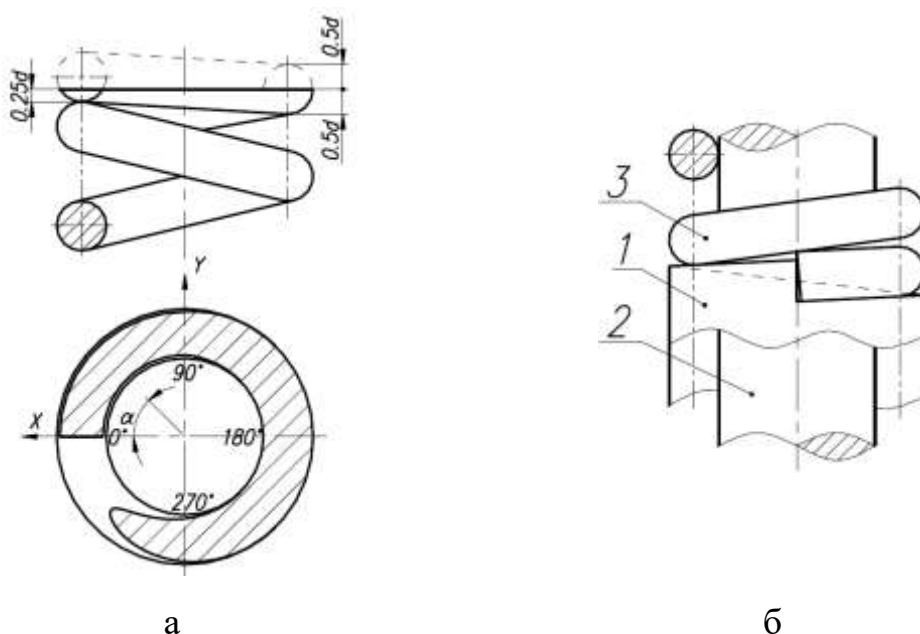


Рис. 6. Формообразование опорных витков пружин: а – требования к размерам опорного витка; б - контроль формообразования опорных витков с помощью специального калибра

**Четвертая глава** посвящена разработке математической модели процесса упрочнения при изготовлении пружин сжатия, включающей термоосадку (горячую осадку), дробеметную обработку и трехкратную холодную осадку.

Дробеметная обработка снижает упрочняющий эффект от горячей осадки и наоборот (если изменить их последовательность). При этом суммарный упрочняющий эффект от использования этих двух и третьей операции выше, чем от каждой операции в отдельности. В сечении витков пружины создается напряженно-деформированное состояние, увеличивающее сопротивление усталости и стойкость к температурной релаксации нагрузки.

Для расчета остаточных напряжений разработана математическая модель, учитывающая истинную диаграмму упрочнения. В модели учтено, что горячая осадка (термоосадка) происходит при температуре 380...400°C, а разгрузка – после охлаждения с помощью эмульсии.

Была получена формула для определения величины остаточной осадки  $\lambda_{ост}$  в виде

$$\lambda = 2\pi n^2 \theta \quad (12)$$

где  $\theta$  - относительный угол поворота (кручение):

$$\theta = \frac{T}{GRW^*} \quad (13)$$

$T$  – крутящий момент в сечении, зависящий от распределения касательных напряжений по сечению витка в пластической области;

$W^*$  - геометрическая характеристика сечения, соответствующая по размерности полярному моменту сопротивления круга:

$$W^* = \int_0^r \int_0^{2\pi} \frac{\rho^3 d\rho \cdot d\alpha}{R + \rho \cdot \cos\alpha} \quad (14)$$

В процессе дробеметной обработки происходит постепенное накопление пластической деформации, которая, воздействуя на касательные напряжения, полученные при горячей осадке, постепенно уменьшает их. Для расчета поля пластической деформации разработана матричная модель контрольной пластинки и имеющая те же механические свойства, что и пружинная проволока, наклепанная с одной стороны. При травлении в горячей кислоте радиус кривизны пластинки увеличивается вплоть до ее полного выпрямления.

По изменению кривизны после стравливания определенного слоя можно определить глубину распространения остаточных напряжений. На рис.7. представлены распределение остаточных касательных напряжений после горячей осадки и дробеметной обработки.

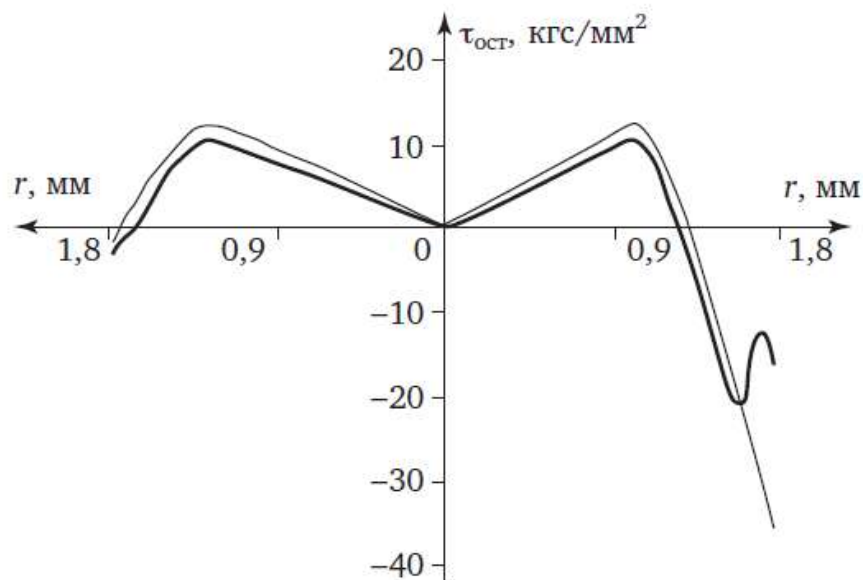


Рис. 7. Напряжения на горизонтальном диаметре пружины (ось пружины справа): тонкая линия – после горячей осадки; полужирная линия – после дробеметной обработки

Эпюры распределения остаточных напряжений на поверхности витка пружины представлены на рис.8.

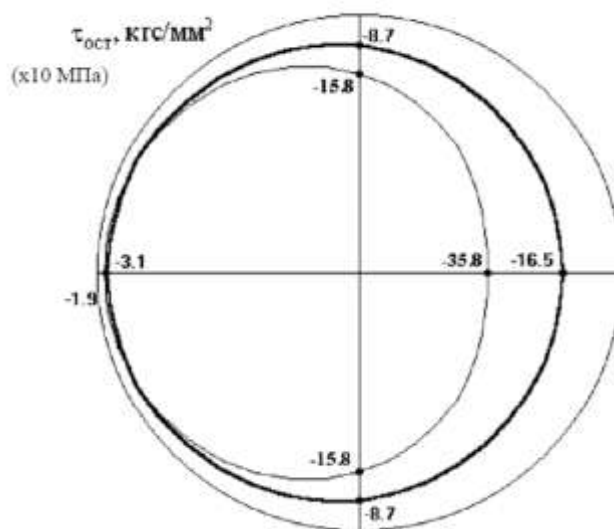


Рис. 8. Остаточные касательные напряжения на поверхности пружины (ось пружины справа): тонкая линия – после горячей осадки; жирная линия – после дробемётной обработки

Также было определено поле распределения пластических деформаций от дробебетного наклепа контрольной пластинки и сечения витка пружины после термоосадки. Были приняты следующие допущения: поверхность витка обрабатывается равномерно со всех сторон и поле пластической деформации в пружине такое же, как и в контрольной пластинке. Кинематическое нагружение проведено путем пошагового введения в радиальном направлении «клина» пластической деформации, форма и размеры которого уже рассчитаны.

Была получена формула для определения остаточного угла (кручения) и измененных после дробебетной обработки касательных сдвиговых деформаций:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \gamma_{nli,j} r_i \Delta s_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{R \cdot r_i}{R + r_i \cos \alpha_j}} \quad (15)$$

$$\gamma_{z\varphi i,j} = \frac{R \cdot r_i}{R + r_i \cos \alpha_j} \theta \quad (16)$$

В результате расчета получено распределение остаточных касательных напряжений после дробебетной обработки. Расчет проведен в пакете Mathcad

на примере пружины клапана ВАЗ 2112. После горячей осадки остаточная деформация пружины составила  $\lambda_{ост}^{теор} = 4,1\text{мм}$ , ( $\lambda_{ост}^{экспер} = 3,5...4,5\text{мм}$ ). Дробеметная обработка увеличила высоту пружины на величину  $\Delta\lambda_{ост}^{теор} = 0,66\text{мм}$ , ( $\Delta\lambda_{ост}^{экспер} = 0,5...0,8\text{мм}$ ). Остаточные касательные напряжения на поверхности витков значительно уменьшились.

При последующей холодной осадке необходимо также учитывать наличие остаточных нормальных напряжений от дробеметной обработки. В качестве исходных данных для расчета использовали поля нормальных и сдвиговых остаточных деформаций, полученные после расчета процесса дробеметной обработки. В результате расчета получено распределение остаточных касательных напряжений (рис. 9) и величина остаточной осадки  $\Delta\lambda_{ост}^{теор} = 0,73\text{мм}$ , ( $\Delta\lambda_{ост}^{экспер} = 0,6...0,9\text{мм}$ ).

Было отмечено, что уменьшенные при дробеметной обработки остаточные касательные напряжения снова восстанавливаются после холодной осадки.

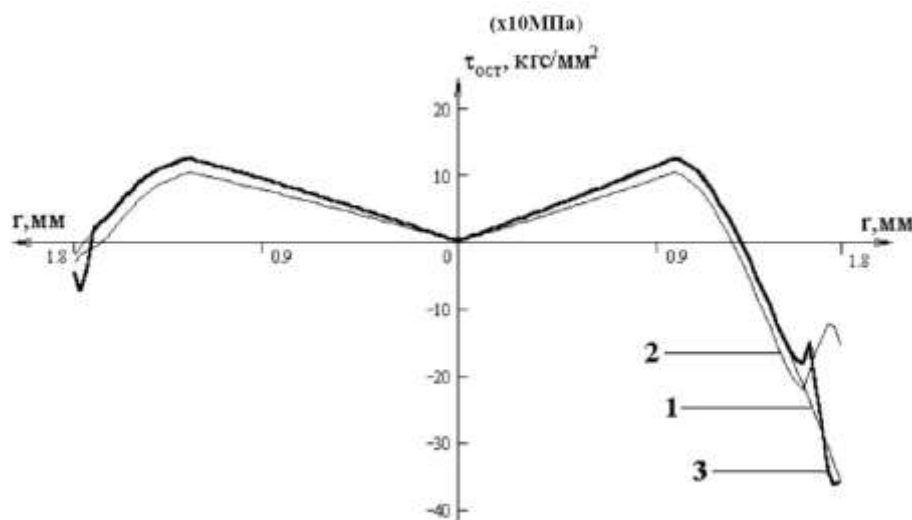


Рис.9. Напряжения на горизонтальном диаметре пружины (ось пружины справа): 1 – после горячей осадки; 2 – после дробеметной обработки; 3 – после холодной осадки

**В пятой главе** разработана методика проектирования технологических процессов изготовления высоконагруженных пружин сжатия, включающая следующие основные этапы: конструкторский расчёт (расчет параметров пружины в упругой и пластической областях); построение диаграммы деформирования при пластической осадке пружины; расчет напряженно-деформированного состояния пружины при термоосадке; экспериментальное определение внедренной пластической деформации от дробеметной обработки;

расчет распределения и глубины остаточных поверхностных касательных напряжений от дробеметной обработки и остаточной осадки пружины; расчет кинетики деформирования при трехкратной холодной осадке; расчет необходимой высоты заготовки пружины после при навивке, шлифовке, горячей осадке, дробеметной обработке и трехкратной холодной осадке; проектирование оснастки; оформление технологической документации; опытная проверка технологии изготовления; испытания на крип и сопротивление усталости, а также запуск в производство.

Также проведена разработка технологического процесса для пяти разных пружин сжатия двигателя ВАЗ, обеспечивающего повышение качества пружин, снижение трудоемкости и энергозатрат. Новая технология защищена патентом.

На основании исследований и предварительных расчётов были изготовлены опытно-промышленные партии пружин из проволоки 70ХГФА-Ш и Oteva 60 по трем вариантам технологии.

Результаты расчета остаточных напряжений в сечении витка для опытно-промышленных партий пружин представлены в таблице 1. При проведении опытных работ установлено, что если горячую осадку выполняют при более низкой температуре, тогда значение высоты  $H_0$  при навивке уменьшают. Это связано с тем, что остаточная осадка  $\lambda_{ост}$  при выполнении операции горячей осадке, с понижением температуры значительно уменьшается.

Механические свойства проволоки, включая модуль сдвига и условный предел текучести, по данным Пономарева С.Д., при 240 °С остаются постоянными, но при 380 - 400 °С они значительно изменяются.

Анализируя результаты расчета, установлено, что при новой энергосберегающей технологии величина остаточных напряжений на внутреннем волокне, т.е. в опасной точке, практически не уменьшилась, но пластическая область ( $r - a$ ) незначительно уменьшилась. Это свидетельствует о том, что при 240 °С протекает процесс НТМО, вызывающей упрочнение. Установлено, что вариант II технологии обеспечивает требования чертежа по циклической долговечности и величине снижения нагрузки (крипу).

Пружины, изготовленные по технологическому варианту III, не соответствуют требованиям чертежа по циклической долговечности и величине снижения нагрузки (крипу) из-за низких остаточных напряжений в сечении витка. При использовании данного технологического варианта не происходит процесс НТМО и, соответственно, нет данного вида упрочнения.

Таблица 1

## Расчетные величины остаточных напряжений в сечении витка

Характеристики	Технологические варианты		
	I	II	III
Исходные данные			
Температура нагрева перед осадкой, °C	380	240	20
Предел текучести, $\tau_s$ , МПа	790	890	890
Модуль упругости при сдвиге G, МПа	$7,34 \cdot 10^4$	$8,07 \cdot 10^4$	$8,07 \cdot 10^4$
Деформация при осадке до смыкания витков, $\lambda_3$ , мм	26	23,5	21
Остаточная деформация $\Delta H$ , мм	6	3,5	1,5
Высота после шлифовки перед осадкой, мм	45,5	43	41
Высота после проведения операции осадка, мм	39,5	39,5	39,5
Данные расчетов			
A	0,114	0,129	0,145
a	1,29	1,457	1,64
R <sub>з</sub>	789	861	813
$\tau_{ост}^{max}$ , МПа	-403	-398	-341
$\tau_{ост}^{min}$ , МПа	-3	+23,1	+71,4
Пластическая область со стороны внутренней поверхности пружины, глубина мм	0,51	0,34	0,16

Была разработана новая технология изготовления пружины сжатия двигателя ВАЗ, включающая следующие операции:

1. Контроль проволоки на соответствие техническим условиям на поставку и сертификату. Сталь 70ХГФА-Ш,  $3,6 \pm 0,05$ , ТУ 14-4-1380-86. Изготовитель БМК, г.Белорецк. Импортный аналог - проволока Oteva 60, изготовитель – фирма «Garphyttan», (Швеция). DIN EN 10270-2 – 2012. Проверяются геометрические размеры, механические и технологические свойства-

2. Навивка. Пружинонавивочный автомат FS-5. Высота после навивки  $H_0 = 47,8 \pm 0,2$  мм. Намагниченные дефектные участки проволоки отбраковываются при навивке автоматически. Перед навивкой серийной партии пружин изготовить технологические образцы 10...20 шт для определения величины изменения размеров высоты  $H_0$  и диаметра после термической обработки

3. Отпуск. Печь СКЗ 4.30. Температура печи  $410 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Время выдержки 30 минут.



4. Шлифовальная. Торцешлифовальный станок FSA-6. Высота после шлифовки  $H_0 = 43,0 \pm 0,2$  мм
5. Контроль магнитно-люминисцентный 100 %. Дефектоскоп 505-022.
6. Промывка. Моечная машина 141-021.
7. Дробемётная. Установка «Pangborn», (Италия). Загрузка бункера не более 45 кг. Скорость дробемета 65 м/с. Время обработки 16 минут – справочное. Зависит от твердости дробы, изношенности дробы и др. Дробь ДСЛ 0,5 545 ГОСТ 11964-81. Стрела прогиба контрольной пластинки  $A \geq 0,35 \pm 0,05$  мм.
8. Термомеханическая. Печь «Fiat», (Италия). Температура  $240^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$  Время нагрева 8 мин. Горячая осадка пружины, выдержка 3-4 сек., подача эмульсии. Пружины с цветами побежалости, начиная с бледно-красного ( $255^\circ\text{C}$ ), фиолетового ( $295^\circ\text{C}$ ) являются недопустимым браком.  
Цель термоосадки – создать на поверхности пружины сжимающие напряжения.
9. Промывка. Моечная машина 141-021
10. Холодная 3-х кратная осадка и контроль по нагрузке.  
Станок модели АЕЗ.1000. Деформировать пружины осадкой до смыкания витков 3 раза и сортировать по нагрузке с определением количества пружин в % заниженных и завышенных по нагрузкам  $P_1, P_2$ .
11. Шлифовальная специальная. Установка Н914-06. Шлифовать фаски  $0,4^{+0,5} \times 45^\circ$  с двух сторон поочередно.
12. Фосфатирование Phosf. ТУ 5.00432
13. Контроль внешнего вида и размеров
14. Консервация. Пропитать пружины смазкой «Росойл-500» ТУ 10.001-06377289-95
15. Испытания на стойкость к релаксации нагрузки «крип» и на циклическую долговечность.
16. Упаковывание

**Шестая глава** посвящена экспериментальной проверке напряженно-деформированного состояния пружин методом травления контрольной пластинки и рентгеновским методом. Установлено, что глубина залегания остаточных напряжений от дробеметной обработки (глубина наклепа) составляет  $\sim 0,21$  мм.

По результатам экспериментов были определены максимальные сжимающие напряжения в сечении витка и глубина распространения остаточных напряжений (рис.10), а также установлено, что последующий

отпуск после дробеметной обработки при температуре 240°C практически не уменьшает остаточные напряжения, а отпуск при 350°C уменьшает их в 5 раз.

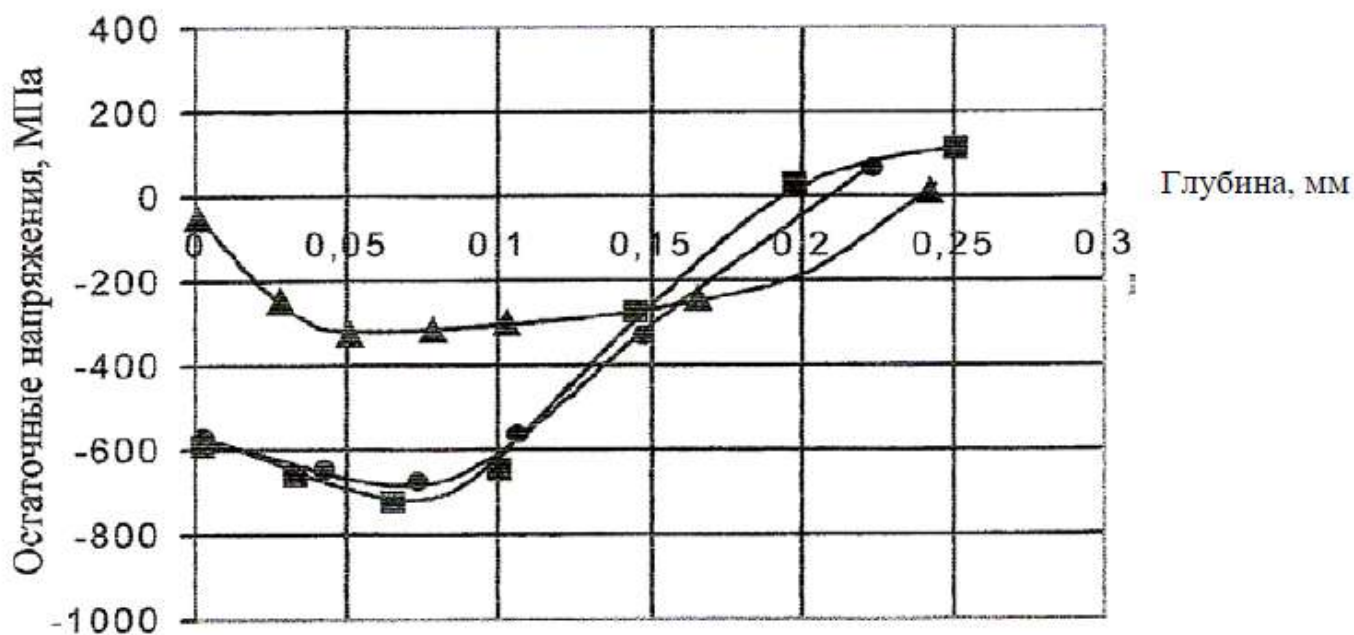


Рис.10. Распределение остаточных напряжений на внутреннем волокне после дробеметного наклепа, полученные рентгеновским методом:

- - партия 1 (без отпуска);
- - партия 2 (отпуск при 220°C в течение 30 мин);
- ▲ - партия 3 (отпуск при 350°C в течение 15 минут)

В седьмой главе проведена разработка метода испытаний высоконагруженных пружин сжатия с увеличенной высотой и шагом на усталость и построение кривой Велера. Испытания пружин проводились на стенде резонансного типа «Reicherter», позволяющем испытывать одновременно до 256 пружин с частотой колебаний 1600...1800 в минуту.

Для испытания использовали специально навитые пружины с завышенной длиной и шагом (рис. 11).

Результаты испытаний приведены к отнулевому циклу и построена усталостная кривая. Обработку результатов испытаний выполняли с применением методов математической статистики.

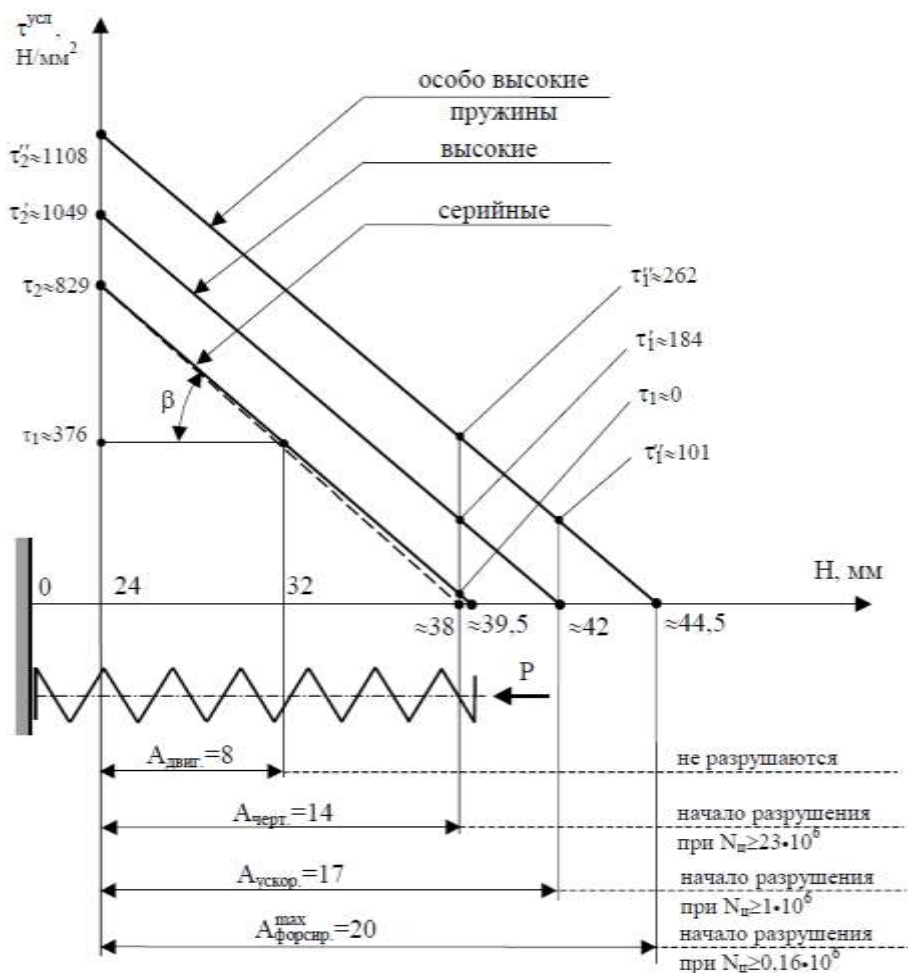


Рис.11. Параметры и результаты усталостных испытаний пружин

**В восьмой главе** приведены результаты исследования зависимости качества высоконагруженных пружин сжатия от технологических характеристик операций изготовления. Изучено влияние величины партии пружин на глубину и распределение наклепа при дробеметной обработке.

После усовершенствования технологии производства пружин клапана прекратились случаи разрушений пружины при работе в двигателе. Предложен метод контроля режима нагрева пружин при горячей осадке по цветам побежалости, с помощью которого определено минимально необходимое время прогрева пружин в печах горячей осадки, что позволило с изменением циклограммы работы печи повысить производительность на 35%.

Изучено влияние температуры на разупрочнение проволоки (рис.12) и определено, при какой температуре снимаются остаточные напряжения III рода после изготовления проволоки на металлургических заводах. Экспериментально изучено влияние температуры нагрева на уменьшение остаточных напряжений от дробеметной обработки.

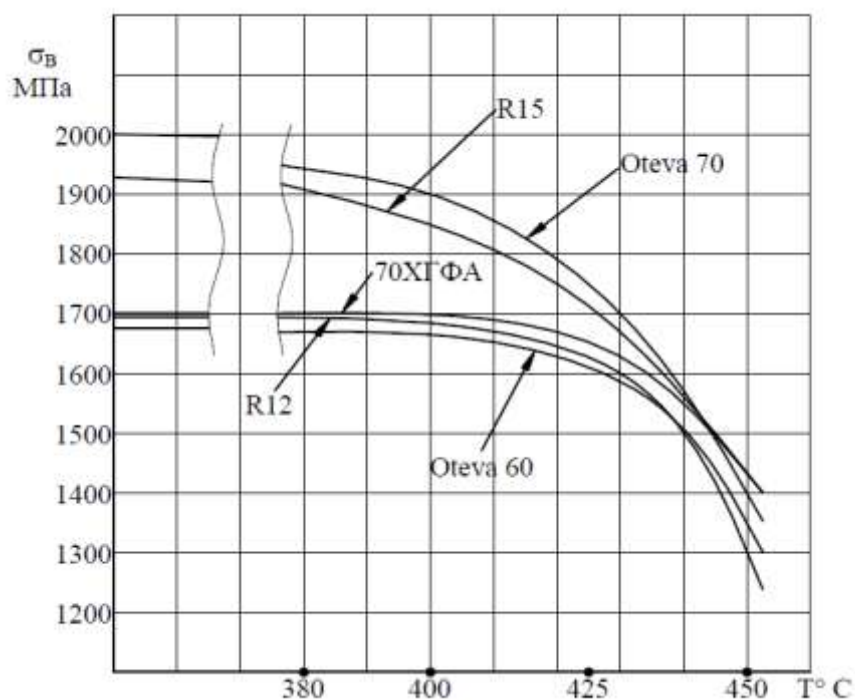


Рис.12. Разупрочнение проволоки с увеличением температуры отпуска

Также исследована зависимость остаточной деформации пружин от температуры и продолжительности операции горячей осадки. Установлено, что применение предложенной технологии позволяет уменьшить температуру нагрева пружин перед их осадкой (рис.13).

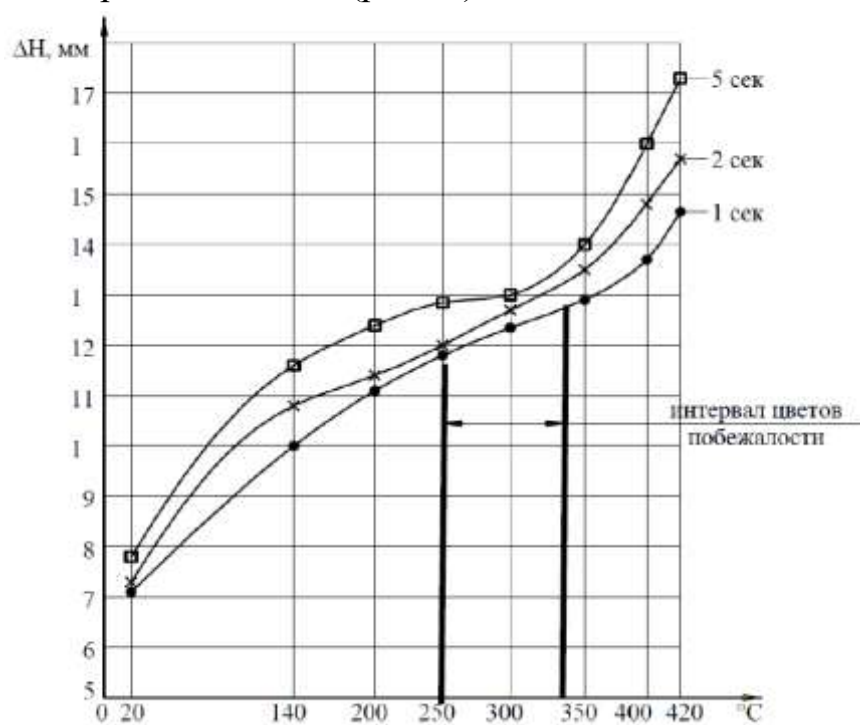


Рис.13. Влияние температуры и времени выстоя под нагрузкой на остаточную деформацию пружины

**В заключении** представлены основные результаты и выводы.

**Приложения** содержат данные по отдельным экспериментальным и теоретическим исследованиям, сведения об использовании результатов работы на машиностроительных предприятиях, а также копии патентов Российской Федерации на технические решения, предложенные в работе.

Автор выражает глубокую признательность сотрудникам АО «БЕЛЗАН», АО «АвтоВАЗ, АО «Красная Этна», ФГБОУ ВО «УГАТУ» и «ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева», ГНЦ ФГУП «НАМИ» за содействие и ценные рекомендации при выполнении данной работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

В диссертации представлены научно обоснованные технические решения, заключающиеся в разработанной технологии изготовления высоконагруженных пружин сжатия, обеспечивающей повышение их качества, снижение энергозатрат и трудоемкости в условиях массового производства, применение которых вносит значительный вклад в развитие машиностроения нашей страны.

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

1. На основании анализа современного состояния технологий изготовления, упрочнения и материалов для изготовления высоконагруженных пружин сжатия установлена недостаточность рекомендаций и методик проектирования технологии изготовления высоконагруженных пружин сжатия с рациональными режимами формообразования и пластического упрочнения, обеспечивающих требуемое высокое качество и прочность получаемых изделий

В связи с этим отмечена необходимость разработки научно обоснованных технических рекомендаций, направленных на повышение качества высоконагруженных пружин сжатия за счет совершенствования технологии их изготовления. Проведение комплексных исследований процесса изготовления, включая операции безоправочной навивки и упрочнения ответственных высоконагруженных пружин сжатия, позволяет провести их математическое описание и разработать практические рекомендации по проектированию технологии изготовления высоконагруженных пружин сжатия для обеспечения их высокого качества, снижения энергозатрат и трудоемкости в условиях массового производства.

2. С использованием основных положений теории обработки металлов давлением выполнен аналитический расчет напряженно-деформированного состояния при безоправочной навивке высоконагруженных пружин сжатия при комбинированном нагружении с учетом четырех силовых факторов: сжатия, изгиба, кручения и сдвига, позволяющее установить распределение напряжений в сечении пружины, изучена эволюция границы упругой области сечения витка, а также определить значения силовых факторов комбинированного

нагрузки, при которых происходит потеря несущей способности цилиндрического стержня.

3. Проведенные теоретические исследования процесса безоправочной навивки высоконагруженных пружин сжатия позволили определить рациональный угол приложения минимальной силы шагообразования при навивке, равный  $225^\circ$ , применение которого снижает вероятность повреждения поверхности проволоки рабочим инструментом при шагообразовании.

4.. Разработанная математическая модель упрочнения высоконагруженных пружин сжатия позволяет определять напряженно-деформированное состояние пружины после трех упрочняющих операций с пластическим деформированием, учитывать взаимное влияние дробеметной обработки, горячей осадки с учетом механических свойств и температуры обработки, 3-х кратной осадки при комнатной температуре.

Методом травления и рентгеновским методом установлено, после дробеметной обработки остаточные касательные напряжения в сечении пружины уменьшаются, а после холодной осадки они почти полностью восстанавливаются. При этом, глубина упрочненного поверхностного слоя при дробеметной обработке равна 0,18...0,25 мм, а остаточные напряжения сжатия равны 600...700 МПа. Отпуск при температуре  $220^\circ\text{C}$  не уменьшает величину этих напряжений, а отпуск при температуре  $350^\circ\text{C}$  разупрочняет материал пружины примерно в 5 раз.

Проведенные экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния пружины при упрочнении, проведенные методом травления и рентгеновским методом, позволили подтвердить высокую сходимость расчетных и экспериментальных значений касательных и нормальных остаточных напряжений и глубины их распространения. При этом наибольшее отклонение расчетных и экспериментальных параметров составило 12,5 %.

5. При использовании разработанного метода испытаний с помощью специально навитых пружин с завышенной высотой и шагом построена усталостная кривая Велера для сталей 70ХГФА и «Oteva 60».

6. В результате проведенных опытных испытаний для оценки качества высоконагруженных пружин сжатия установлено, что:

- угол подъема при формообразовании крайних витков влияет на геометрическую точность пружин, а именно на непараллельность торцевых плоскостей и их перпендикулярность к образующей пружины.

Для устранения брака по непараллельности и перпендикулярности торцевых плоскостей пружин предложена и внедрена новая конструкция контрольного приспособления для повышения точности настройки пружинонавивочного автомата;

- проведенное измерение температуры с помощью метода побежалости позволило определить минимальную продолжительность нагрева пружин перед горячей осадкой в печи, которая составила не более 5-6 мин, что позволяет повысить производительность при горячей осадке в 1,35 раза;

- повышение температуры нагрева для горячей осадки от 20°C до 400°C приводит к 2-х кратному увеличению остаточной осадки пружин, при этом определен недопустимый диапазон температур нагрева от 250°C до 350°C из-за повышенной хрупкости материала пружин.

7. Разработанная методика проектирования технологических процессов производства высоконагруженных пружин сжатия защищена патентами Российской Федерации (патенты РФ № 2210486 и 2208056) и может быть использована в пружинных цехах машиностроительных предприятий для изготовления широкой номенклатуры высококачественных высоконагруженных пружин сжатия, снижения энергозатрат и трудоемкости в условиях массового производства.

8. Разработана технология изготовления высоконагруженных пружин сжатия двигателей ВАЗ, применение которой позволило:

- повысить качество пружин и снизить объем технологического брака при контроле нагрузки в 1,5-2 раза;

- уменьшить остаточную деформацию при испытаниях на крип с 6...7,5% до 3...5%;

- снизить потребление электроэнергии в 2 раза и трудоемкость до 1,5 раз вследствие уменьшения температуры с 380 °C до 240 C, исключения 4-х технологических операций и операции сортировки по нагрузке.

Разработанные технологии производства пружин сжатия двигателей внедрены в производство в АО «БЕЛЗАН», ООО «Волгоградский метизный завод» и других предприятиях.

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

### ***Монографии***

1. Лавриненко Ю.А., Белков Е.Г., Фадеев В.В. // Упрочнение пружин. Издательский дом «Бизнес-Партнёр», 2002. 124 с.
2. Лавриненко Ю.А. // Изготовление высоконагруженных пружин сжатия. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 224 с.

### ***Справочник***

3. Белков Е.Г., Лавриненко Ю.А. Навивка пружин и гибка проволоки на автоматах/ Ковка и штамповка: Справочник. В 4 т. Т.3. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков / Под ред. А.М.Дмитриева.

2-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. Е.И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. 352 с.

***В изданиях, входящих в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук»***

4. Лавриненко Ю.А. Анализ возможных вариантов технологий упрочнения пружин клапана двигателя внутреннего сгорания. / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2002. №3. С.39-41.
5. Лавриненко Ю.А. Изучение зависимости качества наклёпа от объёма загрузки пружин в дробемётную камеру // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2002. С. 42-45.
6. Белков Е.Г., Лавриненко Ю.А., Соломатов М.Г. Оптимальный угол приложения усилия шагообразования при безоправочной навивке пружин. // Вестник Южно-Уральского государственного университета № 6 (15). Сер. «Машиностроение», Вып. 2. Изд-во ЮУрГУ. 2002. С.41-45.
7. Лавриненко Ю.А. Уменьшение силы шагообразования при безоправочной навивке ответственных пружин сжатия // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2009. №10. С. 11-15.
8. Лавриненко Ю.А. Построение диаграммы деформирования проволоки 70ХГФА-Ш по испытаниям пружины на сжатие в пластической области // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2010. №7. С. 11-15.
9. Лавриненко Ю.А. Метод форсированных испытаний пружин клапана на выносливость // Автомобильная промышленность. 2010. № 7. С. 26-27.
10. Лавриненко Ю.А. Математическая модель процесса упрочнения пружин клапана двигателей автомобилей // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Том 15. № 7. С. 302-310.
11. Лавриненко Ю.А. Требования к материалам и способы упрочнения пружин клапана двигателей внутреннего сгорания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. №3 (323). С.117-124.
12. Лавриненко Ю.А. Напряженно-деформированное состояние при навивке пружин од воздействием комбинированного нагружения// Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Том 15. № 9. С. 399-404.
13. Лавриненко Ю.А. Схематизированная диаграмма деформирования  $\tau$ - $\gamma$  пружинной проволоки, построенная по результатам пластической осадки пружин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 4-1 (324 ). С.124-127.



14. Лавриненко Ю.А. Рассеивание геометрических и силовых параметров при изготовлении пружин сжатия // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2017. № 5 (325). С.86-91.
15. Лавриненко Ю.А. Разработка технологии изготовления пружины клапана двигателя легкового автомобиля // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2017. Том15. № 12. С.547-554.
16. Лавриненко Ю.А. Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления высоконагруженных пружин сжатия // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. Вып.9: в 2 ч. Ч.1.Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 421-428.
17. Лавриненко Ю.А. Экспериментальная проверка напряженно-деформированного состояния пружин сжатия при выполнении упрочняющих операций // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. Вып.9: в 2 ч. Ч.1.Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 444-449.
18. Лавриненко Ю.А. Исследование влияния температуры и времени выдержки под нагрузкой на величину остаточной деформации при термоосадке пружин сжатия// *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2017. № 6 (326). С.61-64.

#### ***Патенты***

19. Патент RU 2210486 С2 7В 24 С 7/00. Устройство для крепления пластинки при контроле интенсивности дробеметного наклёпа при обработке пружин. / Ю.А. Лавриненко и др. Оpubл. 20.08.2003 Бюл. № 23.
20. Патент RU 2208056 С2 7 С21Д9/02. Способ изготовления высоконагруженных пружин сжатия / Ю.А. Лавриненко и др. Оpubл. 10.07.2003. Бюл. № 19.

#### ***Другие публикации***

21. Лавриненко Ю.А., Белков Е.Г. О рассеивании геометрических и силовых параметров при изготовлении пружин. // *Прогрессивные технологии в машиностроении: Сб. науч. тр. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. 2002. С. 129-131.*
22. Лавриненко Ю.А., Фадеев В.В., Белков Е.Г. Время прогрева и производительность печей для термообработки пружин // *Прогрессивные технологии в машиностроении: Сб. науч. тр. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. 2002. С.133-136.*
23. Лавриненко Ю.А. Назначение отпуска после навивки пружин. // *Прогрессивные технологии в машиностроении : Сб. науч. тр. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. 2002. С. 136-139.*
24. Лавриненко Ю.А., Фадеев В.В. Разработка технологии изготовления опытной партии пружин ВАЗ 2112-1007020 // *Раздел 1 отчёта по НИР*

«Исследование причин разрушения и отработка методики усталостных испытаний клапанных пружин» Рук. темы Белков Е.Г. –№ гос. регистр. 01.2001.08424. Челябинск, ЮУрГУ. С. 8-28.

25. Лавриненко Ю.А., Фадеев В.В. и др. Изучение влияния некоторых параметров технологии изготовления, упрочнения и контроля на качество пружин // Раздел 1 отчета по НИР «Разработка новых технологий производства клапанных пружин, в том числе с применением новых материалов». Руководитель темы Е.Г.Белков. № гос. регистр. 01.2001.08425. Челябинск, ЮУрГУ. С. 5-31.

26. Белков Е.Г., Лавриненко Ю.А. Разупрочнение пружинной проволоки и пружин при повышенных температурах отпуска // Абразивный инструмент и металлообработка: Сб. науч. тр., Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2001. С.126-129.

27. Белков Е.Г., Лавриненко Ю.А. Методы определения качества дробеметного наклепа пружин // Повышение качества пружин, торсионов и рессор: Юбилейный сб. науч. тр. II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием // Под ред. Л.М. Редькина и В.М. Калмыкова. Белорецк: Изд-во ОНИКС, 2001. С.128-135.

28. Лавриненко Ю.А. Белков Е.Г., О точности ускоренных испытаний пружин на выносливость в малоцикловой зоне // Повышение качества пружин торсионов и рессор: Юбилейный сб. науч. тр. II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Под ред. Л.М. Редькина и В.М. Калмыкова. Белорецк: Изд-во ОНИКС, 2001. С.136-140.

29. Белков Е.Г., Соломатов М.Г., Лавриненко Ю.А. Несущая способность круглого стержня при комбинированном нагружении изгибающим моментом и перерезывающей силой.// Технология и машины обработки давлением: Юбилейный сб. науч. тр. Челябинск: Издат. АН РФ, 2003. С.137-142.

30. Белков Е.Г., Лавриненко Ю.А., Соломатов М.Г. О предельном нагружении стержня при одновременном воздействии изгибающего и крутящего моментов, осевой и перерезывающей сил // Технология и машины обработки давлением: Юбилейный сборник науч. тр. Челябинск: Изд-во Уральское отделение РАН, 2003. С.137-142.

31. Закиров Д.М., Лавриненко Ю.А., Фадеев В.В. Исследование причин разрушения и отработка методики усталостных испытаний клапанных пружин // Отчет по НИР, Г.Р. №01.2001.08424. Рук. Темы Е.Г. Белков. Челябинск: ЮУрГУ. 92 с.

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

33. Лавриненко Ю.А., Мартыненко М.Е., Фадеев В.В., Глушков М.А. Разработка математической модели процесса упрочнения // Раздел 4 отчёта по НИР. Исследование причин разрушения и отработка методики усталостных испытаний клапанных пружин. Рук. темы Е.Г.Белков. № гос. регистр. 01.2001.08424. Челябинск, ЮУрГУ, 2001. С. 64-92.
34. Лавриненко Ю.А., Фадеев В.В., Шеркунов Г.В. Разработка новых технологий производства клапанных пружин, в том числе с применением новых материалов // Отчёт по НИР. Рук. темы Е.Г.Белков. № гос. регистр. 01.2001.08425. Челябинск, ЮУрГУ. 46 с.
35. Белков Е.Г., Соколов К.О., Лавриненко Ю.А. Новая технология упрочнения высоконагруженных пружин растяжения и сжатия из круглой проволоки // Отчет по НИР. Рук. темы Е.Г.Белков. № гос. регистр. 04.950.005063. Челябинск, ЧГТУ, 1996г.
36. Фадеев В.В., Лавриненко Ю.А. Повышение эффективности технологий высокоресурсных клапанных пружин для двигателей ВАЗа // Юбилейный сб. науч. тр. II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием // Под ред. Л.М. Редькина и В.М. Калмыкова. Белорецк: Изд-во ОНИКС, 2001. С. 90-96.
37. Лавриненко Ю.А., Белков Е.Г. Перспективы развития методов проектирования высоконагруженных упрочненных пружин для машиностроительных и металлургических агрегатов // Научно-технический прогресс в металлургии (сб. науч. тр.). Алматы, РИК по учебной и методической литературе, 2007. С. 45-47.
38. Грешнов В.М., Лавриненко Ю.А., Напалков А.В. Инженерные физические модели материала и деформируемость материала / Сборник докладов всероссийской научно-технической конференции // «Новые материалы и технологии». М.: МАТИ, 1996. С. 43.
39. Лавриненко Ю.А. Уменьшение силы шагообразования при безоправочной навивке ответственных пружин сжатия // Пружины. 2016. № 1. С. 15-18.
40. Лавриненко Ю.А. Параметры тройного упрочнения пружин клапана двигателей ВАЗ // Пружины. 2016. № 1. С. 34-36.

Подписано к печати

Зак.

Объем 2 п.л. Тир. 100

Издательство ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»