

05.03.05

Ф 152

КОНТРОЛЬ  
ЭКСПЕРТИЗА  
На правах рукописи

Фадеев Виктор Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
КЛАПАННЫХ ПРУЖИН ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА.**

Специальность 05.03.05 — «Технологии и машины  
обработки давлением». Технические науки

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Челябинск

2003

Работа выполнена в ОАО «Белебеевский завод Автономаль» и Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель —  
доктор технических наук, профессор Белков Евгений Григорьевич.

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук, профессор Мазеин Петр Германович;  
кандидат технических наук, доцент Васильев Станислав Паладиевич.

Ведущее предприятие — АО «Белорецкий завод тракторных рессор и пружин».

Защита состоится «    »                      2003 г., в 15-00, на заседании диссертационного совета Д 212.111.03 в Магнитогорском государственном техническом университете им. Г.И. Носова (455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38).

Ваш отзыв, заверенный гербовой печатью, просим прислать по вышеуказанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.

Автореферат разослан «    »                      2003 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук,  
профессор



Ю.В.Жиркин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В технике передовых стран, а в последнее время и в отечественном машиностроении все чаще применяются высоконагруженные упрочненные пружины рациональной конструкции, экономящее монтажное пространство. Наиболее яркими представителями высоконагруженных, компактных и надежных пружин являются наружная и внутренняя пружины клапана двигателей автомобилей семейства ВАЗ 2101...2109. Эти пружины спроектированы на пределе технологических возможностей для экономии монтажного пространства, габаритов и веса двигателя. Поэтому малейшие нарушения режимов упрочняющей обработки или неудовлетворительное качество металла сразу же сказываются на их эксплуатационных свойствах. Пружины разрушаются на испытательных стендах, в двигателях или не выдерживают испытаний на крип (релаксационную стойкость). В связи с этим пружины клапана при изготовлении проходят 18 технологических операций. Из них три упрочняющие: термоосадка, дробемётный наклёп и холодная осадка. При подготовке производства нового двигателя ВАЗ 2112 выяснилось, что в литературных источниках отсутствуют рекомендации и методики проектирования технологии с оптимальными параметрами упрочнения пружин. После упрочняющих операций в наружных и прилегающих к ним волокнах витка пружины создается сложное напряжённо-деформированное состояние с остаточными напряжениями, повышающими усталостную прочность. Методик по расчету оптимального соотношения параметров упрочнения в настоящее время нет. Поэтому первые опытные партии новых по конструкции пружин, изготовленных для двигателей автомобиля ВАЗ 2112 по экспериментальной технологии, оказались неудовлетворительного качества, часть пружин не выдержала форсированных испытаний на выносливость. Требования абсолютной надёжности этих пружин обусловлены тем, что в двигателе ВАЗ 2112 четырёхклапанные цилиндры, а на каждом клапане установлено по одной пружине. Поломка пружины ведет к аварийному выходу из строя всего двигателя с поломкой других деталей.

Несмотря на значительное количество публикаций за последние годы и в предыдущий период по проектированию, изготовлению и упрочнению пружин только в трех работах затронуты вопросы касающиеся непосредственно пружин клапана. Также в известной литературе отсутствует рекомендации по выбору рациональных технологических параметров изготовления и упрочнения, что в условиях массового производства затрудняет поиск причин, приводящих к снижению динамической прочности. Существующий технологический процесс является энергозатратным с повышенной трудоемкостью и значительным технологическим отсевом.

Все вышеизложенное говорит об актуальности темы диссертации и позволяет сформулировать *научно-техническую задачу\**: «Повышение

\* В качестве соруководителя в работе принимал участие И.Н. Закиров Д.М.

надёжности и качества пружин клапана путём исследований и совершенствования технологического процесса изготовления, упрочнения и испытаний, с учётом массового характера производства».

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена описанию состояния вопроса, обзору литературных источников, постановке задач исследования. В частности рассмотрены современные пружинные материалы и их свойства. Особое внимание уделено проволоке для производства клапанных пружин, закаленных до навивки 70 ХГФА-Ш, Отева и др., диаметром 3,6 мм.

Рассмотрены способы упрочнения: заневоливание, пластическая холодная осадка, термоосадка, дробеметный наклеп, гидрообразивная и пескоструйная обработка. Проведен обзор теоретических и экспериментальных работ по литературным источникам.

Научные школы пружинщиков, созданные Пономаревым С.Д. в Ижевске и в Москве являлись в послевоенное время самыми крупными в России. Фундаментальные исследования проводили крупные ученые: Малинин Н.Н., Заседателев С.М., Блинник С.И., Чернышев Н.А., Быков В.А., Андреева Л.Е., Берман М.Э., Попов Е.П., Штода А.В., Карпунин В.А., Коновалов А.А., Остроумов В.П. и др. В это же время и позднее вышли монографии Фролова Г.Н., Хвингия М.В., Шалина В.Н., Ушакова Н.Н.

В последующий период публикации в этой области резко сократились и возобновились только в 70-е годы в связи с бурным развитием машиностроения и особенно автомобилестроения. Продолжали исследования в области производства упругих элементов в Ижевской научной школе: Полищук Д.Ф., Шаврин О.И., Бармин Д.П., Редькин Л.М., Щербаков Е.И., Кирсанов Ю.А. и др.

Большой вклад в решение научных и практических вопросов пружинного производства внесли ученые Казанского авиационного института: Ахмеров А.Ф., Махмудов А.М., Давлетшин Э.З.

Особо следует отметить основополагающие работы Навроцкого Г.А. и Белкова Е.Г. в области теории и практики технологии изготовления и упрочнения пружин массового производства, а так же в области проектирования оборудования и навивочной оснастки. Последние работы выполнены на базе освоения пружин для автомобилей ВАЗ и КамАЗ.

Работы Фролова Г.Н. посвящены вопросам управления качеством компенсацией упругих погрешностей, селективным отбором и др., что возможно только в мелкосерийном производстве. Так же проблемам качества посвящены работы Редькина Л.М. и его докторская диссертация, в которой рассмотрены принципы управления качеством с применением высокотемпературной механической обработки.

Созданию методов расчета параметров технологических операций и процессов упрочнения посвящены работы Пономарева С.Д., Малинина Н.Н., Феодосьева В.И., Ахмерова А.Ф. и др. Но большинство этих работ касается

навивки на оправку, т.е. для мелкосерийного производства. Пружинам клапана посвящено три работы. Из них только в работе Белкова Е.Г. приведены исследования по влиянию режимов шлифовки на перпендикулярность торцев, режимов дробеструйного наклепа на релаксационную стойкость, а так же приведены данные по рассеиванию длины пружины 2101-1007020 в процессе формообразующих, термических и упрочняющих операций. Т.е. приведены сведения по некоторым из 18 технологических операциям, а не по всему циклу производства.

В работах Бойцова В.Б., Скрипкина Д.Е., Чернявского А.О., а так же в работах и докторской диссертации Мазеина П.Г. приведен теоретический анализ образования остаточных напряжений при виброупрочнении вообще и в частности при дробеструйном наклепе. Однако наклепываемый материал и режимы обработки отличаются от режимов обработки клапанных пружин.

Все изложенное выше определило цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации проведены исследования параметров упрочнения при термоосадке и дробеметном наклепе. Проведен сравнительный анализ чертежей пружин 2101-1007020 и новой пружины шестнадцатиклапанного двигателя 2112-1007020.

Показана связь и взаимное влияние двух упрочняющих операций: термоосадки и дробеметного наклепа. После осадки наибольшие отрицательные остаточные касательные напряжения образуются на наружных волокнах сечения. Именно эти волокна подвергаются обработке дробью и в поверхностном слое образуются остаточные двухсторонние напряжения сжатия, а остаточные касательные напряжения уменьшаются в значительной степени. Таким образом дробеметный наклеп частично снимает эффект от первой упрочняющей операции – термоосадки.

Для изучения глубины распространения остаточных напряжений от дробеметной обработки проведены экспериментальные исследования методом травления пружин и контрольных пластинок. Например на рис. 1 приведены результаты таких исследований при травлении контрольной пластинки. Наиболее полная информация получена при экспериментальных исследованиях рентгеновским методом пружин после дробеметной обработки. Пружины 2108-1007020 были отправлены на фирму «Sonats» (Франция) — изготовитель рентгеновских дифрактомеров «XSTRESS» 3000 для определения остаточных напряжений на наружном и внутреннем волокнах вдоль и поперек витка. Метод определения напряжений – дифракцией рентгеновских лучей. Это позволяет получать информацию только на поверхности, т.е. на глубине нескольких шагов кристаллической решетки атомов. Замер напряжений на глубине осуществляется пошаговым снятием материала химическим травлением. Итоговая погрешность результатов изменений составила ~5% от максимального уровня. Часть результатов исследований приведена на рис. 2.

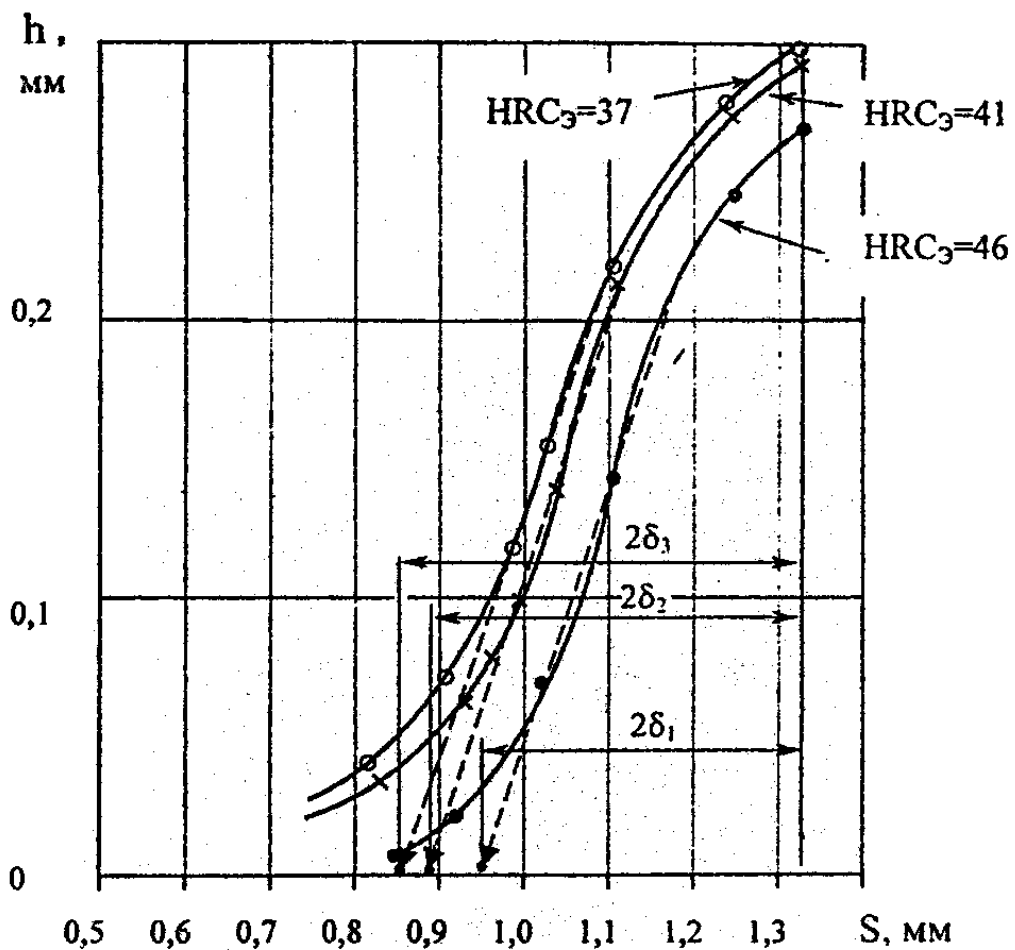


Рис. 1. Зависимость прогиба пластинки  $h$  от ее толщины  $S$  и твердости при травлении в кислоте;  $\delta_i$ -глубина наклепа

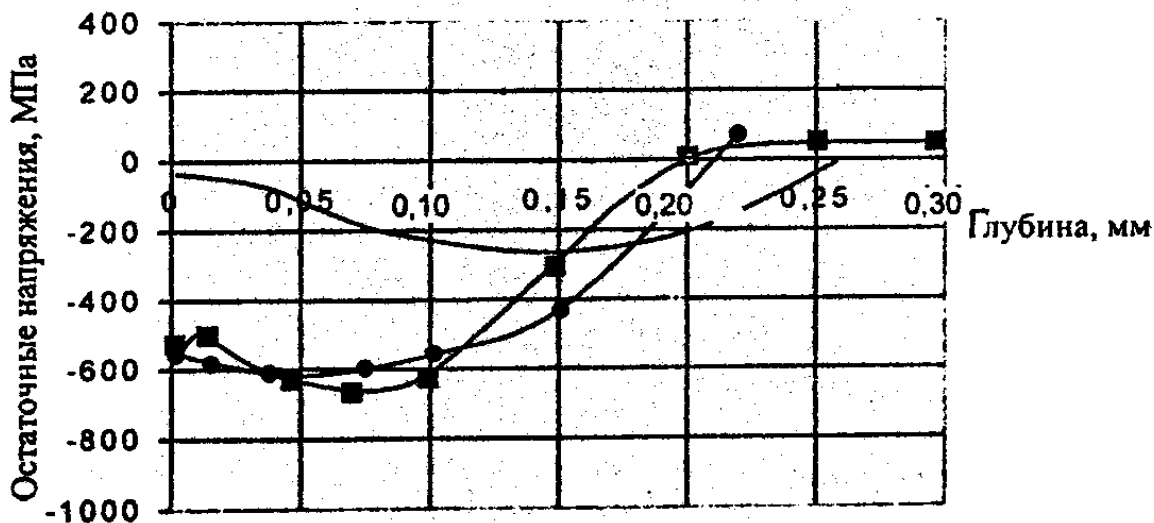


Рис. 2. Эпюра остаточных напряжений после дробеметного наклепа:

- — партия 1 без отпуска;
- — партия 2 отпуск при  $220^\circ\text{C}$  в течении 30 минут;
- — партия 3 отпуск при  $350^\circ\text{C}$  в течении 15 минут

Анализируя их можно сделать выводы о том, что максимальный уровень напряжений составляет 400...700 МПа, остаточные напряжения вдоль и поперек волокна, а так же на внутреннем и внешнем волокнах одинаковы, глубина распространения напряжений составляет 0,18...0,25 мм, что соответствует экспериментам с травлением пружин и контрольных пластинок. Получен очень важный вывод о том, что при завышенных температурах отпуска после дробеметного наклепа остаточные напряжения релаксируют и уменьшаются в несколько раз, т.е. пружины разупрочняются.

В третьей главе приведены исследования влияния технологических параметров изготовления, упрочнения и контроля на качество клапанных пружин.

Анализируя результаты замеров длины пружин Н при навивке, сделан вывод, что случайное рассеивание составляет  $\Delta H = 0,4...0,6$  мм, т.е. сопоставимо с деформацией пружины 2112-1007020 при выборе допуска на нагрузку  $\Delta P_1$ . Смещение гистограммы по времени носит экспоненциальный характер. Если не поднастраивать навивочный автомат в течении 30 минут, то общее рассеивание превысит случайное в два раза. Так же проведены исследования по величинам рассеивания длины пружины по всем технологическим переходам.

Получены новые результаты при изучении зависимости качества наклепа от объема загрузки пружин в дробеметную камеру (рис. 3). При анализе графика сразу же возникает вопрос: почему контрольная пластинка одинаково быстро наклепывается и при загрузке 20 кг и при загрузке 110 кг, а при 110 кг даже быстрее? Видимо потому, что тяжелая державка (приспособление для крепления пластинки) быстро опускается на дно объема легких пружин т.е. на транспортер-ворошитель, и он ее сразу же выносит в верхнюю точку. Здесь в процессе переваливания пластинка оказывается сверху пружин и намного чаще попадает под факел дроби, чем в среднем все остальные пружины. При очень большой загрузке, например 110 кг, державку поднимает выше, где плотность факела дроби больше и пластинка наклепывается быстрее, чем при малой загрузке. Построены экспериментальные графики плотности следов дробинок (штук) на наружном и внутреннем волокнах в зависимости от времени обработки и от веса разовой загрузки пружин. Количество следов от ударов дроби определялось на площади  $2,5 \text{ мм}^2$ . Площадь ограничивалась сеткой в объективе микроскопа. На основании этих исследований построен итоговый график зависимости необходимого времени обработки от веса разовой загрузки пружин и сделан ряд новых выводов (см. заключение).

В 1998 г. качество проволоки, поставляемой с Белорецкого металлургического комбината, резко ухудшилось. Это сразу же сказалось на количестве рекламаций по поломкам в гарантийный период. Анализ структуры поломок и техпроцессов показал, что чаще всего ломается пружина 2108, так как она изготавливается со значительной величиной недоосадки до соприкосновения витков. Результаты изменения количества поломок после корректировки техпроцесса представлен на рис. 4. У остальных пружин клапана в этот период надежность так же ухудшилась, но в значительно меньшей степени. Из этого сделан вывод, что с ухудшением качества проволоки в первую очередь теряют необходимый уровень качества те пружины, технологические параметры упрочнения которых не являются оптимальными (рациональными).

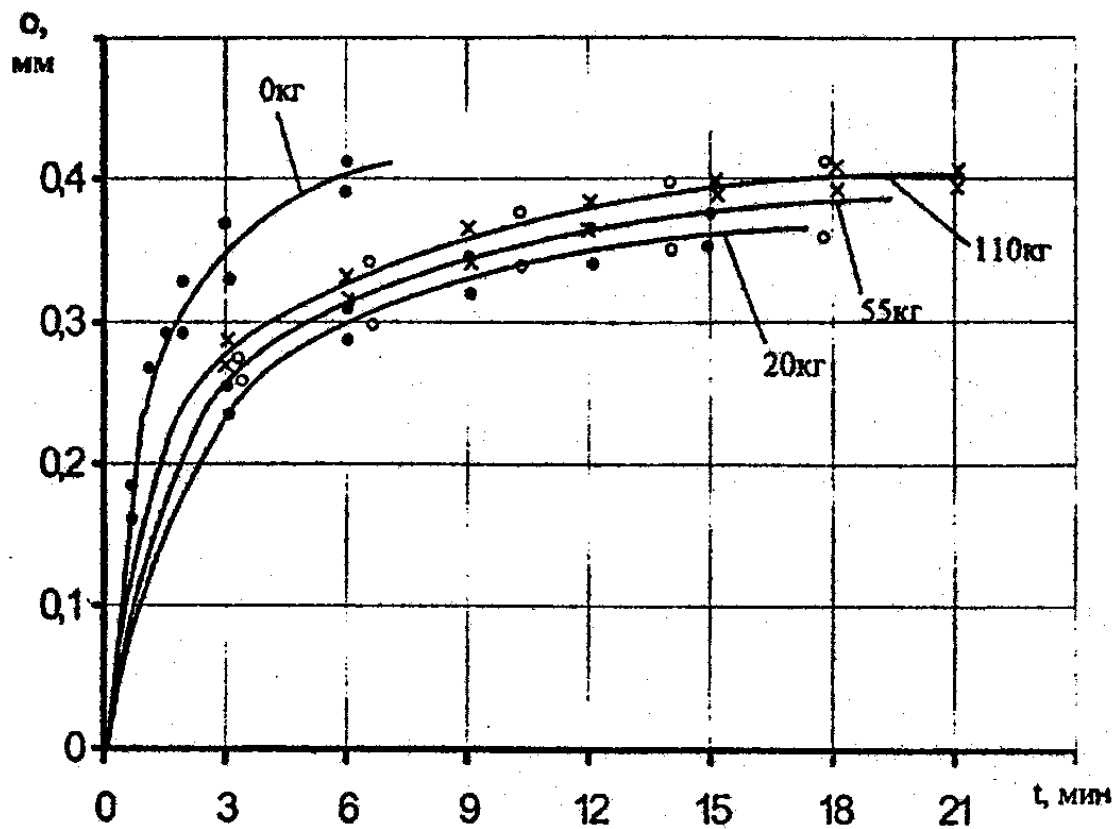


Рис. 3. Зависимость прогиба контрольной пластинки от времени обработки и от веса загрузки пружин в дробеметную камеру

В связи с дефицитом производственных мощностей по термоосадке возник вопрос о форсировании режимов нагрева. Но будут ли успевать прогреваться пружины? Был предложен простой метод определения температуры их нагрева – по цветам побежалости и построен график. Это позволило обоснованно уменьшить время нагрева пружин и повысить производительность печей при термоосадке на 35 %.

Съем в гарантийный период эксплуатации с а/м 2110

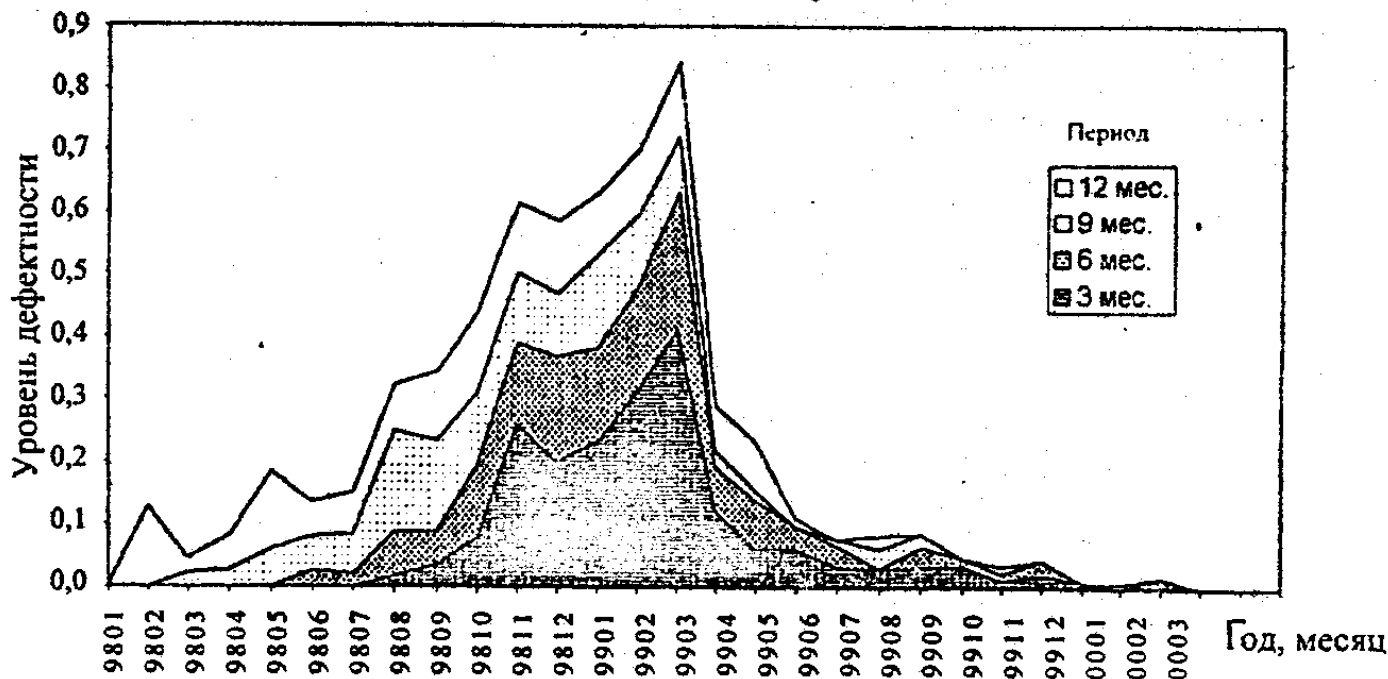


Рис. 4. Диаграмма поломок пружин 2108-1007020



В известной литературе нет объяснений, почему во время отпуска после навивки повышается нагрузка начала пластических деформаций пружин  $P_s^0 > P_s$ . Проведенные эксперименты показали, что она увеличивается на 24,6%. При этом значительного увеличения несущей способности не происходит. Кроме повышения предела текучести, связанного с выпадением мелкодисперсных карбидов, препятствующих дальнейшему движению дислокаций, увеличению нагрузки  $P_s$  способствует температурная релаксация остаточных напряжений изгиба после навивки. Расчетным методом с использованием работ Пономарева С.Д. определены остаточные напряжения  $\sigma_0$ :

$$\sigma_0 = \sigma_s - \sigma_H = \sigma_s - M \cdot \frac{32}{\pi d^3} = \sigma_s - 1,7\sigma_s = -0,7\sigma_s.$$

Используя условия пластичности Губера–Мизеса и подставляя конкретные усредненные значения  $\sigma_0$ , установлено, что увеличение нагрузки  $P_s$  за счет релаксации остаточных напряжений изгиба составляет ~12,4%, т.е. примерно половину от общего эффекта упрочнения.

Существует ли опасность перегрева пружин во время отпуска после навивки и какова предельно допустимая температура отпуска? На эти вопросы так же нет конкретного ответа в известной литературе. Поэтому была проведена экспериментальная исследовательская работа с пятью наименованиями пружинной проволоки  $\varnothing 3,6$  мм. После отпуска в шахтной печи в течении 30 минут при разных температурах по два образца подвергались испытанию на разрыв. Анализ результатов эксперимента показывает, что медленное снижение предела прочности наступает после  $380^\circ\text{C}$ , а после  $425^\circ\text{C}$  начинается «обвальное» падение предела прочности и уменьшение циклической прочности пружин.

Как влияет температура отпуска после дробеметного наклепа на выносливость пружин? В главе 2 исследованиями рентгеновским методом доказано, что температура  $350^\circ\text{C}$  уменьшает остаточные напряжения двухстороннего сжатия в пять раз, т.е. исчезают условия, препятствующие раскрытию усталостных трещин. Повлияет ли это на результаты усталостных испытаний? Для ответа на этот вопрос проведены испытания на стенде резонансного типа трех партий пружин по 8 штук при базе испытаний 6 млн. циклов:

1. Совсем без дробеметной обработки – поломались 2 пружины;
2. Наклепанные, отпуск при  $320^\circ\text{C}$  – поломалась одна пружина;
3. Наклепанные, отпуск при  $180^\circ\text{C}$  – не поломалась ни одна.

Отсюда простой, но важный вывод: при сортировке пружин по нагрузке с ручной загрузкой необходимо отбраковывать пружины, имеющие цвета побежалости.

И еще один технологический вопрос, на который нет ответа в литературе: при какой температуре можно проводить термоосадку и за счет чего в большей степени происходит осадка – за счет уменьшения предела текучести или за счет релаксации напряжений? После прогрева в лабораторной печи партии пружин

2108-1007020 до определенной температуры пружины поочередно вынимались и сразу же осаживались до соприкосновения витков на ручном приспособлении. Анализируя результаты исследований можно сделать вывод, что в интервале температур, соответствующих цветам побежалости, почти отсутствует релаксация нагрузки, т.е. это интервал температур повышенной хрупкости. Осадка при этих температурах может привести к появлению усталостных микротрещин.

**Глава 4** посвящена совместным испытаниям на выносливость опытных и опытно-промышленных партий на стенде резонансного типа фирмы «Reicherter» (Германия). Число колебаний 1600...1800 в минуту. В течение двух месяцев при работе в одну смену реализована база испытаний 26 млн. циклов. Одновременно на стенде были установлены 12 партий пружин (всего 216 штук) в том числе особо высокие пружины, а также пружины с целевыми технологическими нарушениями (недоосадка до соприкосновения витков, со специально созданными рисками на поверхности и др.).

После приведения испытаний всех пружин к отнулевому циклу результаты обработаны методом математической статистики. По специально разработанной программе на языке Турбо-Бейсик получено уравнение регрессии и построена кривая усталости (рис. 5).

**Глава 5** является заключительной. В ней на основании технологических и конструкторских расчетов и проведенных экспериментов в предыдущих главах разработана новая энергосберегающая технология изготовления для пружины 2112-1007020 и для всех клапанных пружин. Расчеты выполнены по методике, учитывающей научные труды Пономарева С.Д. и Белкова Е.Г.

Для того чтобы получить схематизированную диаграмму сдвига (упруго-пластическую без упрочнения) необходимо знать точную диаграмму, построение которой осуществлено по формуле (рис. 6):

$$\bar{\tau} = \frac{3}{4} \left[ 3,41 - 2,41\bar{P}^* + \sqrt{\left( 11,63(\bar{P}^* - 1)^2 - (\bar{\gamma} - 2,41\bar{P}^* + 1,41)^2 \right)} \right] - \frac{(\bar{\gamma} - 2,41\bar{P}^* + 1,41) \cdot \bar{\gamma}}{4 \sqrt{\left( 11,63(\bar{P}^* - 1)^2 - (\bar{\gamma} - 2,41\bar{P}^* + 1,41)^2 \right)}}.$$

Граница, отделяющая упругое ядро от пластической зоны сечения витка, представляет собой дугу эллипса (рис. 7), центр которого смещён от центра поперечного сечения витка с радиусом R в сторону внешнего волокна на некоторое расстояние e. Полуоси этого эллипса:

$$a = \frac{A(R + e)}{\sqrt{1 - A^2}}; \quad b = \frac{A(R - e)}{\sqrt{1 - A^2}}.$$

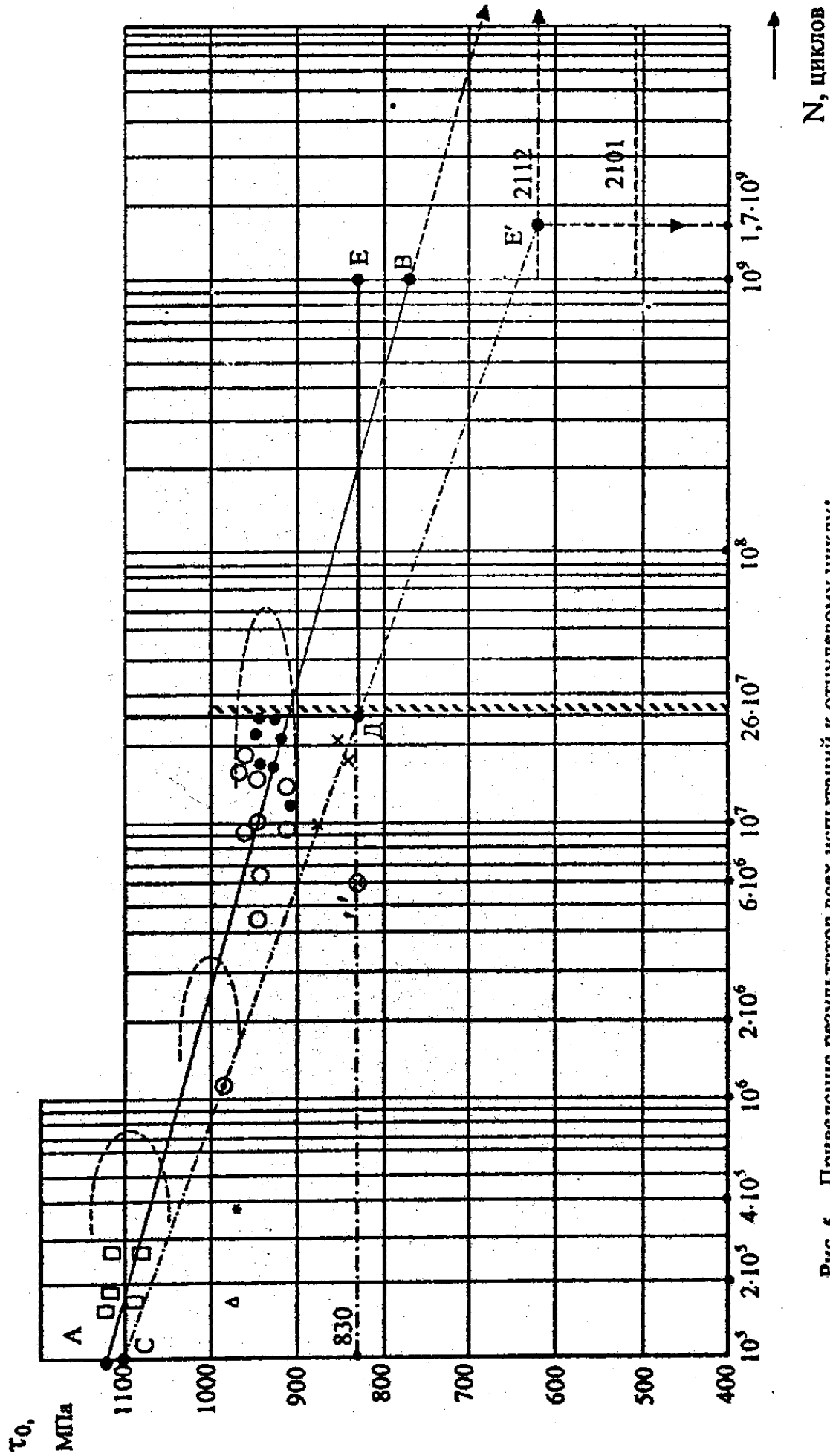


Рис. 5. Приведение результатов всех испытаний к отпущенному циклу:  
 — предпологаемая область поломки неразрушенных пружин;

x, \*,  $\Delta$  — специальный брак технологии

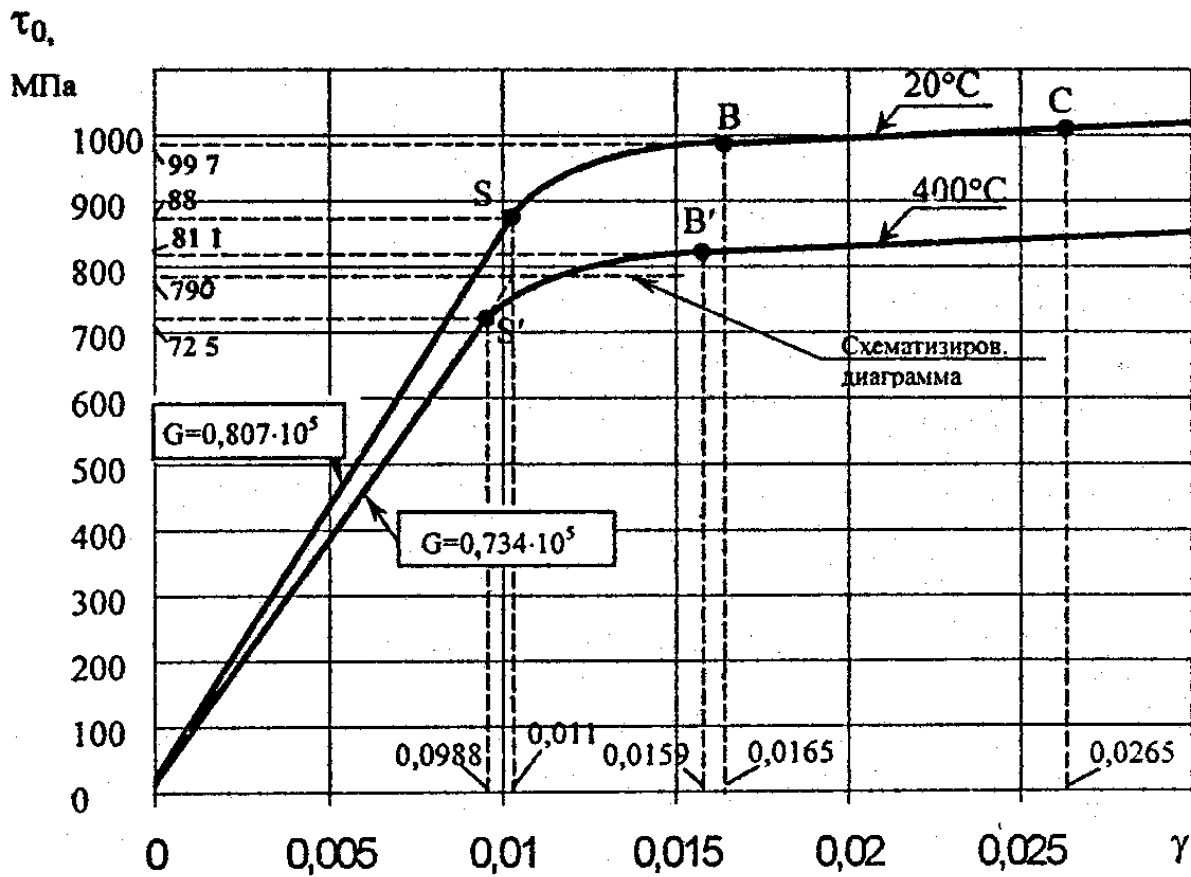


Рис. 6. Диаграмма деформирования пружинной стали 70XГФА-III

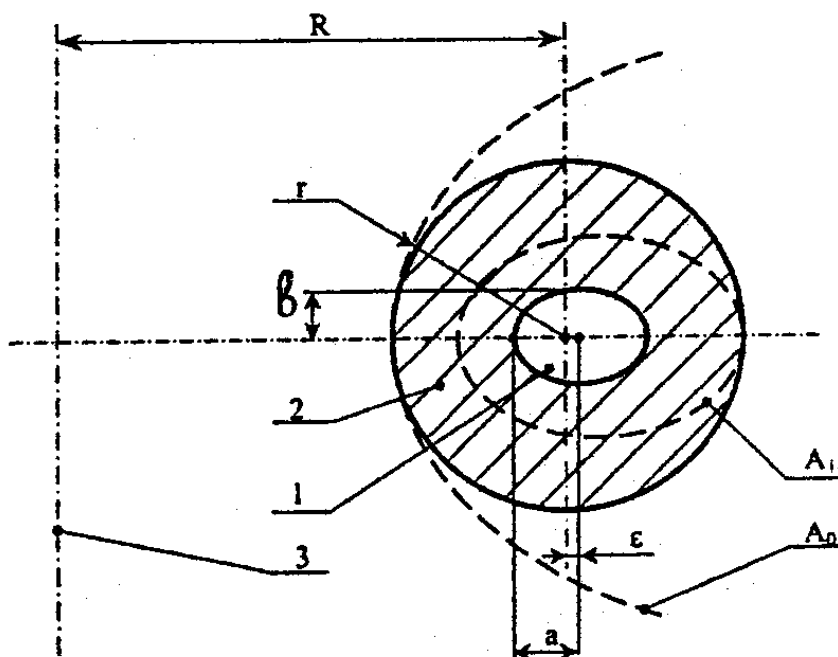


Рис. 7. Эволюция эллипсообразной границы, отделяющей упругую часть сечения от пластической: 1 – упругая часть; 2 – пластическая; 3 – ось пружины

Формулы для расчета параметров нагружения, максимальной нагрузки и остаточных напряжений на внутреннем и наружном волокнах витка имеют вид:

$$A = \frac{2\pi R n \tau_s}{G \lambda_3}; \quad a = \frac{AR}{1 - A^2};$$

$$P_3 = \frac{2\pi \tau_s r^3}{3R} \left[ 1 - \frac{(1 - 6A^2)}{4} \left( \frac{a}{r} \right)^3 \right];$$

$$\tau_{ост}^{max} = \tau_s - \frac{P_3 R^2 r}{J_p} \cdot \frac{\left( 1 + \frac{r}{4R} \right)}{(R - r)};$$

$$\tau_{ост}^{min} = \tau_s - \frac{P_3 R^2 r}{J_p} \cdot \frac{\left( 1 - \frac{r}{4R} \right)}{(R + r)}.$$

Результаты расчета остаточного напряжения для трех случаев возможных технологий представлены в таблице.

Таблица

Результаты расчёта

Параметры	Вариант технологии		
	1	2	3
<b>Вводимые параметры</b>			
Температура при осадке, °С	380	240	20
Условный предел текучести $\tau_s$ , МПа	790	890	890
Модуль сдвига $G$ , МПа	$7,34 \cdot 10^4$	$8,07 \cdot 10^4$	$8,07 \cdot 10^4$
Деформация до соприкосновения витка $\lambda_3$ , мм	26	23,5	21
Остаточная деформация $\Delta H$ , мм	6	3,5	1,5
Высота пружины до осадки, мм	45,5	43	41
Высота пружины после осадки, мм	39,5	39,5	39,5
<b>Расчётные параметры</b>			
$A$	0,114	0,129	0,145
$a$	1,29	1,457	1,64
$P_3$ , Н	789	861	813
$\tau_{ост}^{max}$ , МПа	-403	-398	-341
$\tau_{ост}^{min}$ , МПа	-3	+23,1	+71,4
Примерная глубина пластической зоны со стороны внутреннего волокна, $r-a$ , мм	0,51	0,34	0,16

Анализируя результаты расчета расчета можно сделать следующие выводы:  
 1. Несмотря на уменьшение глубины пластической зоны в сечении витка вариант 2 технологии создает остаточные касательные напряжения почти такие же, как и более энергозатратный вариант 1. При этом уровень выносливости (как показали испытания) удовлетворяет требованиям чертежа.

2. Вариант 3 технологии (при холодной осадке), как показала практика, не обеспечивает достаточной выносливости и релаксационной стойкости по двум причинам: более низкий уровень остаточных напряжений при малой глубине пластической зоны и отсутствие термомеханического упрочнения.

3. Уровень остаточных напряжений на внутреннем волокне настолько высокий, что в этой опасной точке при работе пружины в двигателе реализуется более благоприятный цикл нагружения, близкий к симметричному.

По результатам расчета и предыдущим исследованиям за основной вариант технологии принят вариант 2. Основные изменения техпроцесса состоят в следующем:

— Изменяется последовательность технологических операций. Сначала осуществляется дробеметный наклеп, а после термоосадка;

— Изменяется температура при термоосадке с  $380^{\circ}\text{C}$  на  $240^{\circ}\text{C}$ ;

— Аннулируются две технологические операции: предварительная дробеметная обработка и отпуск после дробеметной обработки. Также аннулируются дополнительные промывочные и транспортные операции.

Новый техпроцесс защищен патентом РФ. Для отработки технологических параметров было изготовлено и испытано много экспериментальных партий из разных материалов. При этом некоторые партии изготавливались и испытывались по двум маршрутам — традиционному и новому, чтобы сравнить, не снизилось ли качество.

В этой главе также приведены мероприятия по модернизации печей для термоосадки. Единственным недостатком новой технологии является возможность перегрева наклепанных пружин в печи термоосадки и частичная релаксация остаточных напряжений от дробеметной обработки. Для устранения этого недостатка предложено уменьшить мощность печей, сделать ее ступенчатой. В режиме ускоренного нагрева печь работает на максимальной мощности. В рабочем режиме — мощность уменьшается почти вдвое.

После проведения эксперимента по изучению времени прогрева пружин появилась возможность уменьшить время прохождения пружины по печи термоосадки с 8,5 до 5,9 минут. Но для этого необходимо было модернизировать печи, заменив “жесткую” автоматику на “гибкую”, т.е. регулируемо. Проанализировав циклограмму, было выявлено несколько ненужных пауз во времени цикла работы всех механизмов. Кроме того, загрузка пружины из лотка может происходить в любое время, когда цепь с толкателями неподвижна. Т.е. и это время являлось резервным. После модернизации автоматики печи и перестройке циклограммы удалось уменьшить время цикла с 9,5 до 7 секунд. При этом время прохождения пружины по направляющим в печи уменьшилось с 8,5 до 5,9 минут, производительность выросла с 6,3 шт./мин. до 8,5 шт./мин., т.е. на 35%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему

1. Расчетами в упруго-пластической области определено напряженно-деформированное состояние пружин в процессе изготовления. При этом учтены изменения реологических свойств материала при повышенной температуре. Установлено, что внутреннее волокно пружины работает на испытательном стенде при симметричном цикле изменения напряжений, а в двигателе с небольшим отклонением от него.

2. Экспериментальная проверка напряженно-деформированного состояния полностью подтвердила теоретические расчеты и по величине созданных касательных и нормальных остаточных напряжений, и по глубине их распространения. В частности методом травления и рентгеновским методом установлено, что глубина дробеметного наклепа при рациональных режимах составляет 0,18...0,25 мм; величина остаточных напряжений сжатия достигает 600...700 МПа, что составляет 38...45% от предела текучести материала; отпуск при температуре 220°C не приводит к релаксации этих напряжений, а при 350°C они уменьшаются примерно в 5 раз т.е. происходит разупрочнение. Остаточные напряжения на внутреннем волокне такие же, как и на наружном, т.е. и внутреннее волокно так же наклепывается до насыщения.

3. По результатам многократных длительных испытаний пружин и образцов-свидетелей построена кривая усталости. Установлено, что уровень циклической прочности пружин из отечественной стали 70ХГФА-Ш и импортной проволоки Oteva 60 примерно одинаков и соответствует данным фирмы «Garphyttan» (Швеция). Но в целом качество пружин из проволоки Oteva 60 стабильнее, так как ни одна пружина из этой проволоки не разрушилась. Опытные партии пружин, изготовленные без целевых нарушений технологии, обладают динамической прочностью, обеспечивающей требования чертежа.

4. В наибольшей степени снижает уровень динамической прочности такие технологические нарушения, как недоосадка до соприкосновения витков при термоосадке, некачественная дробеметная обработка, поверхностные дефекты в виде рисок глубиной до 0,08 мм, повышенная температура отпуска после дробеметной обработки и неточности при настройке испытательного стенда. Разработана новая методика ускоренных усталостных испытаний проволоки и качества технологии путем изготовления специальных высоких пружин для испытаний с повышенными напряжениями. Предложены новые способы контроля настройки вибростенда, повышающие точность в несколько раз. По результатам испытаний, обработанных методами математической статистики, определено, что массовые поломки пружин, изготовленных без технологических нарушений начнутся при работе в двигателе через 216 лет непрерывной эксплуатации.

5. Изучено влияние некоторых геометрических, силовых и теплофизических параметров технологии изготовления, упрочнения и контроля на качество клапанных пружин. В частности установлено:

— с ухудшением качества проволоки в первую очередь теряют необходимый уровень выносливости те пружины, технологические параметры упрочнения которых неоптимальны; корректировка упрочнения пружины 2108-1007020 позволила резко снизить случаи их разрушения на стенде и при эксплуатации;

— контроль качества дробеметного наклепа пружин с помощью контрольной пластинки Альмена необъективен так как прогиб пластинки показывает только возможности струи дроби создать необходимый наклеп;

— зависимость между объемом загрузки пружин в дробеметную камеру и временем обработки до насыщения непропорциональна и нелинейна;

-рассеивание твердости контрольной пластинки при дробеметном упрочнении практически не влияет на результаты контроля режима;

— в процессе отпуска после навивки увеличивается нагрузка начала пластических деформаций на ~24%; примерно половина этого эффекта - за счет температурного старения и остальные за счет релаксации остаточных напряжений от изгиба;

— метод замера температуры с помощью эффекта цветов побежалости сравнительно точен и не требует сложного оборудования и приборов. С использованием этого метода определено минимальное необходимое время прогрева пружин в печах термоосадки (5...6 минут), что позволило увеличить производительность при термоосадке на 35%;

— с повышением температуры осадки от 200 до 400°C величина остаточной деформации увеличивается примерно вдвое; в интервалах температур цветов побежалости (265...350°C) почти отсутствует деформация, связанная со временем выдержки под нагрузкой, т.е. отсутствуют релаксационные процессы, что подтверждает зону температур повышенной хрупкости и недопустимость деформирования пружин в этом интервале температур.

6. На основании результатов упруго-пластических расчетов и с учетом экспериментальных исследований разработан новый, более эффективный технологический процесс для всех клапанных пружин, основанный на изменении последовательности упрочняющих операций. Результаты исследований и опыта работы по новому техпроцессу в течении года показали:

— уровень остаточных напряжений и выносливость пружин не уменьшились;

— повысилась релаксационная стойкость, остаточная деформация при испытаниях на Крип уменьшилась с 6...7,5% до 3...5%;

— повысилась точность изготовления и снизился технологический отсев при контроле нагрузки;

-снизились энергозатраты и трудоемкость, аннулированы четыре технологические операции, появилась возможность аннулировать сортировку по нагрузке как отдельную операцию с ручной загрузкой;

— открылась перспектива создания поточной линии.

Единственным недостатком нового техпроцесса является возможность перегрева пружин после дробеметного наклепа в печах термоосадки. Для устранения этого недостатка предложено модернизировать печи с уменьшением мощности и времени нагрева.



7. Годовой экономический эффект от внедрения нового технологического процесса в Белебеевском ОАО "Автономаль" составил 2732000 рублей.
8. Решена актуальная научно-техническая задача: "Повышение надежности и качества пружин клапана путем исследования и совершенствования технологического процесса изготовления, упрочнения и испытаний, с учетом массового характера производства".
9. В работе использованы в основном механико-математические методы исследований. В частности для расчета остаточных напряжений при пластическом деформировании использованы метод малых упруго-пластических деформаций. Экспериментальная работа включала в себя и рентгеновский метод и метод травления образцов и проведения технического эксперимента с целевым заданием (факторный эксперимент). Для обработки результатов экспериментов использованы методы математической статистики с расчетами на ПЭВМ.
10. В основном все результаты исследований получены впервые. Их достоверность подтверждена лабораторными и промышленными экспериментами, сравнением данных, полученных автором, с результатами работ других исследователей, опытом использования нового техпроцесса в течение года. Экспериментальная работа по измерению силовых, геометрических, теплофизических и функциональных параметров проводилась в цехах и лабораториях ОАО "Автономаль" и АвтоВАЗа с использованием 35 единиц оборудования и приборов, изготовлением и испытанием более 40 опытных и опытно-промышленных партий пружин. Используемые цеховые и лабораторные измерительные средства были охвачены метрологическим контролем и обслуживанием и обеспечили необходимую точность.
11. Материалы диссертации опубликованы в 8 работах, в том числе в одной монографии, и докладывались на трех конференциях и выставках (г.Белорецк, 2000 г., г.Белебей 2001 г., г.Челябинск, 2003 г.), а также на заседаниях технических советов и КБ заводов и кафедр в г.г.Санкт-Петербург (ЦНИИМ), Тольятти (АвтоВАЗ), Челябинск (ЮУрГУ, ЧТЗ), Ижевск (ИГТУ), Магнитогорск (МГТУ), Коломна (ВНИИЖТ), Нижний Новгород (ЭТНА) и др...

#### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

1. Лавриненко Ю.А., Белков Е.Г., Фадеев В.В. Упрочнение пружин. – Уфа: Издательский дом «Бизнес-партнер», 2002. – 124 с.
2. Фадеев В.В. Повышение эффективности технологий высокоресурсных клапанных пружин для двигателей ВАЗа // Повышение качества пружин торсионов и рессор: Сб. науч. тр. II Всероссийской науч.-техн. конференции с международным участием. — Белорецк: 2001. – С. 90–96.
3. 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 Белков Е.Г. – Челябинск: ЮУрГУ. – 92 с.

4. Закиров Д.М., Лавриненко Ю.А., Фадеев В.В., Шеркунов Г.В., Соломатов М.Г. Разработка новых технологий производства клапанных пружин в том числе с применением новых материалов // Отчет по НИР, Г.Р. № 01.2001.08425. Рук. темы Белков Е.Г. – Челябинск: ЮУрГУ. – 46 с.

5. Лавриненко Ю.А., Фадеев В.В., Белков Е.Г. Время прогрева и производительность печей для термоосадки пружин // Прогрессивные технологии в машиностроении: Сб. научн. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. — С.133–136.

6. Патент RU 2210486 С2 7 В 24 С 7/00. Устройство для крепления пластинки при контроле интенсивности дробеметного наклепа при обработке пружин / Закиров Д.М., Лавриненко Ю.А., Белков Е.Г., Фадеев В.В., Хайрулин А.А.; 2001107951/02; Заявл. 26.03.2001; Оpubл. 20.08.2003, Бюл.№ 23.

7. Патент RU 2208056 С2 7 С21D9/02. Способ изготовления высоконагруженных пружин сжатия/ Лавриненко Ю.А., Белков Е.Г., Фадеев В.В., Хайруллин А.А. 2001103765/02; Заявл. 08.02.2001; Оpubл. 10.07.2003. Бюл. № 19.

8. Белков Е.Г., Лавриненко Ю.А., Фадеев В.В., 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.

Издательство Южно-Уральского государственного  
университета

---

ИД № 00200 от 28.09.99. Подписано в печать 17.11.2003. Формат 60x84 1/16.  
Печать офсетная. Усл.печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1. Тираж 90 экз. Заказ 439 / 470.

---

УОП Издательства. 454080, г.Челябинск, пр. им.В.И.Ленина, 76.