

**Государственный научный центр Российской Федерации
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Центральный научно-исследовательский автомобильный и
автомоторный институт»**

На правах рукописи

Лавриненко Юрий Андреевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРУЖИН СЖАТИЯ**

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Диссертация на соискание ученой степени доктора
технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Е.Г. Белков

Орел 2018

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $P_1; P_2; P_s$ - первая и вторая рабочие нагрузки, нагрузка, соответствующая началу пластических деформаций;
- P_3 - нагрузка, соответствующая максимальному сжатию витков пружины, или с недоосадкой на величину ΔH ;
- $\bar{P} = \frac{P_2}{P_1}$ - конструктивная относительная жесткость;
- P^* - условная предельная нагрузка, соответствующая максимальной несущей способности пружины;
- $\bar{P}^* = \frac{P^*}{P_s}; K_1 = \frac{\tau_s}{\sigma_b}$ - относительные коэффициенты, характеризующие диаграмму упрочнения;
- $P^*_{\text{ном}}$ - то же, что и P^* , но без учета кривизны витка;
- $H_0; H_1; H_2; H_3$ - высота (длина) пружины в свободном состоянии, при первой, второй, нагрузках и при сжатии до нагрузки P_3 .
Размеры пружин сжатия - со шлифованными и поджатыми торцами;
- D - наружный диаметр пружины;
- d - диаметр проволоки;
- t - шаг пружины сжатия в свободном состоянии; время;
- n, n_1 - число рабочих и полных витков;
- $c = \frac{D-d}{d}$ - индекс пружины, характеризующий относительную кривизну витка;
- $X = \frac{1}{R} = \frac{2}{D-d}$ - кривизна срединного волокна витка;
- $h = H_2 - H_1$ - рабочий ход пружины; прогиб контрольной пластинки;

- K_c - коэффициент концентрации напряжения на внутреннем
волокне вследствие кривизны витка;
- $K_{ц}$ - коэффициент, характеризующий уровень нагружения и
количество циклов до разрушения ($\tau_3 = K_{ц}\sigma_B$)
Пружины I кл. ($N_{ц} = 5 \times 10^6$) имеют $K_{ц} = 0,3$. Пружины II кл.
($N_{ц} = 1 \times 10^5$) имеют $K_{ц} = 0,5$;
- H'_3 - высота пружины сжатия при соприкосновении витков;
- ΔH - величина недоосадки до соприкосновения витков;
изменение высоты (длины) в процессе обработки;
- Z - жесткость пружины;
- λ_s - деформация пружины, соответствующая началу
пластических деформаций сечения;
- θ - кручение;
- Δl - величина остаточной деформации пружины;
- Φ - функция пластичности, характеризующая отношение
 $\Phi = \Delta l / \lambda_s$;
- $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_s} = \bar{\theta}$ - относительная глубина пластической деформации
($\bar{\lambda} = 1,1 \dots 2,0$) Наиболее рациональное значение ($\bar{\lambda} = 1,6$);
- $\tau_1; \tau_2; \tau_3; (\tau_{ycl})$ - напряжение с учетом концентрации напряжений на
внутреннем волокне, соответствующие нагрузкам $P_1; P_2; P_3$,
т.е. условные напряжения, не учитывающие остаточные
напряжения от упрочнения;
- τ_{-1}, τ_0 - условные напряжения, соответствующие симметричному и
отнулевому циклам нагружения;

- τ_0, σ_0 - остаточные напряжения после упрочнения осадкой, дробебетным наклепом или после навивки;
- $r = \frac{r_1}{r_2}$ - коэффициент асимметрии цикла;
- $N, N_{\text{ц}}$ - число циклов;
- σ_H, δ_H - условные напряжения и глубина наклепа при дробебетной обработке;
- n_r - коэффициент запаса по уровню циклических напряжений;
- A - двойная амплитуда (размах колебаний) при циклическом нагружении;
параметр глубины осадки;
- m_1, m_2 - количество следов дробинки на наружном и внутреннем волокне витка;
- $\overline{M}_И^{\text{ПСКИ}} = \frac{M_И^{\text{ПСКИ}}}{M_И^*}$ - относительный изгибающий момент при совместном действии перерезывающей силы, сжатия, кручения и изгиба;
- $M_И^*$ - предельный изгибающий момент;
- $\overline{M}_К^{\text{ПСКИ}} = \frac{M_К^{\text{ПСКИ}}}{M_К^*}$ - относительный крутящий момент при совместном действии перерезывающей силы, сжатия, кручения и изгиба;
- $\overline{N}^{\text{ПСКИ}} = \frac{N}{N^*}$ - относительная осевая сила при совместном действии перерезывающей силы, сжатия, кручения и изгиба;
- N^* - предельная осевая сила;
- $\overline{Q}^{\text{ПСКИ}} = \frac{Q^{\text{ПСКИ}}}{Q^*}$ - относительная перерезывающая сила при совместном действии перерезывающей силы, сжатия, кручения и изгиба;

- Q^* - предельная перерезывающая сила;
- $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_S}; \bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_S}$ - относительные нормальные и касательные напряжения;
- σ_S, τ_S - предел текучести;
- σ_B, τ_B - предел прочности на разрыв, условный предел прочности при сдвиге (кручении);
- E, G - модуль упругости первого и второго рода;
- $\bar{E}' = \frac{E'}{E}; \bar{G}' = \frac{G'}{G}$ - относительные модули пластичности (секущие модули);
- ε_S, γ_S - максимальные упругие деформации, соответствующие пределам текучести;
- $\bar{\varepsilon}_0 = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_S}$ - относительные деформации от осевой силы;
- $\bar{\varepsilon}_i^{\max} = \frac{\varepsilon_i^{\max}}{\varepsilon_S}$ - максимальная деформация от изгиба (деформация наружного волокна);
- $\bar{\gamma}_K^{\max} = \frac{\gamma_K^{\max}}{\gamma_S}$ - относительная деформация сдвига от действия крутящего момента;
- $\bar{\gamma}_Q^{\max} = \frac{\gamma_Q^{\max}}{\gamma_S}$ - относительная деформация сдвига от действия перерезывающей силы;
- $\bar{\rho} = \frac{\rho}{r}$ - относительный радиус сечения;
- $r = \frac{d}{2}$ - радиус сечения;

- $\alpha = \frac{\overline{\varepsilon_0}}{\varepsilon_{и\text{-max}}}$ - параметр нагружения, характеризующий влияние осевой силы;
- $\beta = \frac{\gamma_{к\text{-max}}}{\varepsilon_{и\text{-max}}}$ - параметр нагружения, характеризующий влияние крутящего момента;
- $\delta = \frac{\gamma_{Q\text{-max}}}{\varepsilon_{и\text{-max}}}$ - параметр нагружения, характеризующий влияние перерезывающей силы;
- $\delta = \frac{P_3 - P_2}{P_3}$ - относительный инерционный зазор, характеризующий величину приближения H_2 к H_3 или относительную величину зазора между витками при нагрузке P_2 .
- Δ - глубина наклепа; стрела прогиба контрольной пластинки;
- Δ - рассеивание величины какого-либо параметра;
- $Q_{ш}$ - составляющая усилия шагообразования, перпендикулярная плоскости навивки;
- $Q_{л} = Q_{ш}$ - усилие шагообразования от механизма с шаговой лапкой;
- $Q_{к} = Q_{ш}$ - усилие шагообразования от механизма с шаговым клином;
- f - коэффициент трения;
- φ^* - угол, при котором образуется пластический шарнир;
- $\alpha, \alpha_{п}$ - угол контакта с шагообразующим инструментом; угол подъема витка пружины;
- b - теоретическая длина канавки штифтов;
- $\vec{M}_{21}, \vec{M}_{22}$ - вектора изгибающих моментов перпендикулярно плоскости навивки в точках установки опорных штифтов;

- $\vec{M}_{K\alpha}$ - вектор крутящего момента в точке второго штифта со стороны участка α ;
- Q_{21}, Q_{22} - проекции реакций в опорных штифтах, перпендикулярные плоскости навивки;
- Q_2 - перерезывающая сила на формообразующем участке φ , перпендикулярная плоскости навивки;
- $P; P_n; P_\tau$ - реакция со стороны второго штифта и ее проекции.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	12
Глава 1. ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРУЖИН СЖАТИЯ	24
1.1. Требования и характеристики пружинной проволоки для высоконагруженных пружин сжатия.....	24
1.2. Технологические способы обеспечения качества и сопротивления усталости высоконагруженных пружин сжатия.....	30
1.3. Обзор теоретических и экспериментальных исследований напряженно- деформированного состояния при формообразовании и упрочнении пружин сжатия.....	32
1.4. Особенности конструкций и технологий изготовления высоконагруженных пружин сжатия.....	36
1.5. Выводы.....	38
Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВИТКОВ ПРУЖИНЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО НАГРУЖЕНИЯ	42
2.1. Общее представление задачи.....	42
2.2. Расчет величин нормальных и касательных напряжений в сечении витка при навивке.....	49
2.3. Анализ смещения границы упругой и пластической областей сечения.....	54
2.4. Определение сил и моментов на основании общего решения.....	60
2.5. Определение сил и моментов при разных сочетаниях трехфакторного нагружения.....	65

2.4. Выводы	70
Глава 3. ИЗУЧЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРУЖИН СЖАТИЯ ПРИ ИХ ФОРМООБРАЗОВАНИИ.....	72
3.1. Общие сведения.....	72
3.2. Причины образования поверхностных дефектов пружин сжатия.....	72
3.3. Отклонения геометрических размеров и силовых параметров пружин сжатия при изготовлении.....	83
3.4. Выводы.....	86
Глава 4. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПЕРАЦИЙ УПРОЧНЕНИЯ ПРУЖИН С ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ.....	88
4.1. Общие сведения.....	88
4.2. Построение диаграммы деформирования по испытаниям пружины на сжатие в пластической области.....	89
4.3. Напряжения при холодной осадке пружины в пластической области.....	90
4.4. Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) в сечении витка при горячей осадке пружины.....	94
4.4.1. Расчетные соотношения при деформации витка пружины малого индекса.....	95
4.4.2. Определение поля остаточных касательных напряжений.....	97
4.5. Расчет кинетики деформирования при дробеметной обработке.....	99
4.5.1. Определение внедренной пластической деформации по контрольной пластинке.....	101
4.5.2. Матричная модель контрольной пластинки. Расчет поля пластической деформации.....	102
4.5.3. Расчет нормальных напряжений элемента пружины.....	107

4.5.4. Определение поля напряжений на поверхности пружины при дробеметной обработке.....	110
4.6. Расчет кинетики деформирования при холодной трехкратной осадке.....	117
4.7. Выводы.....	121
Глава 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРУЖИН СЖАТИЯ.....	123
5.1. Методика проектирования.....	123
5.2. Разработка технологического процесса изготовления высоконагруженных пружин сжатия двигателей ВАЗ	143
5.3. Выводы.....	157
Глава 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРУЖИН СЖАТИЯ.....	159
6.1. Метод травления пружин и контрольной пластинки.....	159
6.2. Определение напряжений на поверхности пружин, образующихся при дробеметном наклепе.....	164
6.3. Выводы.....	166
Глава 7. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРУЖИН СЖАТИЯ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ. ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ ВЕЛERA В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ $\tau_0 - N_{ц}$...	167
7.1. Испытания опытных и опытно-промышленных партий пружин на циклическую долговечность.....	167
7.2. Представление кривой Велера пружин в системе координат $\tau_0 - N_{ц}$	173
7.3. Расчет регрессионной прямой.....	176
7.4. Испытания высоконагруженных пружин сжатия с увеличенной высотой и шагом на циклическую долговечность.....	176
7.5. Влияние качества поверхности на сопротивление усталости	

пружин.....	179
7.6. Выводы.....	179
Глава 8. ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРУЖИН СЖАТИЯ ОТ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ.....	181
8.1. Влияние величины производственной партии на глубину и распределение наклепа при дробеметной обработке.....	181
8.2. Продолжительность нагрева пружин при горячей осадке.....	183
8.3. Изменение механических свойств проволоки при отпуске после навивки.....	184
8.4. Изменение предела прочности проволоки при нагреве в области температур отпуска пружин.....	186
8.5. Влияние завышенной температуры отпуска после дробеметной обработки на сопротивление усталости.....	188
8.6. Зависимость остаточной осадки от степени нагрева и продолжительности выстоя при горячей осадке пружин.....	189
8.7. Выводы.....	191
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	192
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	196
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	218

ВВЕДЕНИЕ

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, криву, 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 упруго-пластических 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 безопрочной навивки и упрочнения высоконагруженных пружин сжатия.

Предмет исследования. Формообразование и напряженно-деформированное состояние в зоне деформации высоконагруженных пружин при выполнении безопрочной 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 безопрочной 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.

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.

Во второй главе проведено теоретическое исследование и расчет напряжений и деформаций при навивке пружин под воздействием: крутящего момента M_k , изгибающего момента M_n , 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.

В третьей главе приведен анализ и предложения по совершенствованию процесса безошибочной навивки пружин сжатия, а также исследованию причин, снижающих качественные характеристики 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.

В четвертой главе проведена разработка математической модели процесса упрочнения при изготовлении пружин сжатия, включающей термоосадку (горячую осадку), дробеметную обработку и трехкратную холодную осадку. В результате определено поле распределения пластических деформаций от дробеметного наклепа контрольной пластинки в сечении витка после горячей осадки, определено поле распределения остаточных касательных напряжений от дробеметной обработки. Установлено, что при последующей холодной осадке необходимо также учитывать наличие остаточных нормальных напряжений от дробеметной обработки. Отмечено, что уменьшенные после дробеметной обработки остаточные касательные напряжения снова восстанавливаются 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 ~~нөеле~~ 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.

В шестой главе проведена экспериментальная проверка 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, 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.

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.

Результаты испытаний приведены к отнулевому циклу и построена усталостная кривая. Для обработки результатов испытаний применены методы математической статистики.

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 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. 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.

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.

Глава 1. ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРУЖИН СЖАТИЯ

1.1. Требования и характеристики пружинной проволоки для высоконагруженных пружин сжатия

Для изготовления высоконагруженных пружин сжатия применяют пружинную проволоку, прошедшую, до навивки пружин, обработку с целью повышения её прочности [1, 2]. Для упрочнения пружинной проволоки применяют, как правило, закалку и отпуск, а также деформационное упрочнение при волочении. После навивки пружины проходят операцию термической обработки – отпуск, в результате чего увеличивается нагрузка начала пластических деформаций пружин при их осадке.

В процессе навивки пружин многие характеристики проволоки остаются почти без изменений, например, показатели механических свойств: твердость, предел прочности, предел текучести, относительное сужение, предельная деформация до разрушения, величина поверхностных дефектов, микроструктура.

Разброс величин механических свойств проволоки, даже в пределах установленных допусков, приводит к отклонениям геометрических размеров пружины по диаметру и высоте и нестабильности силовых параметров и разбросу характеристик пружин даже в одной партии. Стабильность величины предела прочности по длине мотка позволяет изготовить пружины в пределах заданных допусков по геометрическим размерам пружины.

Пружины, изготовленные проволоки 50ХФА, 70ХГФА имеют наибольшую устойчивость к релаксации нагрузки (крипу) при температурном заневоливании.

На выносливость пружин влияют рабочие напряжения, коэффициент асимметрии цикла, количество и глубина поверхностных дефектов,

неоднородность микроструктуры, дисперсность металлических включений на проволоке.

Технические условия на проволоку для пружин сжатия двигателя приведены в ГОСТ 1071-81, ТУ 14-4-1380-91, EN 10270-2:2012, стандартах фирм «Garphyttan», Швеция; «Roslau», Германия; «Kiswire», Южная Корея и др. Химический состав некоторых пружинных сталей показан в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав некоторых пружинных сталей

Марка стали	Химический состав, %									
	C	Mn	Si	Cr	V	S	P	Ni	Al	Cu
	не более									
65ГА ГОСТ 1071-81	0,65- 0,70	0,70- 1,00	0,15- 0,30	≤ 0,15	-	0,025	0,025	0,20	0,0 8	0,20
68ГА ГОСТ 1071-81	0,65- 0,70	0,70- 1,00	0,15- 0,25	≤ 0,12	-	0,025	0,025	0,20	0,0 5	0,15
68А ГОСТ 1071-81	0,65- 0,70	0,40- 0,55	0,15- 0,25	≤ 0,12	-	0,025	0,025	0,20	0,05	0,15
50ХФА ГОСТ 14959-79	0,46- 0,54	0,50- 0,80	0,17- 0,37	0,80- 1,10	0,10- 0,20	0,025	0,025	-		
51ХФА ГОСТ 14959-79	0,47- 0,55	0,30- 0,60	0,15- 0,30	0,75- 1,10	0,15- 0,25	0,025	0,025	-	-	-
70ХГФА ГОСТ 1071-81	0,65- 0,72	0,50- 0,80	0,15- 0,30	0,30- 0,50	0,10- 0,20	0,025	0,025	0,20	0,05	0,15
70ХГФА-Ш ТУ 14-4-1380-91	0,65- 0,72	0,50- 0,80	0,15- 0,30	0,30- 0,50	0,10- 0,20	0,015	0,015	0,15	-	0,10
60С2ХА ГОСТ 14959	0,56- 0,64	0,40- 0,70	1,4-1,8	0,70- 1,00	-	0,025	0,025			
VDSiCrV EN 10270-2	0,50- 0,70	0,40- 0,90	1,20- 1,65	0,50- 1,00	0,10- 0,25	0,020	0,020	-	-	0,06
VDSiCr EN 10270-2	0,50- 0,60	0,50- 0,90	1,20- 1,60	0,50- 0,80	-	0,020	0,025	-	-	0,06
Oteva 60 Стандарт “Garphyttan”	0,60- 0,70	0,50- 0,90	0,15- 0,30	0,40- 0,60	≥0,15	0,020	0,025	-	-	-
Oteva 70 Стандарт “Garphyttan”	0,50- 0,60	0,50- 0,80	1,20- 1,60	0,50- 0,80	-	0,020	0,025	-	-	-
R12 Стандарт “Roslau”	0,62- 0,72	0,50- 0,90	0,15- 0,30	0,40- 0,60	0,15- 0,25	0,020	0,025	-	-	-
R15 Стандарт “Roslau”	0,50- 0,60	0,50- 0,80	1,20- 1,60	0,50- 0,80	-	0,020	0,025	-	-	-
KIVO-CSVDSiCr Стандарт “KISWIRE”	0,51- 0,59	0,50- 0,90	1,20- 1,60	0,55- 0,90		0,025	0,025			0,02

Механические и технологические свойства сталей для пружин сжатия двигателя приведены в таблицах 2–6. Согласно стандарта фирмы «Garphyttan» разброс временного сопротивления в пределах одного мотка должен составлять не более 50 Н/мм².

Таблица 2

Механические и технологические свойства проволоки по ГОСТ
1071-81 для пружин сжатия двигателя

Ном. диаметр проволо ки, мм	Пред. отклоне ния, мм	Временное сопротивление, Н/мм ²		Число перегибов на 180°			Число скручиваний на 360°	
		марки А	марки Б	Диаметр оправки, мм.	марки А	марки Б	марки А	марки Б
1,20	+0,02	1860-2010	1810—2110	7,50	3	2	10	8
1,40	-0,01	1860-2010	1810—2110	7,50	2	1	10	8
1,60	±0,02	1810-1960	1810—2060	10,0	5	4	10	8
1,80		1770-1910	1720—2010	10,0	5	4	10	8
2,00		1770-1910	1720—2010	10,0	4	3	10	8
2,30		1770-1910	1720-2010	15,0	5	4	10	8
2,50		1720-1860	1670-1960	15,0	4	3	10	8
2,75		1720-1860	1670-1960	15,0	4	3	10	8
3,00		1720-1860	1670-1960	15,0	2	1	10	8
3,20		±0,02	1670-1810	1620-1910	20,0	6	5	10
3,40	1670-1810		1620-1910	20,0	6	5	10	8
3,50	1620-1770		1570-1860	20,0	5	4	10	8
3,60	1620-1770		1570-1860	20,0	5	4	10	8
3,75	1570-1720		1570-1860	20,0	5	4	10	8
4,00	1570-1720		1570-1860	20,0	4	3	10	8
4,10	1520-1670		1520-1810	30,0	6	5	10	8
4,20	1520-1670		1520-1810	30,0	5	4	10	8
4,50	1520-1670		1520-1810	30,0	4	3	10	8
4,80	1470-1620		1470-1770	30,0	2	2	10	8
5,00	1470-1620	1470-1770	30,0	2	2	10	8	
5,50	1420-1570	1420-1720	30,0	2	2	10	8	

Таблица 3

Механические и технологические свойства проволоки по ТУ 14-4-1380-91

Ном. диаметр проволоки, мм	Пред. отклон., мм	Временное сопротивл., Н/мм ²	Скручивание			
			Длина образца, мм	Сила растяжения образца, Н	Число скручиваний	
					В одном направлении	В обратном направлении
2,70	±0,02	1700-1830	260	150	7	17
2,80		1700-1830	260	150	7	17
3,00		1700-1830	260	150	7	17
3,17		1700-1830	260	150	7	17
3,43	+0,02 -0,03	1666-1770	260	200	7	13
3,50		1640-1760	260	200	7	13
3,60		1640-1760	260	200	7	13
3,80		1620-1740	260	200	7	13
4,00		1620-1740	380	250	7	13
4,20		1520-1670	380	250	7	13
4,75		1600-1720	380	250	7	10
4,80		1600-1720	380	250	7	10

Таблица 4

Механические и технологические свойства проволоки KIVO-C по стандарту
фирмы KISWIRE

Ном. диаметр проволоки, мм	Предельные отклонения, мм	Временное сопротивление, Н/мм ²	Твердость, HRC	Относительное сужение, Z _{мин.} %
1,60<d≤3,00	±0,020	1620-1770	49,0	45
3,00<d≤3,20		1570-1720	48,0	45
3,20<d≤3,50	±0,030	1570-1720	48,0	45
3,50<d≤4,00		1570-1720	48,0	40
4,00<d≤5,00		1520-1670	47,5	40
5,00<d≤5,60		1520-1670	47,5	40

Механические и технологические свойства проволоки OTEVA 70 по стандарту фирмы Garphyttan для пружин сжатия двигателя

Ном. диаметр проволоки, мм	Предельные отклонения, мм	Временное сопротивление, Н/мм ²	Твердость, HRC	Относительное сужение, Z _{мин.} %	Число скручиваний, мин
1,60<d≤2,00	±0,020	2010-2160	55	50	5
2,00<d≤2,50		1960-2060	54	50	5
2,50<d≤3,00		1910-2010	53	50	4
3,00<d≤3,20		1910-2010	53	45	4
3,20<d≤3,50	±0,025	1910-2010	53	45	4
3,50<d≤4,50		1860-1960	52,5	45	4
4,50<d≤5,00		1810-1910	51,5	45	3
5,00<d≤5,60	±0,030	1810-1910	51,5	40	3

Таблица 6

Механические и технологические свойства проволоки по EN 10270-2:2012

Ном. диаметр проволоки, мм	Предельные отклонения, мм	Временное сопротивление, Н/мм ²		Относительное сужение, Z _{мин.} %		Число скручиваний, N	
		Сталь VDSiCr	Сталь VDSiCrV	Сталь VDSiCr	Сталь VDSiCrV	Сталь VDSiCr	Сталь VDSiCrV
2,00<d≤2,50	±0,025	1960-2060	2100-2250	50	50	4	4
2,50<d≤2,70		1910-2010	2060-2210				
2,70<d≤3,00	±0,030	1910-2010	2060-2210	45	45		
3,00<d≤3,20		1910-2010	2060-2210				
3,20<d≤3,50		1910-2010	2010-2160				
3,50<d≤4,00		1860-1960	2010-2160				
4,00<d≤4,20	±0,035	1860-1960	1960-2110	45	40	3	
4,20<d≤4,50		1860-1960	1960-2110				
4,50<d≤4,70		1810-1910	1960-2110				
4,70<d≤5,00		1810-1910	1960-2110				
5,00<d≤5,60		1810-1910	1910-2060				40

Пружинная проволока, закаленная в масле с последующим отпуском поставляется в мотках, катушках или прутках. Проволока в мотках или катушках должна состоять из одного отрезка. Проволока должна быть защищена от коррозии. Допускается легкое промасливание поверхности.

Химический состав стали при анализе плавки указан в таблице 1.

Согласно ТУ 14-4-1380-91 загрязненность стали неметаллическими включениями не должна превышать: по сульфидам, силикатам - 1 балла; по оксидам - 1,5 балла. Максимальный балл неметаллических включений всех видов - не более 2х баллов.

Микроструктура должна иметь сорбит или тростсорбит отпуска. Игольчатая ориентация величиной больше 2-го балла, установленная ГОСТ 8233-56, не допускается.

Обезуглероживание поверхности не должно превышать 0,02 мм. На поверхности проволоки не должно быть Трещины, рванины, раскатанные пузыри, закаты, плены, рябизна и ржавчина не допускаются. Допускается плотно прилегающая окисная пленка, отдельные риски глубиной не более 0,02 мм. Стандарты фирм «Garphyttan» и «Roslau» допускают дефекты глубиной до 0,04 мм.

Качество поверхности проволоки диаметрами от 2,5 до 6,5 мм. контролируют циркуграфом фирмы “Foerster” с маркировкой дефектов, превышающих глубину 40 мкм. Проволоку дополнительно маркируют буквой R.

Для уменьшения глубины поверхностных дефектов и обезуглероженного слоя проволоку подвергают скальпированию и дополнительно маркируют буквой S. Допускаемая глубина дефектов и обезуглероженной зоны составляет 0,5% от диаметра - для скальпированной проволоки и 1% от диаметра - для нескальпированной проволоки.

По данным фирмы Garphyttan допускаемая максимальная величина неметаллических включений: в краевой зоне не более 15 мкм, а в средней зоне - не более 20 мкм. Максимальное число неметаллических включений в краевой зоне должно быть: величиной 5-10 мкм – не более 50 шт.; величиной 10-15 мкм – не более 7 шт.; Неметаллические включения в краевой зоне величиной более 15 мкм не допускаются.

Материал для пружин марки Oteva 70 должен иметь исполнение с высокой степенью чистоты при выплавке по неметаллическим включениям и имеет дополнительную маркировку SC (Super Clean).

Согласно ТУ 14-4-1380-91 пружинная сталь должна быть выплавлена с применением чистой шихты. Допускается, по согласованию с заказчиком, изготавливать проволоку из стали электрошлакового переплава.

Вопросы качества пружинных материалов и методы их испытаний рассматриваются также в работах [3, 4, 5,6, 7, 8, 9, 10, 11,12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24,25,26].

1.2. Технологические способы обеспечения качества и сопротивления усталости высоконагруженных пружин сжатия

Для повышения сопротивления усталости и уменьшения релаксации нагрузки при использовании высоконагруженных пружин сжатия их подвергают, как правило, технологическим операциям дробеметной обработки, горячей осадки с пластическим деформированием, осадки при комнатной температуре [1].

При пластической деформации пружины при её осадке на поверхности и в сечении пружины создается поле напряжений сжатия, обеспечивающее повышение допустимых рабочих нагрузок при её использовании и повышение сопротивления усталости (рисунок 1.1).

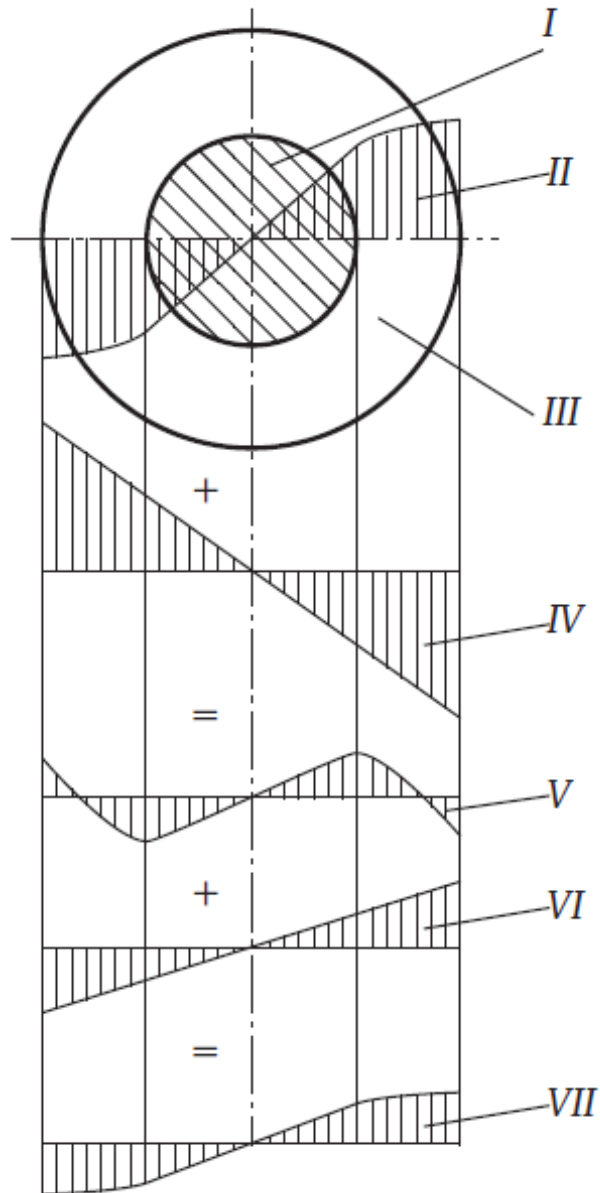


Рисунок 1.1. Напряжения в сечении витка при осадке пружины [1]:

I – область упругих деформаций; II – напряжения при осадке; III – пластическая область; IV – напряжения при снятии нагрузки, $V=II+IV$ – суммарные остаточные напряжения; VI – условные напряжения от рабочей нагрузки; VII= $V+VI$ – истинные напряжения от рабочей нагрузки

При горячей осадке (термоосадке) происходит упрочнение, аналогичное осадке при комнатной температуре, при более высокой степени

пластической деформации, и при меньших суммарных напряжениях на внутреннем радиусе.

Одним из самых распространенных способов упрочнения пружин является обработка дробью. От дробемётной обработки на поверхности пружины создаются напряжения сжатия, препятствующие раскрытию трещин и значительно повышающих сопротивление усталости [30].

Режимы обработки и твердость пружин влияют на создаваемую величину напряжений. Релаксация нагрузки пружин (крип) зависит от глубины наклепа. После проведения обработки дробью пружины не следует подвергать нагреву до высоких температур, т.к. происходит релаксация напряжений на поверхности, что ведет к разупрочнению пружины. Например, в работе [31] отмечается, что потеря нагрузки пружин клапана в течение 48 часов при температуре 130°C составляет: для пружин, обработанных дробью – 4...6,9%, а без дробеметной обработки – 1,3...2,75%.

Вопросы упрочнения пружин и расчетов при упруго-пластической деформации рассматриваются также в работах [33, 34, 35, 36, 37, 38, 103, 40, 41, 20, 43, 129, 135].

1.3. Обзор теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния при формообразовании и упрочнении пружин сжатия

Вопросам проектирования, изготовления и службы пружин посвящены работы [32, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 30, 56, 57, 58, 59, 60, 47, 61, 62, 63, 64, 65, 4, 66, 67, 68] и другие.

В работах Навроцкого Г.А. [69] и Белкова Е.Г. [70, 71, 72] отражены теоретические и технологические вопросы производства и упрочнения

пружин сжатия и растяжения, изготавливаемых в массовом производстве. В работах Малинина Н.Н., Белкова Е.Г., Заседателева С.М., Блинника С.М., Федосьева В.И., Пономарёва С.Д., Ахмерова А.Ф., отражены вопросы расчетов технологических характеристик процессов изготовления пружин.

Пономарёв С.Д. в работе [73] доказал, что для расчётов при навивке пружин можно применять показатель предела прочности вместо условного предела текучести. Это связано с тем, что модуль упрочнения для данного вида проволоки незначителен. В работах [74, 75] предложено использовать гипотезу плоских сечений при решении задач при нагружении изгибающим и крутящим моментами.

Работы [58, 29, 31] посвящены вопросам разработки высоконагруженных пружин, упрочнённых осадкой, а также методике упруго-пластических расчетов стержней при кручении.

Шалин В.Н. разработал методику упругопластических расчётов при кручении круглых стержней [58], которая имеет неточности при построении кривой σ - ε .

В работах [29, 76] обоснована методика графоаналитической разработки пружин, упрочнённых осадкой. Расчёт проводят по следующим формулам:

$$P_3 = \frac{\pi d^3}{2D} \Phi; \quad \Phi = \frac{1}{\gamma_3^3} \int_0^{\gamma_3} \tau \gamma^2 d\gamma; \quad \lambda_{\text{ОсТ}} = \lambda_3 - \frac{8P_3 D^3 i}{Gd^4};$$

где интеграл Φ вычисляют, по диаграмме деформирования τ - γ .

Такая методика не получила распространение, т.к. отсутствуют требуемые характеристики современных пружинных материалов.

В работах [31, 69, 78, 79, 80, 81, 82, 122, 128] рассмотрены вопросы проектирования технологии изготовления высоконагруженных пружин клапана. В работе [77] представлена общая схема пластической осадки и

установлены параметры схемы для разных групп материалов, с помощью которых можно сделать предварительные технологические проектные расчеты.

В работе [39] показаны результаты исследований влияния технологической схемы обработки дробью на сопротивление усталости пружин тракторных подвесок. Доказано, что дробеметная обработка повысила предел выносливости пружин на 40%.

В работе [85] сделаны теоретические исследования создания остаточных напряжений при дробеструйном обработке стальных деталей, которые имеют $\sigma_s = 1300$ МПа. Распределение остаточных напряжений представлено на рисунке 1.2.

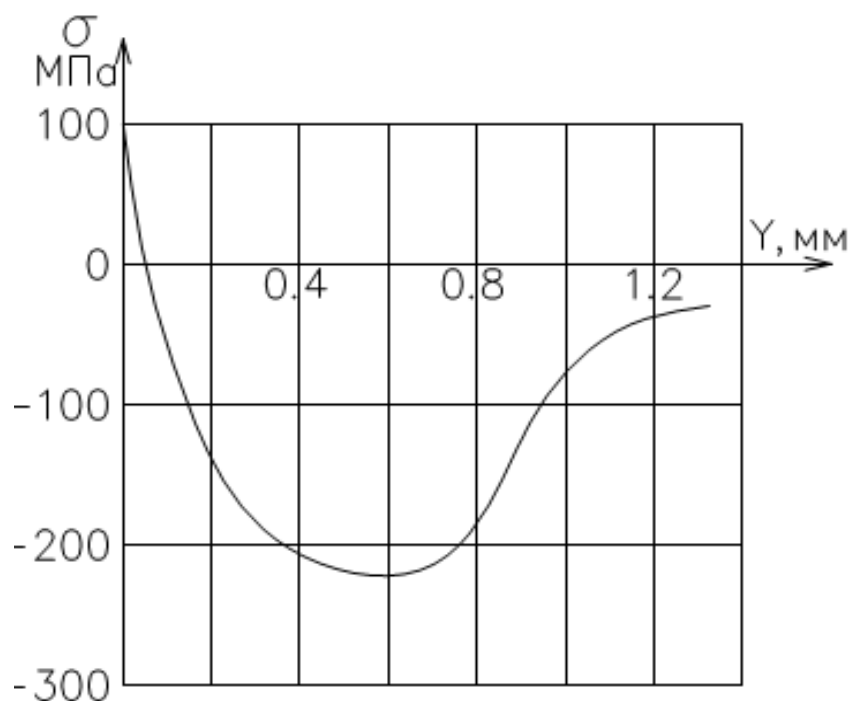


Рисунок 1.2. Остаточные напряжения сжатия от дробеметной обработке по работе [85]

Однако данные, приведенные в работе [85] не пригодны для анализа дробеметной обработки пружин клапана т. к. она проведена при других

условиях и характеристиках процесса обработки, а также твердости проволоки.

Работы [86, 87, 88, 89] посвящены способам упрочнения поверхности деформированием: дорнованием, обкатыванием, гидropескоструйным упрочнением (рисунок 1.3)

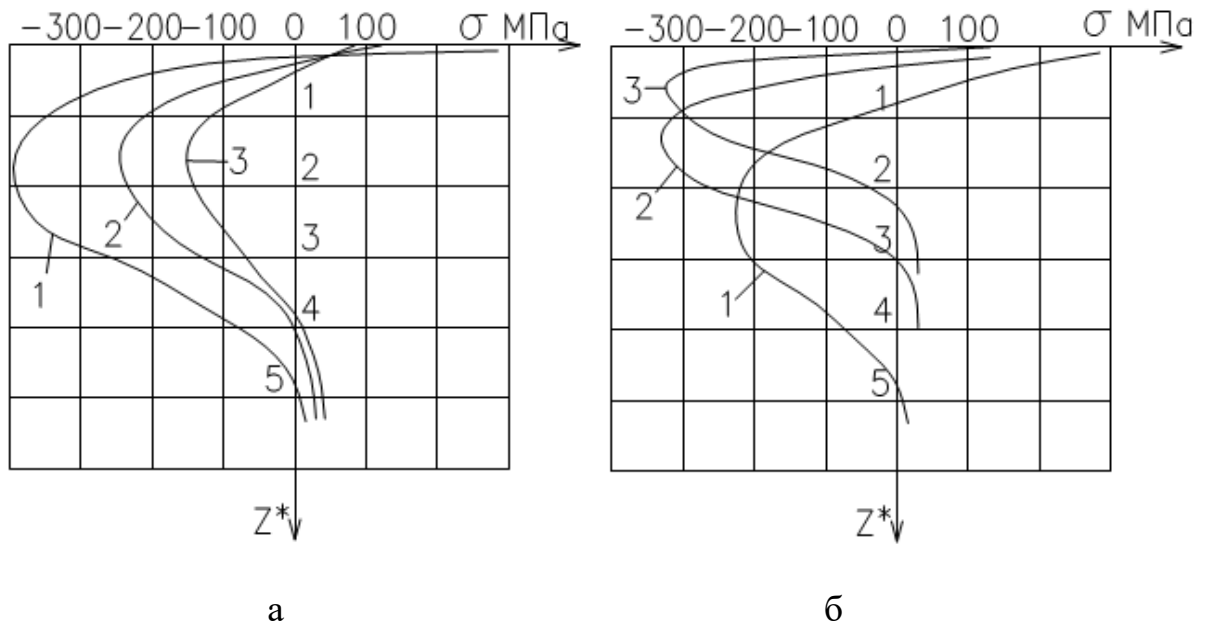


Рисунок 1.3. Зависимость остаточных напряжений от: а - скорости шариков (1 – 14 м/с; 2 - 7,5 м/с; 3 - 6,2 м/с); б - от напряжения текучести материала (1 - $\sigma_s = 560$ МПа; 2 - $\sigma_s = 1090$ МПа; 3 - $\sigma_s = 1560$ МПа) по работе [86])

В работах [90, 91] представлены теоретические и экспериментальные исследования технологических процессов производства, включая методы технологического упрочнения и испытаний высоконагруженных пружин сжатия.

В работах [157, 92, 93, 4,14, 96, 97,98, 99,100,101, 102,103,104] рассмотрены вопросы расчетов пружин в упругой области при статической нагрузке.

1.4. Особенности конструкций и технологий изготовления высоконагруженных пружин сжатия

Высоконагруженные пружины сжатия должны выдерживать циклические нагрузки и проявлять высокое сопротивление усталости, а также выдерживать испытания на «крип» при повышенных температурах.

При изготовлении высоконагруженных пружин сжатия применяют способы, позволяющие снизить истинные напряжения от рабочей нагрузки и, таким образом, повысить их прочность и долговечность.

Технологический процесс изготовления высоконагруженных пружин сжатия может включать следующие операции: приемочный контроль проволоки с контролем диаметра, предела прочности, испытаний на кручение, навивку на оправку, проверку микроструктуры. Выполняется также отдельная операция проверки наличия поверхностных дефектов с помощью прибора “Dr. Foersrer”, Германия, для последующей отбраковки пружин с этими дефектами; безоправочная навивка по схеме «сжатие-изгиб» на пружинонавивочном автомате; отпуск при нагреве до 400 °С; шлифовка торцев; 100% люминисцентный контроль; дробеметная обработка; горячая осадка; дробеметная обработка; низкотемпературный отпуск; холодная осадка и контроль нагрузки; нанесение покрытия Fosf по ТУ 5.00432; испытания на усталость, снижение нагрузки при заневоливании.

Многие вопросы, связанные с качеством пружин при их изготовлении отражены в работе [56]. Влияние высокотемпературной механической обработки (ВТМО) на обеспечение качества пружин рассматривается в работах [63, 105, 113, 116]. На рисунке 1.4 приведен пример использования ВТМО при изготовлении пружинной проволоки.

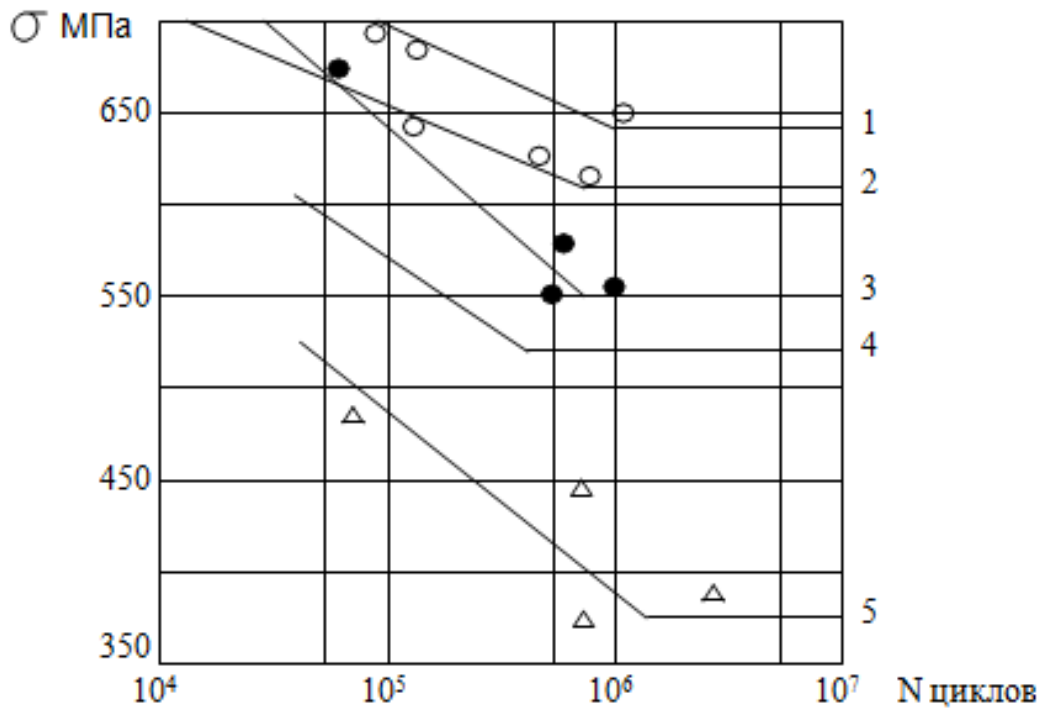


Рисунок 1.4. Зависимость сопротивления усталости проволоки из стали 50ХГР от режимов ВТМО [63]:

1- относительная степень деформации 15%, отпуск 250 °С; 2- относительная степень деформации 25%, отпуск 250 °С; 3- относительная степень деформации 50%, отпуск 400 °С; 4-без ВТМО, отпуск 520 °С; 5-без ВТМО, отпуск 250 °С

В работах [7, 110, 111, 6, 113, 114, 115, 116] приводятся результаты исследований микроструктуры сталей, полученных с помощью высокотемпературной термомеханической обработки проволоки, наиболее благоприятной для достижения высокого сопротивления усталости пружин.

В работе [117] построена диаграмма пластичности деформационно-упрочненной проволоки из стали 70. В работе [15] показано распределение напряжений волоченой проволоки. В работах [9] и [10] показана зависимость качества пружинной стали от её химсостава, характеристик термообработки

и волочения. В работе [11] предложено нормировать показатели качества пружинной проволоки: предел упругости, механические свойства проволоки при повышенных температурах, характеристики сопротивления усталости, шероховатость поверхности и др.

Вопросы разработки технологических процессов производства пружин без упрочнения рассматриваются также в работах [123, 124, 125, 126, 127, 97, 40, 21, 155, 118].

Вопросы испытания пружин, динамической прочности, устойчивости рассматриваются в работах [47, 121, 132, 133, 161, 150, 136, 137, 138, 139, 141, 112, 139, 25, 108, 145, 146, 157, 112].

Вопросы точности пружин и качества рассматриваются также в работах [9, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 26, 39, 84, 53, 31, 79, 129, 134].

Следует отметить, что в области пружинного производства нет работ по качеству, выполненных с учетом массовой технологии, в том числе, с позиций квалиметрии [160].

1.5. Выводы

Анализ уровня применяемых технологических процессов производства высоконагруженных пружин сжатия позволяет сделать выводы:

1. Только в некоторых работах освещаются вопросы технологии массового производства высоконагруженных пружин сжатия.

2. Известные работы отражают исследования технологии повышения качества пружин, сопротивления их усталости, но непригодны для условий крупносерийного и массового производства высоконагруженных пружин сжатия.

3. В этих работах показаны данные по исследованиям только одного вида упрочнения. Однако, несколько способов упрочняющей обработки с

пластическим деформированием, выполняемых последовательно, влияют друг на друга, создают напряженно-деформированное состояние (НДС), отличающееся от НДС при каждом виде упрочнения отдельно.

4. По отдельным видам упрочняющих операций нет достаточно удобных, точных решений, отвечающих специфике изготовления клапанных пружин. Например, отсутствует решение задачи и не описаны особенности пластической осадки пружин при повышенных температурах. Величины напряжений на поверхности витка от дробеметной обработки являются приближенными или не доведен до инженерной методики. Экспериментальные исследования по определению эффекта от дробеметного наклепа приведены для других материалов, сечений и режимов обработки. Влияние температуры на разупрочнение пружин после дробеметной обработки не изучено. Методика расчета силовых характеристик при безопрочной навивке пружин по схеме «сжатие+изгиб» касается только навивки пружин растяжения, которую нельзя применить для безопрочной навивки высоконагруженных пружин сжатия.

5. В опубликованных материалах исследований не приводятся данные по сопротивлению усталости пружин из сталей 70ХГФА-Ш, Oteva 60, Oteva 70. Отсутствуют данные о зависимости качества пружин от режимов навивки и упрочняющих операций.

6. Существующие на производстве методы контроля качества на отдельных операциях производственного процесса нуждаются в серьезной модернизации и дополнении. Однако, в известной литературе нет сведений и методик контроля. Нет методик производственного контроля НДС, температуры пружин при проведении операции горячей осадки, контроля точности геометрии пружин. Существующая технология изготовления пружин является энергозатратной с повышенной трудоемкостью. Кроме

того, оборудование по технологической цепочке часто нуждается в научно-обоснованной модернизации с целью повышения качества продукции и производительности.

7. Перечисленные проблемы не позволяют повысить качество, надежность высоконагруженных пружин сжатия.

В связи с этим сформулирована **цель работы**: повышение качества высоконагруженных пружин сжатия за счет разработки технологии их изготовления путем проведения комплексного исследования операций безопрочной навивки и упрочнения.

Задачами работы являются:

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 безопрочной 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.

Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВИТКОВ ПРУЖИН ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО НАГРУЖЕНИЯ

2.1. Общее представление задачи

При навивке пружин, проволока испытывает деформацию $\varepsilon_{и}$, $\gamma_{к}$, $\varepsilon_{о}$ и γ_{Q} от изгибающего момента $M_{и}^{пски}$, крутящего момента $M_{к}^{пски}$, осевой силы $N^{пски}$ и перерезывающей силы $Q^{пски}$ [143, 185, 191]. В более ранних работах силовые факторы были определены только для изготовления пружин с межвитковым давлением. При навивке по схеме (рисунок 2.1) может происходить образование царапин и поверхностных дефектов при трении с упорными штифтами при навивке. Продольные риски являются дефектами, влияющими на сопротивление усталости, поэтому они не допускаются.

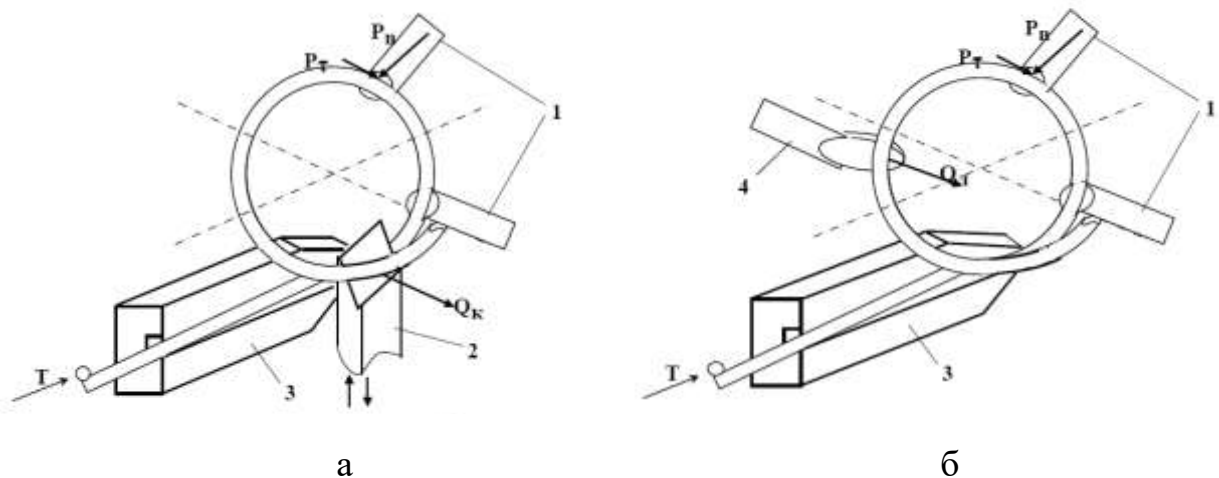


Рисунок 2.1. Схема шагообразования:

а - с шаговым клином, б - с шаговой лапкой: 1 - упорные штифты, 2 – шаговый клин, 3 – направляющая планка, 4 – шаговая лапка

Требуется решить задачу определения силовых факторов при навивке. На рисунке 2.2 показаны сочетания силовых факторов при их совместном приложении.

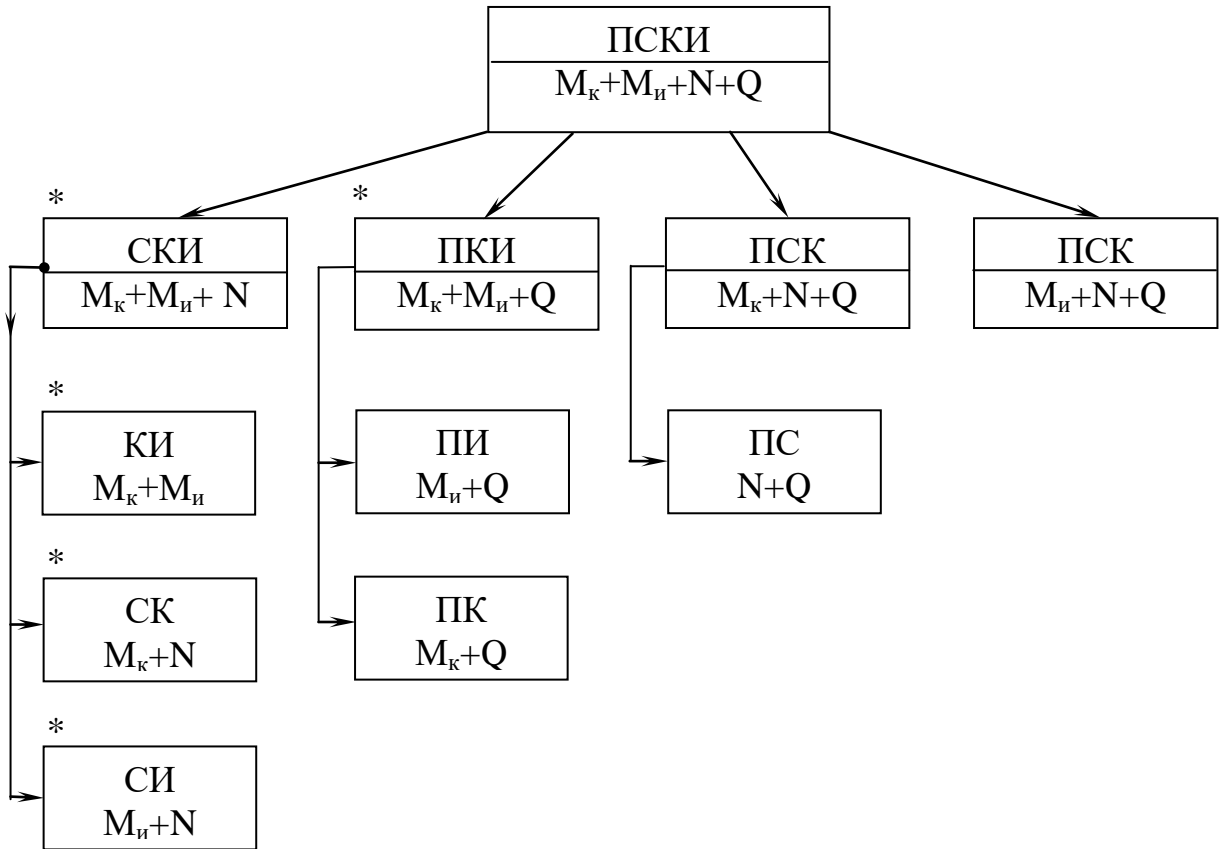


Рисунок 2.2. Варианты сочетаний действия сил и моментов при многофакторной нагрузке

Радиус срединного слоя витка пружины $R=D/2$, диаметр проволоки $d=2r$, угол подъема винтовой линии α , сила шагообразования $P_{ш}$ (рисунок 2.1):

$$\left. \begin{aligned}
 \varepsilon &= \varepsilon_0 + \varepsilon_{и}; & \varepsilon_{и} &= \frac{2y \cos^2 \alpha}{dc} = \frac{2y \cos^2 \alpha}{D}; \\
 \gamma_k &= \Theta_{\rho} = \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{c} \cdot \frac{2\rho}{d} = \frac{2\rho \sin \alpha \cos \alpha}{D}; \\
 \gamma_{\Theta} &= \frac{4Q}{3\pi r^2 G} (r^2 - y^2) = \gamma_Q^{\max} \frac{r^2 - y^2}{r^2}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

где ε_0 – деформация от действия осевой силы;

γ_k – деформация кручения;

γ_Q – деформация сдвига;

$\varepsilon_{\text{и}}$ – деформация изгиба;

$c = D/d$ – индекс пружины ($c_{\text{н}} = D_{\text{н}}/d$ – индекс при навивке под нагрузкой);

ρ ; y – координаты витка

Схема приложения внешних сил и моментов в сечении витка показана на рисунке 2.3.

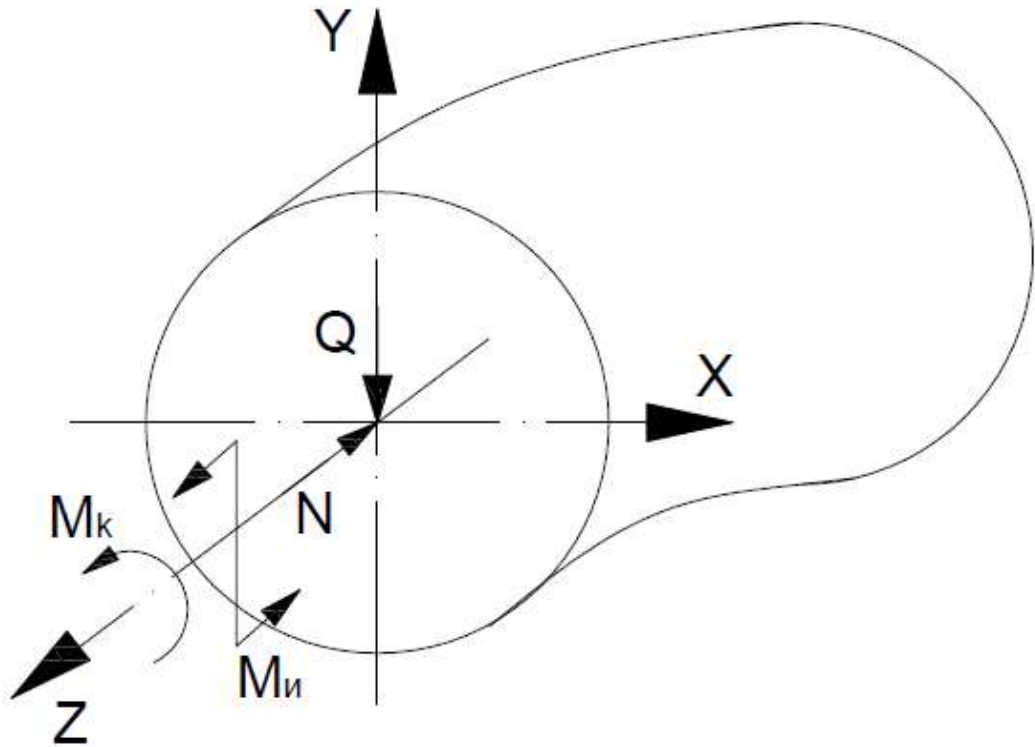


Рисунок 2.3. Схема приложения внешних сил и моментов в сечении витка

Расчет выполняют при допущении [156] простого нагружения. При этом тензор напряжений σ_{ij} принимается:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^k \cdot t_{\sigma}; \quad D_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_c \delta_{ij}; \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (2.2)$$

где σ_{ij}^k – тензор конечных напряжений;

t_{σ} – параметр, меняющийся от 0 до 1;

σ_c – среднее напряжение;

δ – символ Кронекера.

В работах [131, 147, 156] показаны отдельные решения, полученные при использовании теории малых упругопластических деформаций и теории течения [131]. В работе Качанова Л.М. [120] показаны результаты расчетов при простом нагружении. На рисунке 2.4 представлены пути нагружения при навивке пружин.

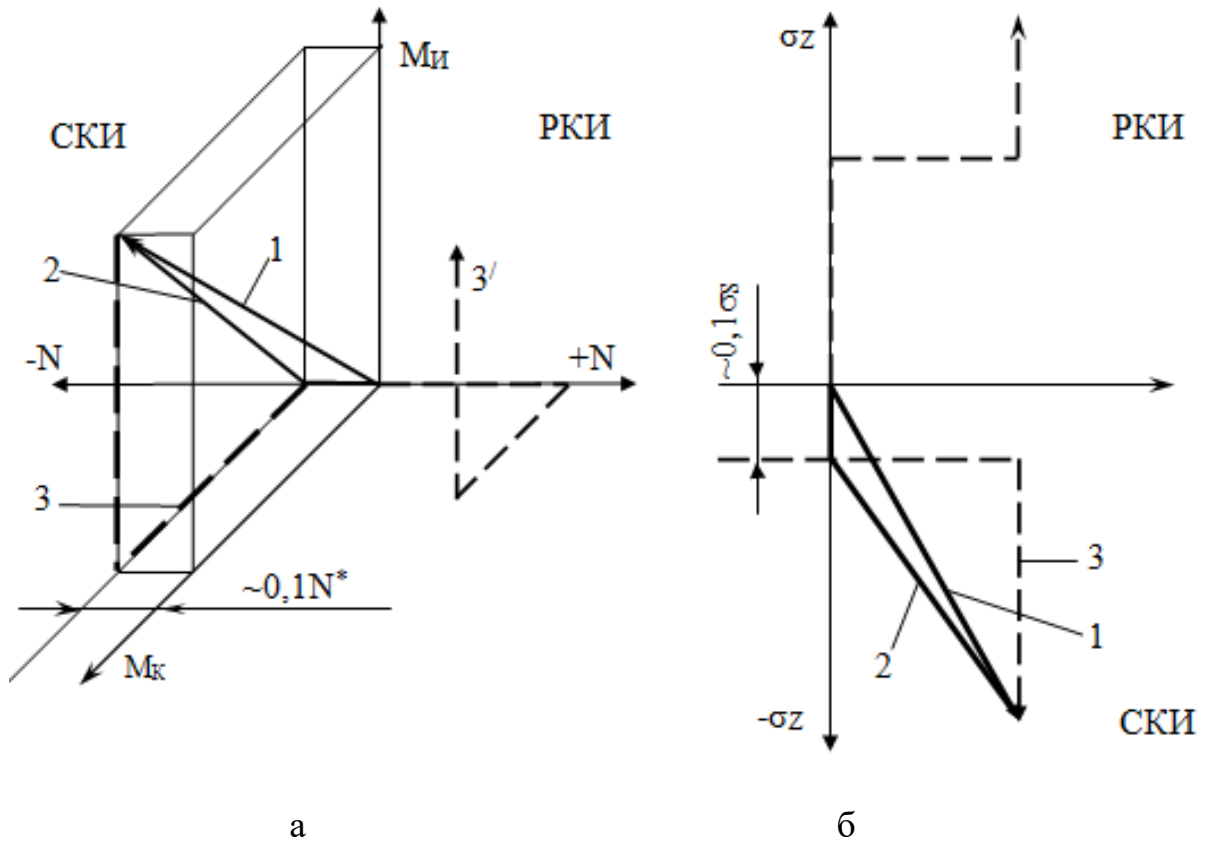


Рисунок 2.4. Пути нагружения при навивке

Для безопрямочной навивки высоконагруженных пружин сжатия были использованы основные положения теории малых упругопластических деформаций.

1. Средние напряжения $\sigma_c = \frac{1}{3}(\sigma_{ij})$ и средние деформации $\epsilon_c = \frac{1}{3}(\epsilon_{ij})$

имеют следующую зависимость:

$$\sigma_c = 3\kappa\epsilon_c; \quad \kappa = \frac{E}{3}(1 - 2\mu). \quad (2.3)$$

где: коэффициент поперечной деформации $\mu=0,5$; $\varepsilon_c=0$; т.е. объемный модуль упругости $K = \infty$.

2. $\sigma_{ii} = \Phi(\varepsilon_{ii})$. Функцию Φ определяют при испытаниях на растяжение, сжатие или кручение. Для закаленно-отпущенной проволоки $\bar{\Pi} = \frac{\Pi}{E} \approx 0,01$,

$$3. \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_c = \frac{2}{3} \frac{\sigma_{ii}}{\varepsilon_{ii}} \varepsilon_{ij} \quad (2.4)$$

Напряженное состояние в точке при комбинированной нагрузке представлено на рисунке 2.5.

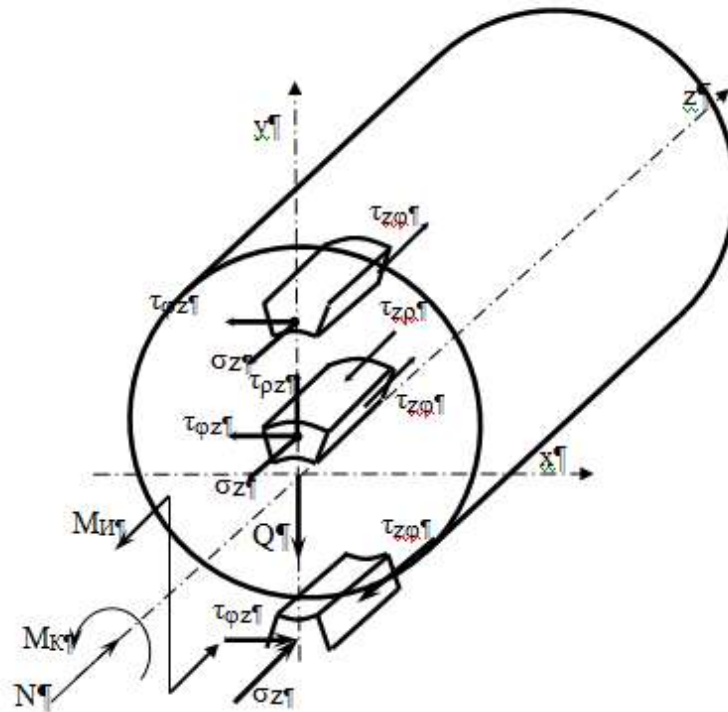


Рисунок 2.5. К расчету напряженного состояния

В характерных точках действуют напряжения σ_{z1} ; $\tau_{\phi z} = \tau_{z\phi}$; $\tau_{\rho z} = \tau_{z\rho}$.

где: $\sigma_{\rho} = \sigma_{\phi} = \tau_{\rho\phi} = \tau_{\phi\rho} = 0$.

$$\Delta = \begin{vmatrix} \sigma_{\phi} - \sigma & \tau_{\rho\phi} & \tau_{z\phi} \\ \tau_{\phi\rho} & \sigma_{\rho} - \sigma & \tau_{z\rho} \\ \tau_{\phi z} & \tau_{\rho z} & \sigma_z - \sigma \end{vmatrix} = 0 \quad (2.5)$$

Уравнение относительно σ :

$$\sigma^3 - \sigma_z \sigma^2 - \sigma(\tau_{\rho z}^2 + \tau_{\varphi z}^2) = 0, \text{ или}$$

$$\sigma[\sigma^2 - \sigma_z \sigma - (\tau_{\rho z}^2 + \tau_{\varphi z}^2)] = 0.$$

При этом $\sigma_2 = 0$, Решая это уравнение, получим:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left[\sigma_z + \sqrt{\sigma_z^2 + 4(\tau_{\rho z}^2 + \tau_{\varphi z}^2)} \right]$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{2} \left[\sigma_z - \sqrt{\sigma_z^2 + 4(\tau_{\rho z}^2 + \tau_{\varphi z}^2)} \right] \quad (2.6)$$

На рисунке 2.6 приведены круги Мора для двух характерных точек.

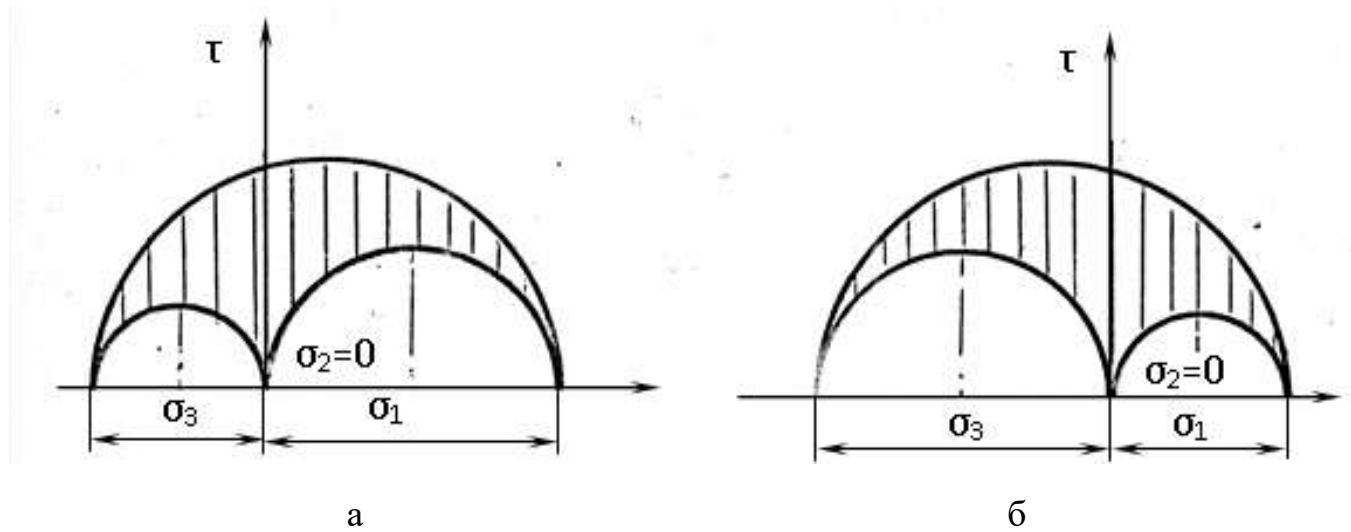


Рисунок 2.6. Круги Мора

$$\bar{\rho} = \rho / r ; \quad \bar{y} = y / r ; \quad \bar{\sigma} = \sigma / \sigma_s ; \quad \bar{\tau} = \tau / \tau_s ; \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon / \varepsilon_s ; \quad \bar{\gamma} = \gamma / \gamma_s .$$

Можно записать уравнения в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} M_{И}^{ПСКИ} &= \int_F \sigma_s dF = \sigma_s r^3 \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{\sigma} \cdot \bar{\rho}^2 \sin \varphi \cdot d\bar{\rho} \cdot d\varphi \\ M_{К}^{ПСКИ} &= \int_F \tau_{\rho} \rho dF = \tau_s r^3 \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{\tau}_{\rho} \cdot \bar{\rho}^2 d\bar{\rho} d\varphi \\ N^{ПСКИ} &= \int_F \sigma dF = \sigma_s r^3 \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{\sigma} \bar{\rho} d\bar{\rho} d\varphi \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

$$Q^{\text{ПСКИ}} = \int_F \bar{\tau}_y dF = \tau_s r^3 \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{\tau}_y \bar{\rho} d\rho d\varphi$$

Представим относительные величины в виде:

$$\bar{M}_И^{\text{ПСКИ}} = M_И^{\text{ПСКИ}} / M_И^* ; \bar{M}_К^{\text{ПСКИ}} = M_К^{\text{ПСКИ}} / M_К^* ; \bar{N}^{\text{ПСКИ}} = N^{\text{ПСКИ}} / N^* ;$$

$$\bar{Q}^{\text{ПСКИ}} = Q^{\text{ПСКИ}} / Q^* , \text{ где } M_И^*, M_К^*, N^*, Q^* - \text{ предельные силовые факторы:}$$

$$M_И^* = \frac{d^3}{6} \sigma_s ; M_К^* = \frac{\pi d^3}{12} \tau_s ; N^* = \frac{\pi d^2}{4} \sigma_s ; Q^* = \frac{\pi d^2}{4} \tau_s \quad (2.8)$$

Можно записать:

$$M_И^s = \frac{\pi d^3}{32} \sigma_s ; M_К^s = \frac{\pi d^3}{16} \tau_s ; N_s = N^* = \frac{\pi d^2}{4} \sigma_s ; Q_s = \frac{3\pi d^2}{16} \tau_s \quad (2.9)$$

Уравнения равновесия можно представить в форме:

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_И^{\text{ПСКИ}} &= \frac{3}{4} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{\sigma} \bar{\rho}^{-2} \sin \varphi d\bar{\rho} \cdot d\varphi \\ \bar{M}_К^{\text{ПСКИ}} &= \frac{3}{2\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{\tau}_\rho \bar{\rho}^{-2} d\bar{\rho} d\varphi \\ \bar{N}^{\text{ПСКИ}} &= \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{\sigma} \bar{\rho} d\bar{\rho} d\varphi \\ \bar{Q}^{\text{ПСКИ}} &= \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \bar{\tau}_y \bar{\rho} d\bar{\rho} d\varphi \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2.7')$$

2.2. Расчет величин нормальных и касательных напряжений по сечению витка при навивке

Распределение деформаций и напряжений по сечению витка пружины при навивке показаны на рисунке 2.7 и рисунке 2.8.

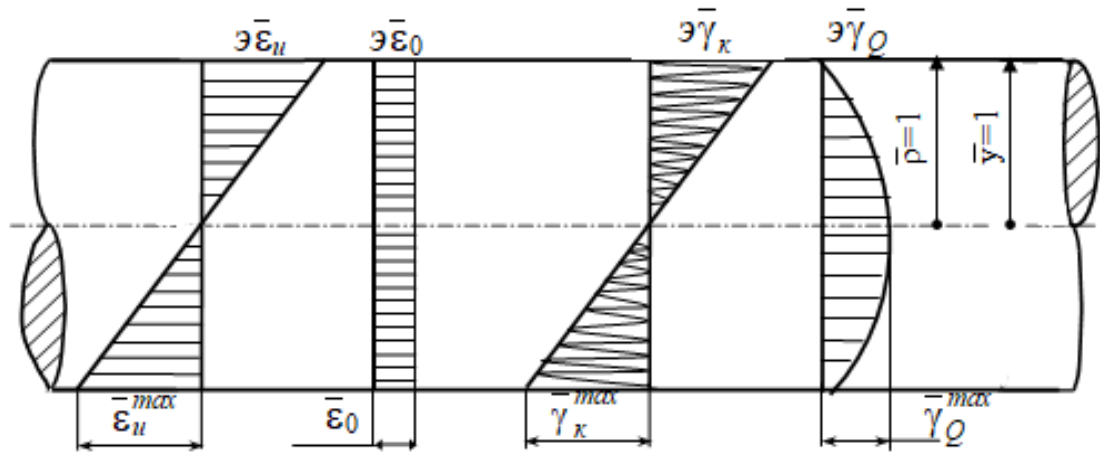


Рисунок 2.7. Деформации в упругой и пластической областях

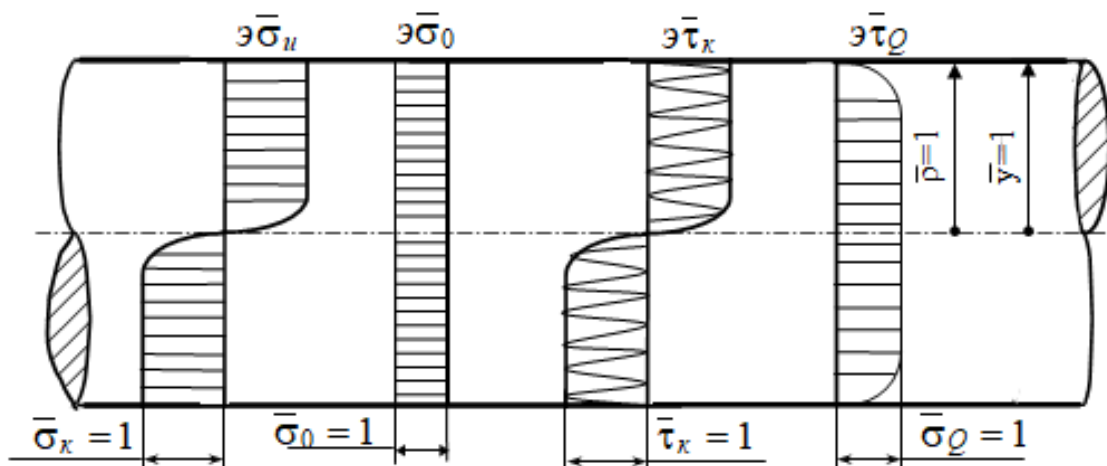


Рисунок 2.8. Напряжения в пластической области

Запишем уравнение (2.1) в виде:

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{\varepsilon}_{\Sigma} &= \bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon}_{\text{и}} = \bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon}_{\text{и}}^{\text{max}} \quad \bar{y} = \bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon}_{\text{и}}^{\text{max}} \rho \sin \varphi \\
 \bar{\varepsilon}_0 &= \bar{\varepsilon}_0 \\
 \bar{\varepsilon}_{\text{и}} &= \bar{\varepsilon}_{\text{и}}^{\text{max}} \quad \bar{y} = \bar{\varepsilon}_{\text{и}}^{\text{max}} \rho \sin \varphi \\
 \bar{\gamma}_{\text{К}} &= \bar{\gamma}_{\text{К}} \quad \bar{\rho} = \bar{\gamma}_{\text{R}} \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \\
 \bar{\gamma}_{\text{Q}} &= \bar{\gamma}_{\text{Q}} (1 - \bar{y}^2) = \bar{\gamma}_{\text{Q}} (1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)
 \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Учитывая (2.3), можно записать:

$$\sigma = E' \varepsilon, \quad \tau = G' \gamma, \quad E' = 3G' = \frac{\sigma_{\text{и}}}{\varepsilon_{\text{и}}},$$

Перепишем зависимости в относительных координатах:

$$\bar{\sigma} = \bar{E}' \bar{\varepsilon}, \quad \bar{\tau} = \bar{G}' \bar{\gamma}, \quad \bar{E}' = \bar{G}' = \frac{\bar{\sigma}_{\text{и}}}{\bar{\varepsilon}_{\text{и}}}, \quad (2.11)$$

Принимая во внимание (2.10) и (2.11) можно записать:

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\bar{\sigma}_0}{\bar{\sigma}} &= \frac{\bar{E}'}{\bar{E}'} \cdot \frac{\bar{\varepsilon}_0}{\bar{\varepsilon}_{\Sigma}} = \frac{\bar{\varepsilon}_0}{\bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon}_{\text{и}}^{\text{max}} \cdot \bar{y}} \\
 \frac{\bar{\tau}_x}{\bar{\sigma}} &= \frac{\bar{G}'}{\bar{E}'} \cdot \frac{\bar{\gamma}_x}{\bar{\varepsilon}_{\Sigma}} = \frac{\bar{\gamma}_x}{\bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon}_{\text{и}}^{\text{max}} \bar{y}} \\
 \frac{\bar{\tau}_y}{\bar{\sigma}} &= \frac{\bar{G}'}{\bar{E}'} \cdot \frac{\bar{\gamma}_y}{\bar{\varepsilon}_{\Sigma}} = \frac{\bar{\gamma}_y}{\bar{\varepsilon}_0 + \bar{\varepsilon}_{\text{и}}^{\text{max}} \bar{y}}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

где $\bar{\gamma}_x$ и $\bar{\gamma}_y$ - проекции сдвиговых деформаций на координатные оси (рисунок 2.9).

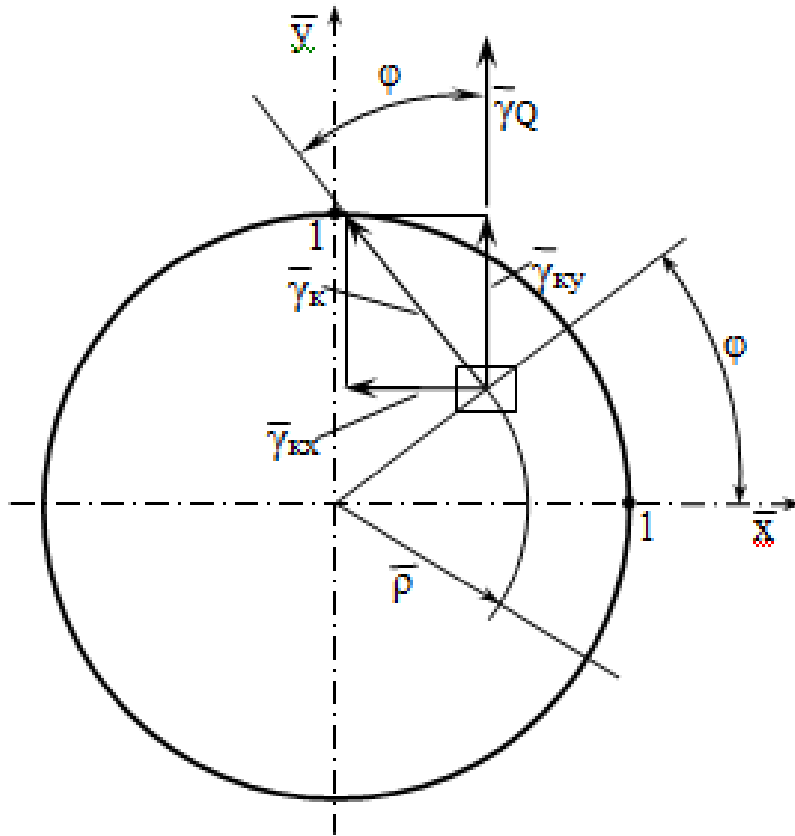


Рисунок 2.9. Схема для расчета итоговой деформации сдвига

С учетом (2.10), можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\gamma}_{ky} &= \bar{\gamma}_k \cos \varphi = \bar{\gamma}_k^{\max} \cos \varphi \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \\ \bar{\gamma}_{kx} &= \bar{\gamma}_k \sin \varphi = \bar{\gamma}_k^{\max} \sin \varphi \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Т.к., $\sin \varphi = \frac{\bar{y}}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}}$ и $\cos \varphi = \frac{\bar{x}}{\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}}$, можно переписать

зависимость (2.13) в виде:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\gamma}_{kx} &= \bar{\gamma}_k^{\max} \bar{y} \\ \bar{\gamma}_{ky} &= \bar{\gamma}_k^{\max} \bar{x} \end{aligned} \right\} \quad (2.13')$$

Тогда значения $\bar{\gamma}_x$ и $\bar{\gamma}_y$ в уравнениях (2.12) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\gamma}_x &= \bar{\gamma}_k^{\max} \cdot \bar{y} \\ \bar{\gamma}_y &= \bar{\gamma}_k^{\max} \cdot \bar{x} + \bar{\gamma}_Q^{\max} (1 - \bar{y}^2) \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

$$\alpha = \frac{\bar{\epsilon}_0^{\max}}{\bar{\epsilon}_И^{\max}}; \quad \beta = \frac{\bar{\gamma}_k^{\max}}{\bar{\epsilon}_И^{\max}}; \quad \delta = \frac{\bar{\gamma}_Q^{\max}}{\bar{\epsilon}_И^{\max}}. \quad (2.15)$$

Уравнение (2.12) можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\bar{\sigma}_0}{\bar{\sigma}} &= \frac{\alpha}{\alpha + \bar{y}} = \frac{\alpha}{\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi} \\ \frac{\bar{\tau}_x}{\bar{\sigma}} &= \frac{\beta \bar{y}}{\alpha + \bar{y}} = \frac{\beta \bar{\rho} \sin \varphi}{\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi} \\ \frac{\bar{\tau}_y}{\bar{\sigma}} &= \frac{\beta \bar{x} + \delta(1 - \bar{y}^2)}{\alpha + \bar{y}} = \frac{\beta \bar{\rho} \cos \varphi + \delta(1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)}{\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

Условие пластичности, выдвинутое М. Huber и R. Mises:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) = 2\sigma_s^2$$

Можно получить:

$$\sigma^2 + 3(\tau_x^2 + \tau_y^2) = \sigma_s^2 = 1$$

$\sigma_s = \sqrt{3} \tau_s$, откуда

$$\bar{\sigma}^2 + \bar{\tau}_x^2 + \bar{\tau}_y^2 = 1 \quad (2.17)$$

Решая (2.17) и (2.16), после преобразований можно получить:

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{\sigma} &= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\beta \bar{\rho} \sin \varphi}{\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi} \right)^2 + \left[\frac{\beta \bar{\rho} \cos \varphi + \delta (1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)}{\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi} \right]^2}} \\
 \bar{\tau}_x &= \frac{\frac{\beta \bar{\rho} \sin \varphi}{2 + \bar{\rho} \sin \varphi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\beta \bar{\rho} \sin \varphi}{\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi} \right)^2 + \left[\frac{\beta \bar{\rho} \cos \varphi + \delta (1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)}{\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi} \right]^2}} \\
 \bar{\tau}_y &= \frac{\frac{\beta \bar{\rho} \cos \varphi + \delta (1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)}{\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\beta \bar{\rho} \sin \varphi}{\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi} \right)^2 + \left[\frac{\beta \bar{\rho} \cos \varphi + \delta (1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)}{\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi} \right]^2}}
 \end{aligned} \right\} (2.18)$$

или введя обозначения **a** и **B**, упростим запись:

$$a = \frac{\beta \bar{\rho} \sin \varphi}{\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi}; \quad B = \frac{\beta \bar{\rho} \cos \varphi + \delta (1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)}{\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi}; \quad (2.19)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{\sigma} &= \frac{1}{\sqrt{1 + a^2 + B^2}} \\
 \bar{\tau}_x &= a \bar{\sigma} \\
 \bar{\tau}_y &= B \bar{\sigma}
 \end{aligned} \right\} (2.18')$$

Напряжения по сечению лучше представить в виде:

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{\sigma} &= \frac{\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi}{\sqrt{(\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi)^2 + (\beta \bar{\rho} \sin \varphi)^2 + [\beta \bar{\rho} \cos \varphi + \delta (1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)]^2}} \\
 \bar{\tau}_x &= \frac{\beta \bar{\rho} \sin \varphi}{\sqrt{(\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi)^2 + (\beta \bar{\rho} \sin \varphi)^2 + [\beta \bar{\rho} \cos \varphi + \delta (1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)]^2}} \\
 \bar{\tau}_y &= \frac{\beta \bar{\rho} \cos \varphi + \delta (1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)}{\sqrt{(\alpha + \bar{\rho} \sin \varphi)^2 + (\beta \bar{\rho} \sin \varphi)^2 + [\beta \bar{\rho} \cos \varphi + \delta (1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi)]^2}}
 \end{aligned} \right\} (2.20)$$

На основании вышеизложенного, получено распределение нормального и касательных напряжений в сечении витка пружины при разных значениях α , β и δ .

2.3. Анализ смещения границы упругой и пластической областей сечения

Для уточнения упругой области сечения запишем:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma} &= \bar{E}' \left(\varepsilon_0 + \varepsilon_{И}^{\max} \bar{y} \right); \\ \bar{\tau}_x &= \bar{G}' \gamma_k^{\max} \cdot \bar{y}; \\ \bar{\tau}_y &= \bar{G}' \left[\gamma_k^{\max} \bar{x} + \gamma_Q^{\max} \left(1 - \bar{y}^2 \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

$$\left(\alpha + \bar{y} \right)^2 + \left[\beta \bar{x} + \delta \left(1 - \bar{y}^2 \right) \right]^2 + \left(\beta \bar{y} \right)^2 = \frac{1}{\left(\varepsilon_{И}^{\max} \right)^2}. \quad (2.22)$$

Уравнение границы упругой области сечения (рисунок 2.10): Графическое представление смещения границы упругой и пластической областей сечения показано на рисунке 2.11. Программа расчета в пакете символьных вычислений «Maple» представлена в Приложении.

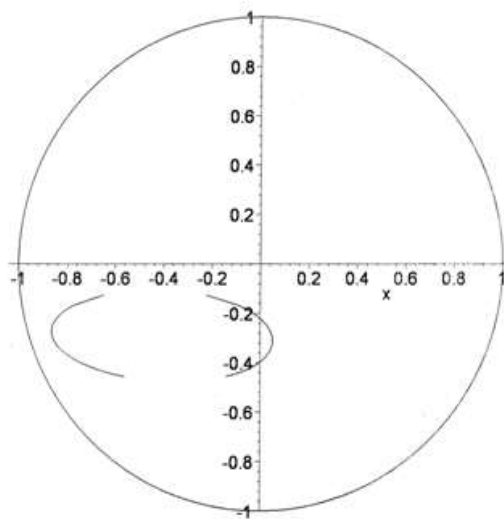


Рисунок 2.10. Граница раздела упругой и пластической областей

Если приложить только изгибающий момент $M_{и}$, тогда граница упругой и пластической областей представляется двумя прямыми. (рис.2.11,а). Если приложить изгибающий $M_{и}$ и крутящий моменты $M_{к}$, тогда граница представляется в виде эллипса (рис. 2.11, б). Если приложить изгибающий $M_{и}$ и крутящий $M_{к}$ моменты, а также осевую силу сжатия N , тогда происходит смещение границы по оси y (рис. 2.11, в). Если приложить изгибающий $M_{и}$, крутящий $M_{к}$ моменты, осевую силу сжатия N и перерезывающую силу Q , тогда граница эллипсной формы имеет дополнительное смещение по оси x (рис.2.11, г).

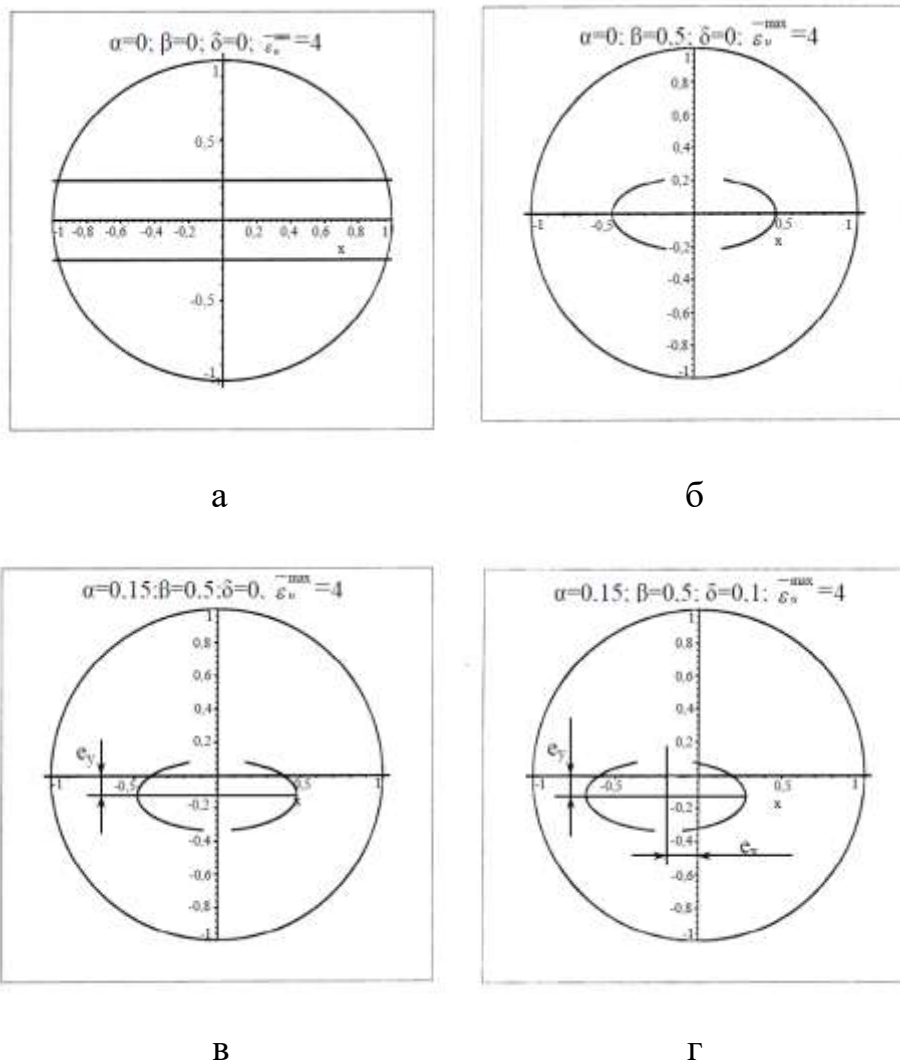


Рисунок 2.11. Графическое представление смещения границы упругой и пластической областей сечения: а – изгибающий момент; б – изгибающий и крутящий момент; в- изгибающий, крутящий моменты и осевая сила; г - изгибающий и крутящий момент, осевая и перерезывающая сила

Отдельные случаи.

1. Нагружение изгибающим моментом и перерезывающей силой

При $\alpha = \beta = 0$, получим:

$$\bar{y}^{-4} + \left(\frac{1}{\delta^2} - 2 \right) \bar{y}^{-2} + \left[1 - \left(\frac{1}{\bar{\epsilon}_{и\max}} \right)^2 \right] = 0$$

При $\bar{и} = \bar{y}^{-2}$ получим

$$\bar{и}_{1,2} = 1 - \frac{1}{2\delta^2} \pm \frac{1}{\delta} \sqrt{\frac{1}{\delta^2} + \left(\frac{4}{\bar{\epsilon}_{и\max}} \right)^2 - 4}.$$

$$\bar{и}_{1,2,3,4} = \pm \sqrt{1 - \frac{1}{2\delta^2} \pm \frac{1}{\delta} \sqrt{\frac{1}{\delta^2} + \left(\frac{4}{\bar{\epsilon}_{и\max}} \right)^2 - 4}}.$$

Прямые линии разделяют упругую и пластическую области сечения.

2. Анализируя другой случай (**СКИ**) при трёхфакторном нагружении определим границы упругой области. При $\delta=0$, получим уравнение:

$$\bar{x}^{-2} \frac{\beta^2}{1+\beta^2} + \bar{y}^{-2} + 2\bar{y} \frac{\alpha}{1+\beta^2} = \frac{\frac{1}{\bar{\epsilon}_{и\max}} - \alpha^2}{1+\beta^2}$$

Уравнение границы:

$$\frac{\bar{x}^{-2}}{\frac{1}{\bar{\beta}^2 \left(\frac{1}{\bar{\epsilon}_{и\max}} \right)^2} - \frac{\alpha^2}{1+\beta^2}} + \frac{\left(\bar{y} + \frac{\alpha}{1+\beta^2} \right)}{\frac{1}{1+\beta^2} \left(\frac{1}{\left(\frac{1}{\bar{\epsilon}_{и\max}} \right)^2} - \frac{\alpha^2 \beta^2}{1+\beta^2} \right)} = 1$$

$\bar{а}, \bar{в}$ и $\bar{е}$ (рисунок 2.12):

$$\left. \begin{aligned}
 \bar{a} &= \sqrt{\frac{1}{\beta^2 \left(\bar{\varepsilon}_{\text{н}}^{\text{max}}\right)^2} - \frac{\alpha^2}{1 + \beta^2}}; \\
 \bar{b} &= \sqrt{\frac{1}{1 + \beta^2} \frac{1}{\left(\bar{\varepsilon}_{\text{н}}^{\text{max}}\right)^2} - \frac{\alpha^2 \beta^2}{1 + \beta^2}} \\
 \bar{e} = \bar{y}_0 &= -\frac{\alpha}{1 + \beta^2}
 \end{aligned} \right\} (2.25)$$

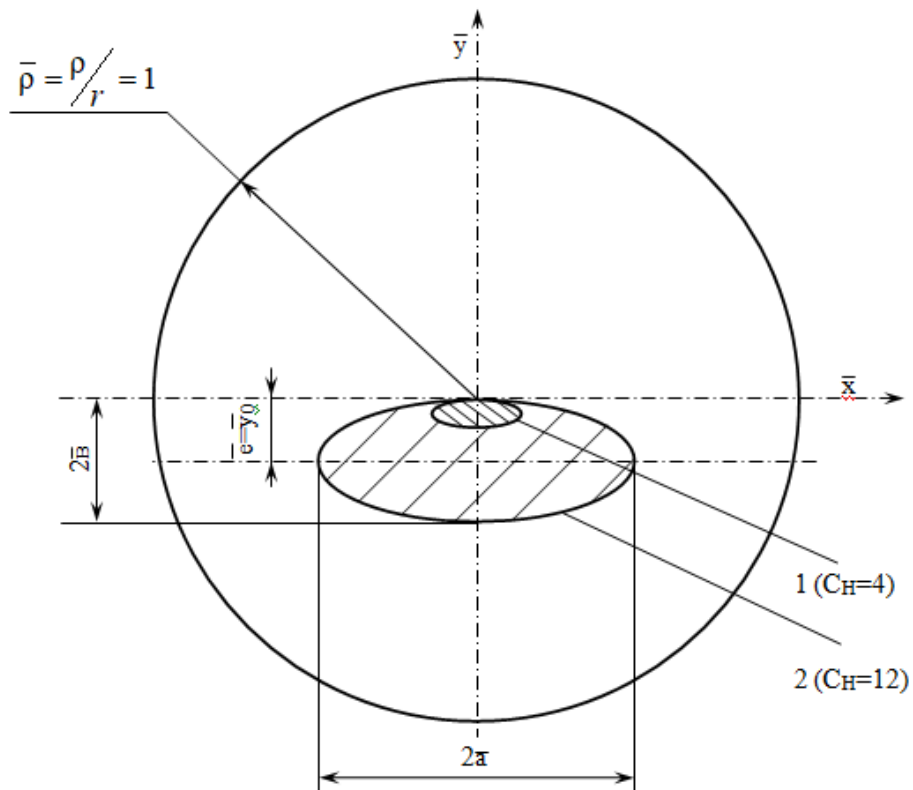


Рисунок 2.12. Смещение границы упругой области при навивке

Рассматривая формулу (2.25) при этом случае, можно отметить следующее. При возрастании величины деформации от осевой силы $\bar{\varepsilon}_0$ происходит увеличение относительного параметра нагружения α и, соответственно возрастает смещение центра эллипса из центра сечения, становятся меньше размеры полуосей \bar{a}, \bar{b} .

В случае, если деформация изгиба является незначительной $\left(\bar{\varepsilon}_{\text{и}}^{\text{max}} \rightarrow 0\right)$, относительные параметры нагружения стремятся к бесконечности $(\alpha \rightarrow \infty; \beta \rightarrow \infty)$, смещение центра эллипса \bar{e} стремится к нулю.

Когда $\varepsilon \rightarrow 0$, на величину \bar{a} влияет M_k .

При отсутствии крутящего момента, относительный параметр $\left(\beta = \frac{\gamma_k^{\text{max}}}{\varepsilon_{\text{и}}^{\text{max}}} \rightarrow 0\right)$, тогда полуось $\bar{a} \rightarrow \infty$.

По мере возрастания $\varepsilon_{\text{и}}^{\text{max}}$ становится меньше смещение центра эллипса.

Если возрастает M_k и, соответственно γ_k , что означает, что $\beta \rightarrow 0$, тогда полуоси границы упругой и пластической областей стремятся к нулю.

Эллипсная граница упругой и пластической областей стремится к нулю при следующем условии:

$$\bar{\varepsilon}_0 \leq \left(\frac{\varepsilon_{\text{и}}^{\text{max}}}{\gamma_k^{\text{max}}}\right)^2 + 1 \quad (2.26)$$

Из уравнения (2.26) следует, что при $\varepsilon_{\text{и}}=0$, эллипсная граница упругой и пластической областей уменьшается при $\bar{\varepsilon}_0 = 1$.

В том случае, когда возникает изгиб $\varepsilon_{\text{и}}$, тогда эллипсная граница упругой и пластической областей смещается и расширяется, и для её сужения требуется приложить деформацию $\bar{\varepsilon}_0 > 1$.

При $\varepsilon_0=0$ формула (2.25) можно вычислить размеры полуосей \bar{a}, \bar{b}

$$\bar{a} = \frac{1}{\frac{\gamma_k^{\text{max}}}{\varepsilon_{\text{и}}^{\text{max}}}} = \frac{\gamma_s}{\Theta \cdot r} = \frac{\sqrt{3}\varepsilon_s}{\Theta \cdot r} = \frac{\sqrt{3}\sigma_s R}{rE \sin \alpha_n \cos \alpha_n},$$

$$\bar{v} = \frac{1}{\sqrt{\left(\gamma_k^{-\max}\right)^2 + \left(\varepsilon_{\text{и}}^{-\max}\right)^2}} = \frac{\varepsilon_s}{r\sqrt{\chi^2 + \frac{1}{3}\Theta^2}} = \frac{\sqrt{3}\sigma_s R}{rE\sin\alpha_n \cos\alpha_n \sqrt{1+3\text{tg}^2\alpha_n}}. \quad (2.27)$$

Где α_n – угол подъема витка навиваемой пружины; Θ – кручение; χ – кривизна.

Для пружин при $c_H=4\dots 12$, $\alpha_n = 20\dots 45^\circ$, $\sigma_0 \leq 0,1\sigma_s$, т.е. $\bar{\varepsilon}_0 = 0,1$.

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_s &= \frac{\sigma_s}{E}, \quad \gamma_s = \sqrt{3}\varepsilon_s, \\ \varepsilon_{\text{и}}^{-\max} &= \frac{\varepsilon_{\text{и}}^{\max}}{\varepsilon_s} = \frac{\cos^2\alpha_n E}{c_H \sqrt{3}\sigma_s}, \\ \gamma_k^{-\max} &= \frac{\gamma_k^{\max}}{\gamma_s} = \frac{\sin\alpha_n \cos\alpha_n E}{c_H \sqrt{3}\sigma_s}, \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

При $\sigma_s/E = 0,01$ и $c_H=4$

$$\varepsilon_{\text{и}}^{-\max} = 22, \quad \gamma_k^{\max} = 5,73, \quad \bar{a} = 17,5\%, \quad \bar{v} = 4,4\%, \quad \bar{e} = 4,25\%.$$

При $\sigma_s/E = 0,01$ и $c_H=12$

$$\varepsilon_{\text{и}}^{-\max} = 4,17, \quad \gamma_k^{\max} = 2,41, \quad \bar{a} = 41,5\%, \quad \bar{v} = 20,8\%, \quad \bar{e} = 18\%.$$

Величины упругих областей изображены с определенным соотношением к размеру r (рисунок 2.12).

Отношение площадей упругой области к общей площади в момент потери несущей способности составляет $\text{пав}/\pi r^2 = 0,087 = 8,7\%$.

Принимая допущение, что изменение напряжений в упругой области сечения имеет линейную зависимость от изменения площадей, рассчитаем

погрешность M_k и $M_{\text{и}}$ при $r_s = \frac{d_s}{2} \approx \sqrt{ab} = 0,295r$.

$$\frac{\Delta M_{\text{и}}}{M_{\text{и}}^*} = \frac{\frac{\pi d_s^3}{6} \sigma_s - \frac{\pi d_s^3}{32} \sigma_s}{\frac{\pi d_s^3}{6} \sigma_s} = \left(1 - \frac{6\pi}{32}\right) \left(\frac{r_s}{r}\right)^3 = 1,04\%,$$

$$\frac{\Delta M_k}{M_k^*} = \frac{\frac{\pi d_s^3}{12} \tau_s - \frac{\pi d_s^3}{16} \tau_s}{\frac{\pi d^3}{12} \tau_s} = \left(1 - \frac{3}{4}\right) \left(\frac{r_s}{r}\right)^3 = 1,9\% .$$

Следует подчеркнуть важное допущение, принятое в данной работе, а также в работах [27, 35, 45] о том, что закаленно-отпущенная пружинная проволока имеет низкий показатель деформационного упрочнения, близкий к нулю. Это еще раз подтверждает, что ранее принятое допущение о том, что деформируемая проволока рассматривается как жестко-пластическое тело с образованием пластического шарнира, является правомерной.

2.4. Расчет силовых факторов при комбинированном нагружении на основании общего решения

При интегрировании уравнений (2.7) можно рассчитать $\overline{M}_{и}^{ПСКИ}$; $\overline{M}_k^{ПСКИ}$; $\overline{N}^{ПСКИ}$; $\overline{Q}^{ПСКИ}$ при образовании пластического шарнира.

Согласно рисунка 2.13 с учетом уравнений (2.20) можно рассчитать

$$\overline{\tau}_\rho = \overline{\tau}_y \cos \varphi + \overline{\tau}_x \sin \varphi .$$

В этом случае уравнения (2.20) можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \overline{M}_{и}^{ПСКИ} &= \frac{3}{4} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \overline{\sigma} \cdot \overline{\rho}^{-2} \sin \varphi \cdot d\overline{\rho} \cdot d\varphi \\ \overline{M}_k^{ПСКИ} &= \frac{3}{2\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} (\overline{\tau}_y \cos \varphi + \overline{\tau}_x \sin \varphi) \cdot \overline{\rho}^{-2} d\overline{\rho} d\varphi \\ \overline{N}^{ПСКИ} &= \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \overline{\sigma} \overline{\rho} d\overline{\rho} d\varphi \\ \overline{Q}^{ПСКИ} &= \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \overline{\tau}_y \overline{\rho} d\overline{\rho} d\varphi \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

Решение данных уравнений аналитическим путем является сложной задачей.

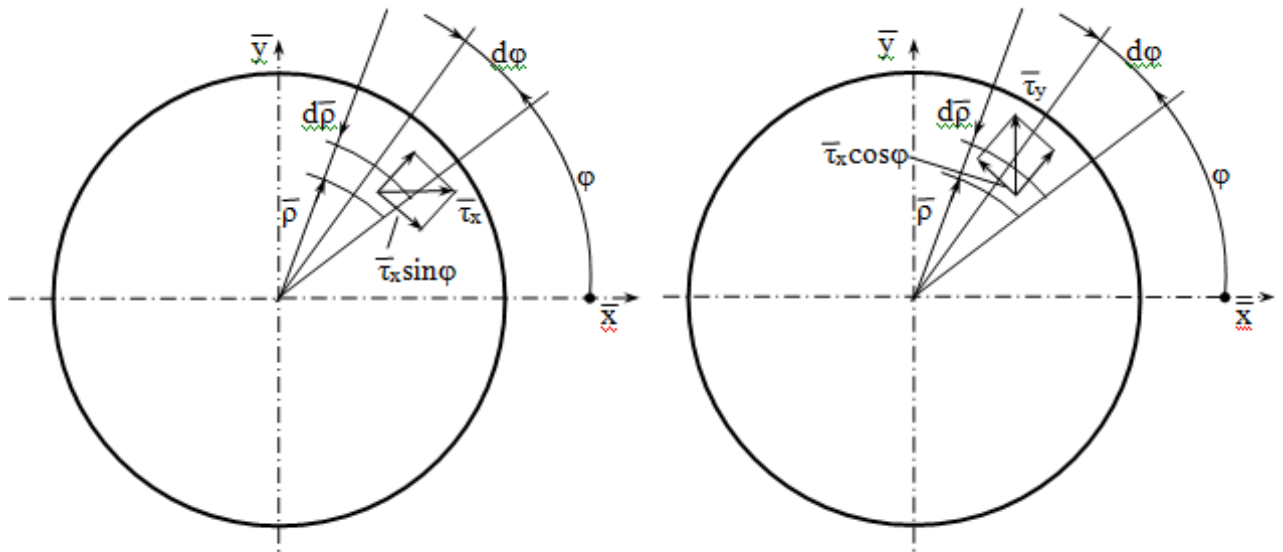


Рисунок 2.13. Схема расчета $\bar{\tau}_p$

Решали уравнения (2.29) с помощью программы pruzpere (Приложение), согласно которой можно определить α , β и δ при заданной величине одного из параметров:

$$\bar{M}_и, \bar{M}_к, \bar{N}, \bar{Q}$$

Для выполнения расчетов и их графического представления применяли программу «Maple», которая позволяет изобразить предельные поверхности для отдельных вариантов нагружения (рисунок 2.15, а, б, в, г), а также сечения предельных поверхностей (рисунок 2.16, а, б, в, г, д, е).

Согласно этой программы параметры α , β и δ задавали $338 \times 338 = 114244$ раз.

Когда $\varepsilon_{и}^{-\max} \rightarrow 0$ параметры α , β и δ задают $30 \times 30 \times 30 = 27000$ раз.

Параметры нагружения в выбранных точках задает пользователь

$$d_i = \operatorname{tg} \left\{ \operatorname{arctg}(\alpha_1 - \alpha_0) \sin \left[\frac{\pi}{2} - \sin(d_i \cdot i) \right] \right\} + \alpha_0,$$

где $\alpha_0 = -1.111$ - начальное значение, $\alpha_1 = 50$ - конечное значение, i от 0

до $N_Q=338$ - номер точки, $d_i = \frac{\pi}{2N_Q}$.

Данные вычислений при одновременном нагружении $\bar{M}_n, \bar{M}_k, \bar{N}, \bar{Q}$ представлены в табличной форме (Приложение)

Графическое представление данных вычислений задачи в трехмерном пространстве даны на рисунках 2.14, а, б, в, г.

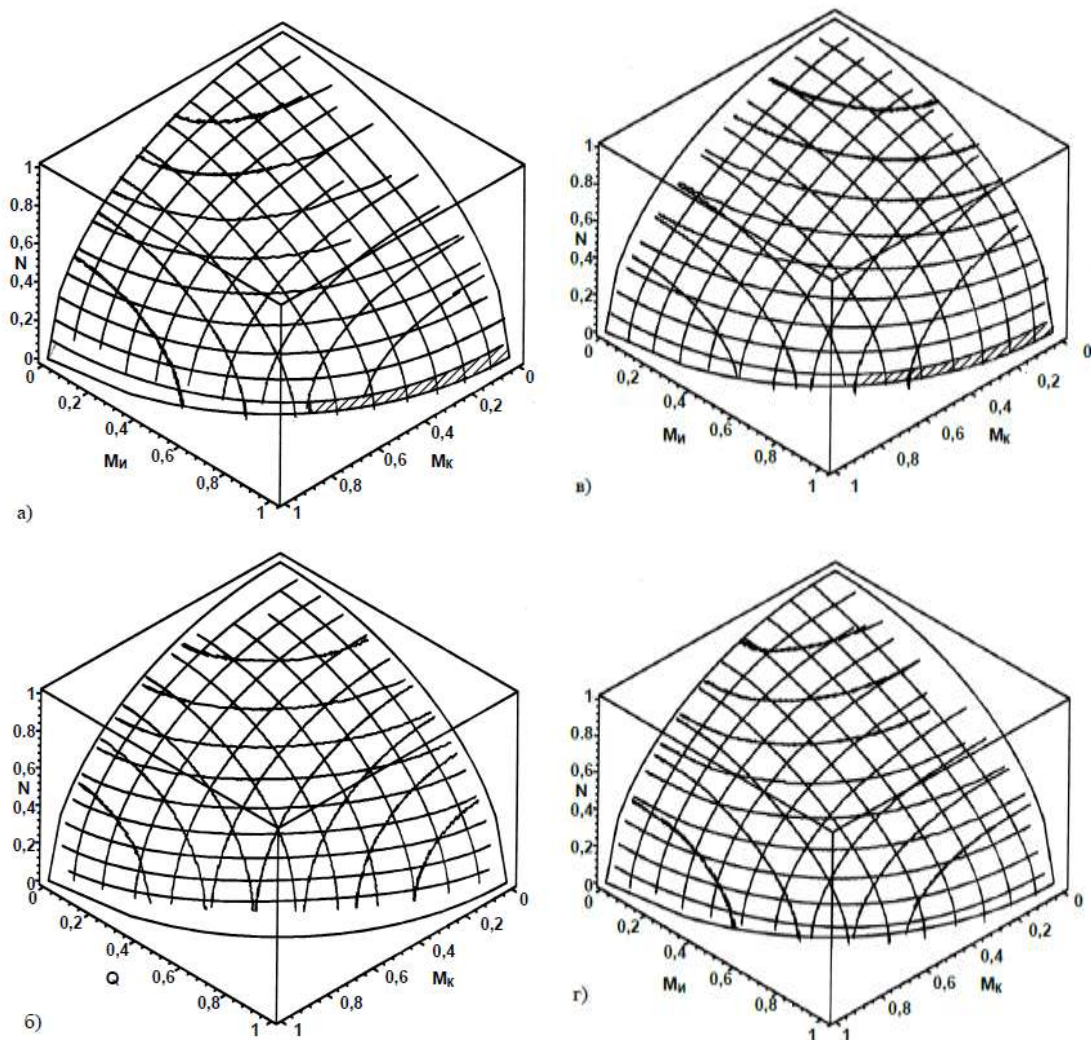


Рисунок 2.14. Графическое представление данных вычислений задачи в трехмерном пространстве

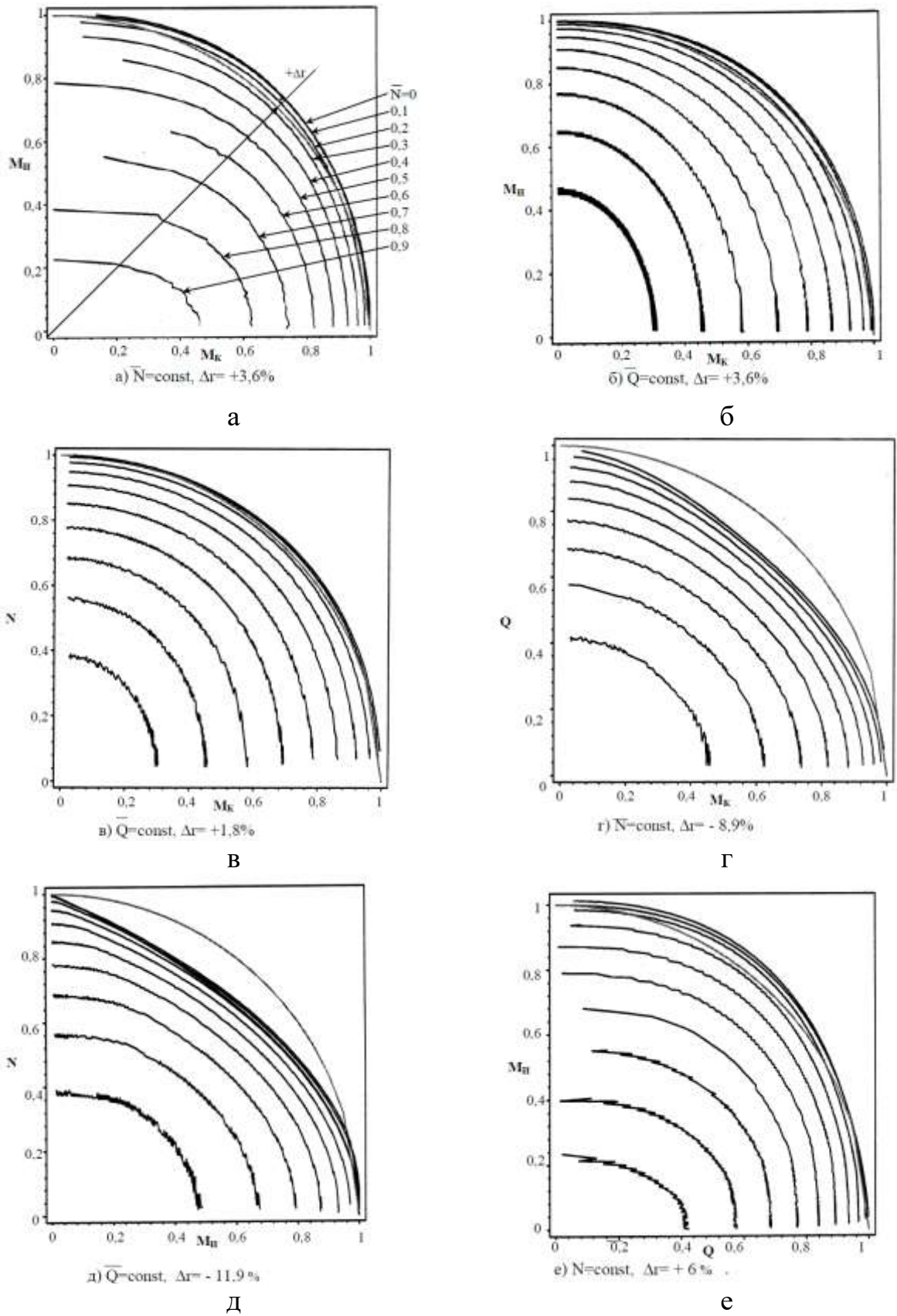


Рисунок 2.15. Сечение предельной поверхности при $N = \text{const}$. $Q = \text{const}$

Предельную поверхность можно считать сферической. Тогда силовые параметры можно оценить следующим уравнением:

$$\sqrt{\overline{M}_и^2 + \overline{M}_к^2 + \overline{N}^2 + \overline{Q}^2} = 1 \quad (2.39)$$

Предельную поверхность можно показать относительно сил, соответствующих пределу текучести материала в форме, похожей на эллипсоид с полуосями, например $\overline{M}_и + \overline{M}_к + \overline{N}$.

$$\frac{a}{R_{сф}} = \frac{M_{и}^*}{M_{s}^и} = 1,7; \quad \frac{b}{R_{сф}} = \frac{M_{к}^*}{M_{s}^к} = 1,333; \quad \frac{c}{R_{сф}} = \frac{N^*}{N_s} = 1$$

При изготовлении пружин сжатия, когда $C=4\dots 12$, для варианта $\overline{M}_и + \overline{M}_к + \overline{N}$ имеем:

$$\alpha=0\dots 0,24; \quad \beta=0\dots 0,59; \quad \overline{N}^{ски} = 0,1$$

Участок предельной поверхности с вышеуказанными параметрами заштрихован (см. рисунок 2.14а).

Для пружин с большой кривизной при $C=D/d=3$ величину $\overline{Q} = \frac{Q}{Q^*}$,

с учетом того, что

$$Q^* = \frac{\pi d^2}{4} \tau_s = \frac{\pi d^2 \sigma_s}{4\sqrt{3}}; \quad M^* = \frac{\sigma_s d^3}{6},$$

имеем:

$$\overline{Q} = \frac{1}{4\sqrt{3}c} = \frac{1}{4\sqrt{3} \cdot 3} = 0,048.$$

Фактическая сила трения влияет на величину перерезывающей силы \overline{Q} которая, в свою очередь оказывает воздействие на соотношения $\overline{M}_и$ и $\overline{M}_к$. (рисунок 2.14, в).

2.5. Определение сил и моментов при разных сочетаниях трехфакторного нагружения

Сжатие + кручение + изгиб (N+M_к+M_и)

Полагая в уравнениях (2.20) и (2.29) $\alpha=0$, получим:

$$\left. \begin{aligned} \overline{M}_{И}^{СКИ} &= \frac{3}{2} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \frac{\overline{\rho}^3 \sin^2 \varphi + \overline{\rho}^2 \alpha \sin \varphi}{\sqrt{\overline{\rho}^2 (\beta^2 + \sin^2 \varphi) + 2\overline{\rho} \alpha \sin \varphi + \alpha^2}} d\overline{\rho} d\varphi; \\ \overline{M}_{К}^{СКИ} &= \frac{3}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \frac{\overline{\rho}^3 \beta}{\sqrt{\overline{\rho}^2 (\beta^2 + \sin^2 \varphi) + 2\overline{\rho} \alpha \sin \varphi + \alpha^2}} \cdot d\overline{\rho} d\varphi; \\ \overline{N}^{СКИ} &= \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \frac{\overline{\rho}^2 \sin \varphi + \overline{\rho} \alpha}{\sqrt{\overline{\rho}^2 (\beta^2 + \sin^2 \varphi) + 2\overline{\rho} \alpha \sin \varphi + \alpha^2}} \overline{\rho} d\overline{\rho} d\varphi. \end{aligned} \right\} \quad (2.40)$$

Получено решение [69], которое является одинаковым с решением, полученным в данной работе (2.29). Предельные поверхности совпадают между собой (рисунок 2.15, а).

Перерезывающая сила+кручение+изгиб (Q+M_к+M_и)

Если принять в формулах (2.27) и (2.38), что $\alpha=0$, тогда:

$$\left. \begin{aligned} \overline{M}_{И}^{ПКИ} &= \frac{3}{2} \int_0^1 \int_0^{\pi} \frac{\overline{\rho}^3 \sin^2 \varphi}{\sqrt{\overline{\rho}^2 (\beta^2 + \sin^2 \varphi) + \alpha^2}} d\overline{\rho} d\varphi; \\ \overline{M}_{К}^{ПКИ} &= \frac{3}{\pi} \int_0^1 \int_0^{\pi} \left(\frac{\alpha \cos \varphi}{\sqrt{\overline{\rho}^2 (\beta^2 + \sin^2 \varphi) + \alpha^2}} - \frac{\delta \overline{\rho} \sin \varphi}{\sqrt{\overline{\rho}^2 (\beta^2 + \sin^2 \varphi) + \alpha^2}} \right) \cdot \overline{\rho}^2 \cdot d\overline{\rho} d\varphi; \\ \overline{Q} &= \frac{2}{\pi} \int_0^1 \int_0^{\pi} \frac{\overline{\rho}}{\sqrt{\overline{\rho}^2 (\beta^2 + \sin^2 \varphi) + \alpha^2}} d\overline{\rho} d\varphi, \end{aligned} \right\} \quad (2.41)$$

$$\text{где } a = \delta \bar{\rho} \cos \varphi + \alpha \left(1 - \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi \right), \quad b = (1 + \delta) \bar{\rho}^2 \sin^2 \varphi.$$

Получено решение, которое совпадает с решением, выполненным ранее в работе [166] (рисунок 2.14, в).

Кручение + Сжатие ($M_K + N$)

Запишем формулы (2.39) после преобразований в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_{И}^{\text{СКИ}} &= \frac{3}{2} \int_0^1 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{\bar{\rho}^{-2} / \alpha \sin^2 \varphi + \bar{\rho}^{-2} \sin \varphi}{\sqrt{\bar{\rho}^{-2} \left(\frac{\beta^2}{\alpha^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{\alpha^2} \right) + \frac{2\bar{\rho} \sin \varphi}{\alpha} + 1}} d\bar{\rho} d\varphi; \\ \bar{M}_K^{\text{СКИ}} &= \frac{3}{\pi} \int_0^1 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{\bar{\rho}^{-3} \cdot \beta / \alpha}{\sqrt{\bar{\rho}^{-2} \left(\frac{\beta^2}{\alpha^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{\alpha^2} \right) + \frac{2\bar{\rho} \alpha \sin \varphi}{\alpha} + 1}} \cdot d\bar{\rho} d\varphi; \\ \bar{N}^{\text{СКИ}} &= \frac{1}{\pi} \int_0^2 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{\bar{\rho}^{-2} / \alpha \sin \varphi + \bar{\rho}}{\sqrt{\bar{\rho}^{-2} \left(\frac{\beta^2}{\alpha^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{\alpha^2} \right) + \frac{2\bar{\rho} \sin \varphi}{\alpha} + 1}} d\bar{\rho} d\varphi. \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

Полагая $\bar{\varepsilon}_{u \max} = 0, \alpha = \infty, \beta = \infty$, и обозначив

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\bar{\gamma}_{\max}}{\bar{\varepsilon}_0} = \frac{\gamma_{\max}}{\sqrt{3}\varepsilon_0} = \frac{r}{\sqrt{3}} \frac{\theta}{\varepsilon_0} = \frac{r}{\sqrt{3}} \psi = a, \text{ получим}$$

$$\left. \begin{aligned}
\bar{M}_{\text{И}}^{\text{СК}} &= \frac{3}{2} \int_0^1 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{\bar{\rho}^{-3} \sin \varphi}{\sqrt{\bar{\rho} a^2 + 1}} d\bar{\rho} d\varphi = \frac{3}{2} \int_0^1 \frac{\bar{\rho}^{-3} d\bar{\rho}}{\sqrt{\bar{\rho}^2 a^2 + 1}} (-\cos \varphi) \Big|_{-\pi/2}^{+\pi/2} = 0, \\
\bar{M}_{\text{К}}^{\text{СК}} &= \frac{3}{\pi} \int_0^1 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{\bar{\rho}^{-3} \cdot a}{\sqrt{\bar{\rho}^2 a^2 + 1}} \cdot d\bar{\rho} d\varphi = 3a \int_0^1 \frac{\bar{\rho}^{-3}}{\sqrt{\bar{\rho}^2 a^2 + 1}} d\bar{\rho} = \frac{\sqrt{\bar{\rho}^2 a^2 + 1}}{a^3} (\bar{\rho}^2 a^2 - 2) \Big|_0^1 = \\
&= \frac{1}{a^3} [\sqrt{a^2 + 1}(a^2 - 2) + 2] = \frac{2\sqrt{3}\pi\sigma_s}{\psi^2 M^*} \left[\sqrt{\frac{r^2 \psi^2}{3} + 1} \left(\frac{r^2 \psi^2}{3} - 2 \right) + 2 \right], \\
\bar{N}^{\text{СК}} &= \frac{2}{\pi} \int_0^1 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{\bar{\rho}}{\sqrt{\bar{\rho}^2 a^2 + 1}} d\bar{\rho} d\varphi = 2 \int_0^1 \frac{\bar{\rho}}{\sqrt{\bar{\rho}^2 a^2 + 1}} d\bar{\rho} = \\
&= \frac{2}{a^2} (\sqrt{a^2 + 1} - 1) = \frac{6\pi}{N\psi^2} \sigma_s \left(\sqrt{\frac{\psi^2 r^2}{3} + 1} - 1 \right).
\end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

Примем за неизвестную функцию $\tau(\rho)$, тогда согласно условию пластичности

$$\bar{\sigma}(\rho) = \sqrt{1 - \bar{\tau}^2}.$$

Выразим силу и момент через функцию $\bar{\tau}(\bar{\rho})$

$$\bar{M}_{\text{К}}^{\text{СК}} = 3 \int_0^1 \bar{\tau} \cdot \bar{\rho}^{-2} d\bar{\rho}, \quad \bar{N}^{\text{СК}} = 2 \int_0^1 \sqrt{1 - \bar{\tau}^2} \bar{\rho} d\bar{\rho}. \quad (2.44)$$

Задавая функцию $\bar{\tau}(\bar{\rho})$, получим различные статически возможные состояния, одно из которых является истинным. Ему будут соответствовать максимальные значения момента.

Кручение + изгиб (Mк+Mi)

Полагая в (2.39) $\alpha = 0$, получим:

$$\left. \begin{aligned} \overline{M}_K^{KI} &= \frac{3}{\pi} \int_0^1 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{\bar{\rho}^{-2} \beta}{\sqrt{(\beta^2 + \sin^2 \varphi)}} \cdot d\bar{\rho} d\varphi = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1+p^2 \sin^2 \varphi}} = \frac{2}{\pi \sqrt{1+p^2}} F\left(\frac{\pi}{2}, K\right) \\ \overline{N}^{KI} &= \frac{2}{\pi} \int_0^1 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{\bar{\rho} \sin \varphi}{\sqrt{(\beta^2 + \sin^2 \varphi)}} d\bar{\rho} d\varphi = \frac{1}{\beta \pi} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{\sin \varphi}{\sqrt{1+p^2 \sin^2 \varphi}} d\varphi = \\ &= -\frac{1}{\pi} \arcsin \frac{\frac{1}{\beta} \cos \varphi}{\sqrt{1+\frac{1}{\beta^2}}} \Big|_{-\pi/2}^{+\pi/2} = 0, \end{aligned} \right\} (2.45)$$

где: $p = 1/\beta$, $K = 1/\sqrt{1+p^2}$, $F(\pi/2, K)$ – полный эллиптический интеграл первого рода.

Обозначим:

$$\overline{M}_K^{KI} = \overline{M}_K M_K^* = \overline{M}_K^* \frac{2}{\pi \sqrt{1+p^2}} F\left(\frac{\pi}{2}, K\right) = B \sigma_s d^3. \quad (2.46)$$

Если $p = \frac{1}{\beta} = \frac{\varepsilon_{и\max} \gamma_s}{\varepsilon_s \gamma_{\max}} = \frac{\sqrt{3} \varepsilon_{и\max}}{\gamma_{\max}} \sqrt{3} \frac{\chi}{\Theta} = \sqrt{3} K'$, тогда:

$$B = \frac{1}{6\sqrt{1+p^2}} F\left(\frac{\pi}{2}, K\right) = \frac{1}{6\sqrt{1+3(K')^2}} F\left(\frac{\pi}{2}, K\right) \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned} \overline{M}_{и}^{KI} &= \frac{3}{2} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \frac{\bar{\rho}^{-2} \sin^2 \varphi}{\sqrt{(\beta^2 + \sin^2 \varphi)}} d\bar{\rho} d\varphi = \frac{1}{\beta} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^2 \varphi}{\sqrt{1+p^2 \sin^2 \varphi}} d\varphi = \\ &= \frac{\sqrt{1+p^2}}{p} E\left(\frac{\pi}{2}, K\right) - \frac{1}{p\sqrt{1+p^2}} F\left(\frac{\pi}{2}, K\right), \end{aligned} \quad (2.48)$$

Если $M_{и}^{KI} = \overline{M}_{и}^{KI} \cdot M_{и}^* = A \sigma_s d^3$, тогда

$$A = \frac{1}{6\sqrt{3}K'} \left[\sqrt{1+3(K')^2} E\left(\frac{\pi}{2}, K\right) - \frac{1}{\sqrt{1+3(K')^2}} F\left(\frac{\pi}{2}, K\right) \right] \quad (2.49)$$

Преобразуем формулы (2.46) и (2.48) с учетом

$$K^2 = \frac{1}{(1+\alpha^2)}, \quad \alpha = \beta.$$

$$\bar{M}_K^{\text{ки}} = \frac{\alpha}{\sqrt{1+\alpha^2}} F\left(\frac{\pi}{2}, K\right),$$

$$\bar{M}_И^{\text{ки}} = \frac{1}{\sqrt{1+\alpha^2}} \cdot \frac{1}{K^2} \left[E\left(\frac{\pi}{2}, K\right) - (1-K^2) F\left(\frac{\pi}{2}, K\right) \right]. \quad (2.50)$$

Получено решение, согласно которому изображение следа поверхности нагружения совпадает со следом предельной поверхности нагружения на плоскость $\bar{M}_И^{\text{ки}} - \bar{M}_K^{\text{ки}}$, (рисунок 2.15, а).

Изгиб+сжатие (M_u+N)

Примем параметр $\beta=0$, тогда

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_K &= 0, \\ \bar{N}^{\text{си}} &= \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^1 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{\rho(\bar{\rho} \sin \varphi + \alpha)}{|\bar{\rho} \sin \varphi + \alpha|} d\rho d\varphi \end{aligned} \right\} \quad (2.51)$$

Если $t = \frac{\alpha}{\rho}$, тогда:

$$\int \bar{\rho} \arcsin \frac{\alpha}{\rho} d\bar{\rho} = -\alpha^2 \int \frac{\arcsin t}{t^3} dt = \frac{\alpha \rho}{2} \left[\frac{\arcsin \frac{\alpha}{\rho}}{\frac{\alpha}{\rho}} + \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\rho}\right)^2} \right] \Big|_{\alpha}^1$$

окончательно получим:

$$\bar{N}^{\text{СИ}} = \frac{2\alpha}{\pi} \left(\frac{\arcsin \alpha}{\alpha} + \sqrt{1 - \alpha^2} \right) \quad (2.52)$$

Поступим аналогично с выражением для изгибающего момента:

$$\begin{aligned} \bar{M}_{\text{И}}^{\text{СИ}} &= \frac{3}{2} \int_0^1 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \frac{\rho^{-2} \sin \varphi (\alpha + \sin \varphi)}{|\alpha + \rho \sin \varphi|} d\rho d\varphi = 3 \int_{\alpha}^1 \int_{-\pi/2}^{-\arcsin(\frac{\alpha}{\rho})} \rho^{-2} \sin \varphi d\rho d\varphi = \\ &= 3 \int_{\alpha}^1 \rho^{-2} \cos \left(\arcsin \frac{\alpha}{\rho} \right) d\rho. \end{aligned}$$

Заменяем переменную $t = \arcsin \frac{\alpha}{\rho}$

$$\cos t = \sqrt{1 - \sin^2 t} = \sqrt{1 - \sin^2 \left(\arcsin \frac{\alpha}{\rho} \right)} = \frac{1}{\rho} \sqrt{\rho^2 - \alpha^2},$$

$$\bar{M}_{\text{И}}^{\text{СИ}} = 3 \int_{\alpha}^1 \rho \sqrt{\rho^2 - \alpha^2} d\rho = \frac{3}{2} \int_{\alpha}^1 \sqrt{\rho^2 - \alpha^2} d(\rho^2 - \alpha^2).$$

Окончательно получим:

$$\bar{M}_{\text{И}}^{\text{СИ}} = \sqrt{(1 - \alpha^2)^3}. \quad (2.53)$$

Графически это решение совпадает со следом предельной поверхности на плоскости $\bar{M}_{\text{И}}^{\text{СИ}} - \bar{N}^{\text{СИ}}$ (рисунок 2.15, д)

2.6. Выводы

1. При навивке пружин, проволока испытывает деформацию $\varepsilon_{\text{И}}$, $\gamma_{\text{К}}$, $\varepsilon_{\text{О}}$ и γ_{Q} . от изгибающего момента $M_{\text{И}}^{\text{ПСКИ}}$, крутящего момента $M_{\text{К}}^{\text{ПСКИ}}$, осевой силы $N^{\text{ПСКИ}}$ и перерезывающей силы $Q^{\text{ПСКИ}}$. Область упругости значительно меньше пластической области и является незначительной.

2. В результате расчета получено распределение нормального и касательных напряжений в сечении витка пружины при разных значениях α , β и δ .

3. Изучена эволюция границы упругой области сечения витка.

4. Определены значения силовых факторов комбинированного нагружения, при которых происходит потеря несущей способности цилиндрического стержня.

5. Выделены частные случаи и получены решения, согласующиеся с решениями других авторов, полученными ранее.

ГЛАВА 3. ИЗУЧЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРУЖИН СЖАТИЯ ПРИ ИХ ФОРМООБРАЗОВАНИИ

3.1. Общие сведения

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 [1].

Геометрическая точность окончательно изготовленных пружин по непараллельности торцев и их неперпендикулярности к образующей пружины 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, которые отрицательно влияют на последующее обеспечение силовых параметров и их допусков.

3.2. Причины образования поверхностных дефектов пружин сжатия

Силы и моменты, воздействующие на проволоку при навивке пружин с применением оправки рассмотрены в работах [44, 67, 69]. Основной работой по навивке пружин без оправки является [69], в которой были рассмотрены вопросы навивки пружин растяжения.

Однако, схема навивки высоконагруженных пружин сжатия без использования оправки изучена недостаточно полно.

На рисунках 3.1 и 3.2. представлена схема навивки высоконагруженных пружин сжатия и силовые факторы [177, 178].

Принятые обозначения:

T - осевая сила сжатия при подаче проволоки;

P - сила, приложенная к 2-му упору;

Q_{III} - составляющая силы шагообразования;

$Q_L = Q_{III}$ - от механизма с шаговой лапкой;

$Q_K = Q_{III}$ - от механизма с шаговым клином;

f_{QL}, f_{QK} - силы трения на шагообразующем инструменте;

φ^* - угол начала образования пластического шарнира;

α - угол до контакта с клином или лапкой;

b - длинной размер;

$\vec{M}_{21}, \vec{M}_{22}$ - изгибающие моменты;

$\vec{M}_{K\alpha}$ - крутящий момент на участке α ;

Q_{21}, Q_{22} - реактивные силы;

Q_2 - сила на участке φ ;

D_{cp} - средний диаметр витков;

α_{II} - угол подъема витков пружины;

t - шаг витков пружины.

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

Для расчета использованы допущения, изложенные в работе [179]:

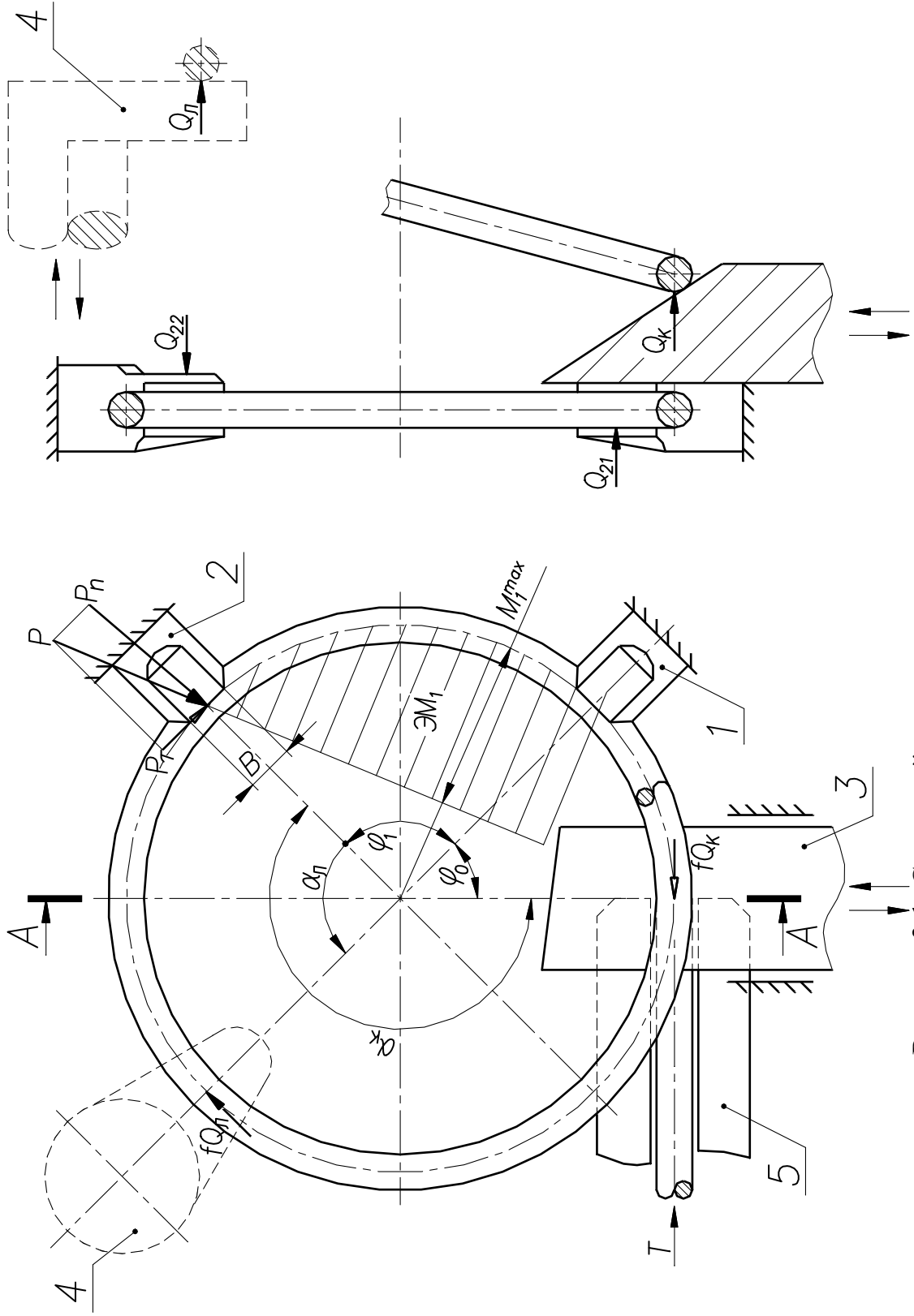


Рисунок 3.1. Схема действия сил при навивке:

1, 2 – первый и второй упорные штифты; 3 – шаговая лапка; 4 – шаговый клин; 5 – направляющая планка.

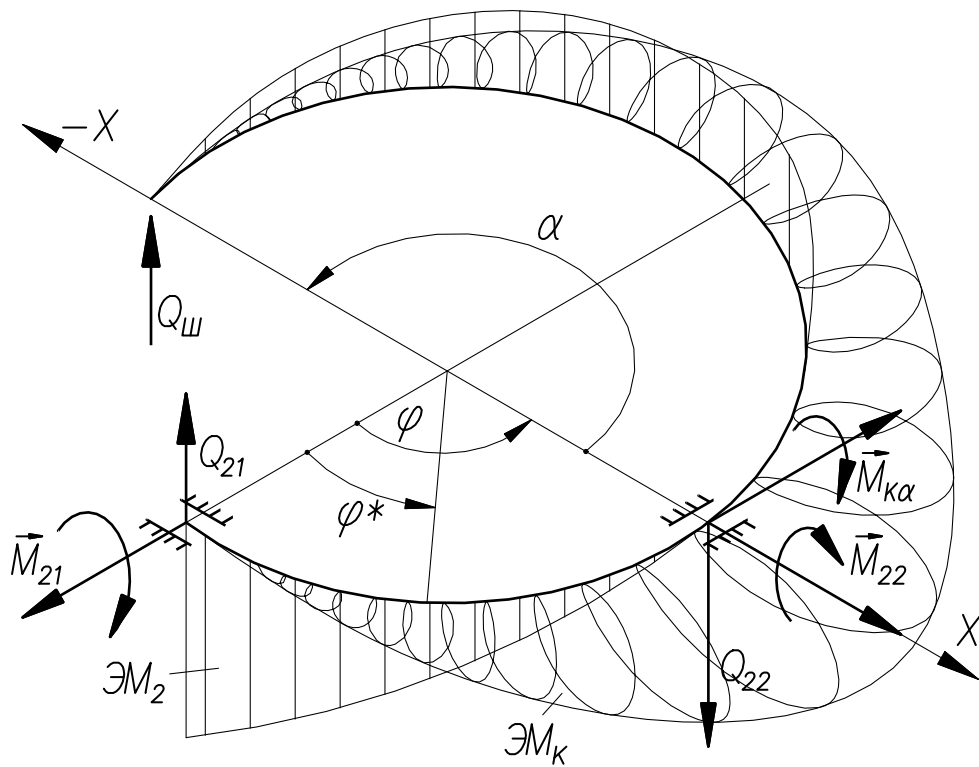


Рисунок 3.2. Схема для расчета сил в перпендикулярном направлении от плоскости изгиба

Представим действие сил и моментов в диапазоне действия угла φ_1 [179] (рисунок 3.2).

$$\frac{dQ_2}{d\varphi} = 0; \quad (3.1)$$

$$\frac{dM_{\kappa}}{d\varphi} - M_{\kappa} + Q_2 R = 0; \quad (3.2)$$

$$\frac{dM_{\kappa}}{d\varphi} + M_{\kappa} = 0; \quad (3.3)$$

где $R = (D-d)/2$;

откуда:

$$M_K = c_1 \sin \varphi + c_2 \cos \varphi - Q_2 R \quad (3.4)$$

Параметры c_1 и c_2 определяют из граничных условий

$$\text{при } \varphi = 0 \quad M_K = 0 \quad (3.5)$$

$$\text{при } \varphi = \varphi_1 \quad M_K = M_{K\alpha}$$

Моменты в диапазоне действия $\varphi = 0 \dots 90^\circ$ представим ниже:

$$M_K = \frac{Q_2 R (1 - \cos \varphi_1) - M_{K\alpha}}{\sin \varphi_1} \sin \varphi + Q_2 R (\cos \varphi - 1) \quad (3.6)$$

$$M_2 = \frac{M_{K\alpha} - Q_2 R (1 - \cos \varphi_1)}{\sin \varphi_1} \cos \varphi + Q_2 R \sin \varphi \quad (3.7)$$

Пружинонавивочные автоматы имеют, как правило, $\varphi_1 = 90^\circ$.

Крутящий и изгибающий моменты (3.6 и 3.7) представим следующим образом:

$$M_K = (Q_2 R - M_{K\alpha}) \sin \varphi + Q_2 R (\cos \varphi - 1) \quad (3.6')$$

$$M_2 = (M_{K\alpha} - Q_2 R) \cos \varphi + Q_2 R \sin \varphi \quad (3.7')$$

Составим уравнения (рисунки 3.2 и 3.3):

$$\begin{aligned} Q_2 &= Q_{21} = Q_{III} \sin \alpha \\ Q_{22} &= Q_{III} (1 + \sin \alpha) \\ M_{K\alpha} &= Q_{III} R (1 - \cos \alpha) \end{aligned} \quad (3.8)$$

С учетом решения данных уравнений (3.8) крутящий и изгибающий моменты в зоне деформации при воздействии сил в направлении, перпендикулярном плоскости навивки можно записать:

$$\begin{aligned} M_K &= R Q_{III} [(\sin \alpha + \cos \alpha - 1) \sin \varphi + \sin \alpha (\cos \varphi - 1)] \\ M_2 &= R Q_{III} [(1 - \cos \alpha - \sin \alpha) \cos \varphi + \sin \alpha \cdot \sin \varphi] \end{aligned} \quad (3.9)$$

Величины крутящего и изгибающего моментов в характерных точках подтверждают достоверность уравнения (3.9).

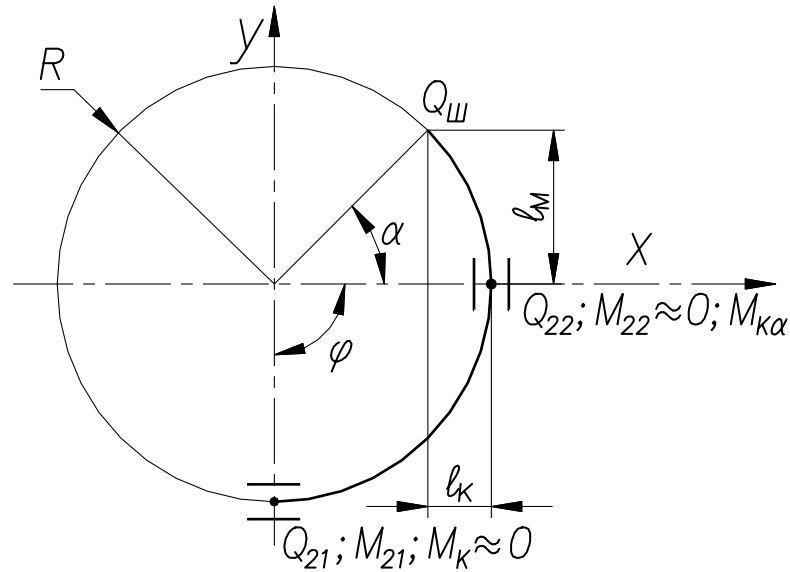


Рисунок 3.3. К расчету изгибающего и крутящего моментов

Таблица 7

Величины крутящего и изгибающего моментов в характерных точках

Параметр	$\alpha = 180^\circ$		$\alpha = 90^\circ$	
	$\varphi = 0$	$\varphi = 90^\circ$	$\varphi = 0$	$\varphi = 90^\circ$
M_K	0	$-2Q_{III}R$	0	$-Q_{III}R$
M_2	$2Q_{III}R$	0	0	$+Q_{III}R$

При совместном приложении сил и моментов при навивке (рисунки 3.1 и 3.2) в зоне деформации при $\varphi = \varphi^*$ возникает пластический шарнир - полная пластическая область.

На основе данных, изложенных в главе 2, определили максимальную относительную деформацию изгиба без учета пружинения:

$$\bar{\varepsilon}_n^{\max} = \frac{\varepsilon_n^{\max}}{\varepsilon_s} = \frac{\varepsilon_n^{\max} E}{\sigma_s} = \frac{dE}{D_{cp} \cdot \sigma_s} = \frac{3,6 \cdot 2 \cdot 10^4}{22,2 \cdot 170} = 19,1$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{\Pi} = \frac{t}{\pi \cdot D_{\text{cp}}} = \frac{9}{\pi \cdot 22,2} = 0,129 ; \quad \alpha_{\Pi} = 7,5^{\circ}.$$

$$\bar{\gamma}_{\text{K}}^{\max} = \frac{\gamma_{\text{K}}^{\max}}{\gamma_{\text{S}}} = \frac{d \sin 2\alpha_{\Pi} \sqrt{3} G}{2D_{\text{cp}} \cdot \sigma_{\text{S}}} = \frac{3,6 \sin 15^{\circ} \sqrt{3} \cdot 8 \cdot 10^3}{2 \cdot 22,2 \cdot 170} = 1,7$$

Сила P (рисунок 3.1), связанная с работой пластической деформации изгиба (т.е. без учета трения).

$$P_{\text{n}} = \frac{2M_{\text{пл}}}{D_{\text{cp}}} = \frac{d^3 \sigma_{\text{S}}}{3D_{\text{cp}}}; \quad N^* = \frac{\pi \cdot d^3}{4} \sigma_{\text{S}}$$

откуда:

$$\bar{\varepsilon}_0 = \frac{P_{\text{n}}}{N^*} = \frac{4d}{3\pi D_{\text{cp}}} = \frac{4 \cdot 3,6}{3\pi \cdot 22,2} = 0,069$$

Перерезывающая сила в плоскости изгиба для двухштифтовой схемы сравнительно мала. А для одноштифтовой схемы (т.к. пластический шарнир расположен при угле $\varphi^* = 45^{\circ}$) она равна:

$$Q = P_{\text{H}} \cos 45^{\circ} = \frac{d^3 \sigma_{\text{S}}}{3D_{\text{cp}}} 0,707;$$

$$Q^* = \frac{\pi \cdot d^4}{4} \sigma_{\text{S}};$$

$$\bar{\gamma}_{\text{Q}}^{\max} = \frac{Q}{Q^*} = \frac{0,707d \cdot 4}{3D_{\text{cp}} \pi} = \frac{0,707 \cdot 4 \cdot 3,6}{3 \cdot 22,2 \pi} = 0,049$$

Относительные параметры нагружения:

$$\alpha = \frac{\bar{\varepsilon}_0}{\bar{\varepsilon}_{\text{H}}^{\max}} = \frac{0,069}{19,1} = 0,0036;$$

$$\beta = \frac{\bar{\gamma}_{\text{K}}^{\max}}{\bar{\varepsilon}_{\text{H}}^{\max}} = \frac{,7}{19,1} = 0,089;$$

$$\delta = \frac{\bar{\gamma}_{\text{Q}}^{\max}}{\bar{\varepsilon}_{\text{H}}^{\max}} = \frac{0,049}{19,1} = 0,0025.$$

С учетом полученных величин относительных параметров нагружения рассчитан относительный изгибающий момент, относительный крутящий момент, а также относительные силы:

$$\bar{M}_n = 0,992; \quad \bar{M}_k = 0,125; \quad \bar{N} = 0,005; \quad \bar{Q} = 0,006;$$

Относительные силы имеют небольшую долю, поэтому из уравнения (3.9) следует:

$$Q_{III} = \frac{M_k}{R[(\sin\alpha + \cos\alpha - 1)\sin\varphi + \sin\alpha(\cos\varphi - 1)]}.$$

$$\text{Так как } \bar{M}_k = \frac{M_k}{M^*}; \quad M_k^* = \frac{\pi \cdot d^3 \tau_s}{12}; \quad \tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}},$$

то подставляя конкретные значения геометрических и прочностных параметров, получим:

$$Q_{III} = \frac{M_k}{[(\sin\alpha + \cos\alpha - 1)\sin\varphi + \sin\alpha(\cos\varphi - 1)]} = \frac{108M_k}{F(\alpha)} \quad (3.10)$$

Сила шагообразования будет иметь минимальное значение при угле $\varphi = \rho = 10^\circ$ (рисунок 3.4).

Исходя из этого, найдем угол α :

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\sin\rho + \cos\rho - 1}{\sin\rho} = -0,915^\circ; \quad \alpha_1 = -42,5^\circ; \quad \alpha_2 = 222,5^\circ$$

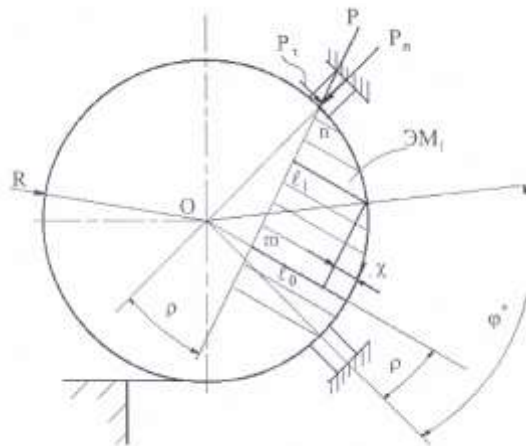


Рисунок 3.4. К определению зависимости изгибающего момента от угла

$$\varphi = \varphi^*$$

Найдем $M_1 = f(\varphi^*, \rho)$. Для этого составим уравнения (рисунок 3.4):

$$l_0 = R(1 - \sin \rho); M_1 = \frac{l_0 - \chi}{l_0} M^{\max}$$

$$\chi = R - R \cos(\varphi^* - \rho) = R[1 - \cos(\varphi^* - \rho)]$$

Окончательно получим:

$$M_1 = \frac{\cos(\varphi - \rho) - \sin \rho}{1 - \sin \rho} M_1^{\max} \quad (3.11)$$

При $\bar{\varepsilon}_n^{\max} = 19,1$ согласно работе [76]:

$$M_{II} = \frac{2M_S}{3\pi} \left\{ 3 \frac{\chi}{\chi_S} \arcsin \frac{\chi_S}{\chi} + \left[S - 2 \frac{\chi_S}{\chi} \right] \sqrt{1 - \left(\frac{\chi_S}{\chi} \right)^2} \right\} \quad (3.12)$$

С учетом того, что

$$M_S = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \sigma_S; \quad \frac{\chi}{\chi_S} = \bar{\varepsilon}_n^{\max},$$

или

$$\bar{M}_{II} = \frac{1}{8} \left\{ 3 \bar{\varepsilon}_n^{\max} \cdot \arcsin \frac{1}{\bar{\varepsilon}_n^{\max}} + \left[5 - \frac{2}{\left(\bar{\varepsilon}_n^{\max} \right)^2} \right] \sqrt{1 - \frac{1}{\left(\bar{\varepsilon}_n^{\max} \right)^2}} \right\} \quad (3.13)$$

Если $\bar{\varepsilon}_n^{\max} = 19,1$, то $\bar{M}_{II} = 0,993$

При $\rho = 10^\circ$ можно записать (рисунок 3.4), что:

$$\bar{M}_1 = 0,993 \frac{\cos(\varphi - \rho) - \sin \rho}{1 - \sin \rho} = 0,993 \frac{\cos(\varphi - 10^\circ) - 0,1736}{0,8264} \quad (3.11')$$

Относительный момент \bar{M}_K рассчитаем следующим образом:

$$\bar{M}_K = \sqrt{1 - \bar{M}_{II}^2} \quad (3.14)$$

Силу Q_{III} рассчитаем по (3.9)

Расчетные значения Q_{III} показаны на рисунке 3.5 и табл. 8.

График изменения силы Q_{III} при разных α приведен на рисунке 3.6.

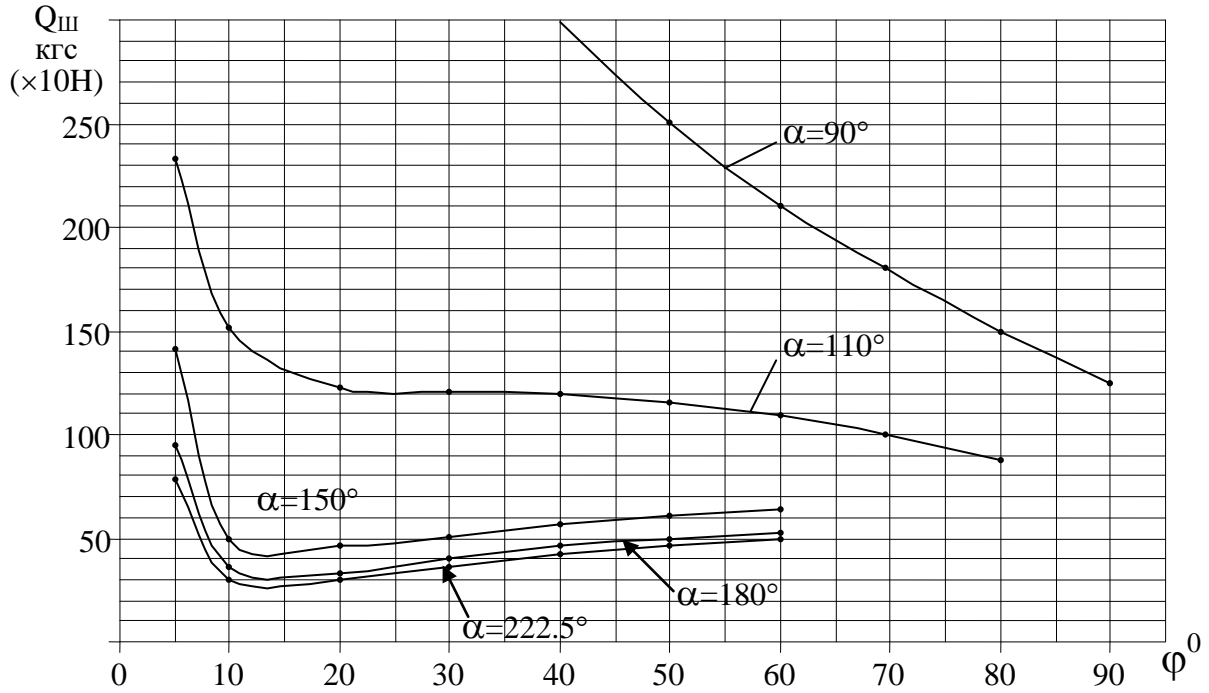


Рисунок 3.5. Расчетные значения Q_{III}

Опытным путем с помощью динамометра системы Токаря измеряли силы формообразования шага, которые показали хорошее совпадение с расчетными величинами.

Таблица 8

Результаты расчета силы шагообразования

φ^0	$\sin\varphi$	$\cos\varphi$	\bar{M}_u	\bar{M}_K	Q_{III} (x10 H)				
					α				
					90°	110°	150°	180°	222,5°
5	0,0872	0,988	0,988	0,155	849	238	141	95,9	80
10	0,173	0,985	0,993	0,118	483	152	52	36,8	31,5
20	0,342	0,9397	0,975	0,221	300	122	48	35	31,2
30	0,5	0,866	0,927	0,374	252	121	53,8	40,4	36,7
40	0,643	0,766	0,837	0,547	210	119	54,9	45,9	44
50	0,766	0,643	0,717	0,697	179	115	61,5	49,1	48
60	0,866	0,5	0,564	0,829	151	110	62,6	51,7	50
70	0,92	0,342	0,392	0,92	125	-	-	-	-
80	0,985	0,173	0,202	0,959	108	-	-	-	-

В момент замеров с помощью маховичка привода подачи поддерживался изгибающий момент M^{\max} , т.е. упругая разгрузка не допускалась.

Сравнивая расчетные и экспериментальные данные, приходим к заключению:

1. При $\alpha_{\text{опт}} = 222,5^\circ$ имеет место минимальная сила $Q_{\text{ш}} = 250$ Н.
2. Допускается использование значений α в области от 150° до 270° .
3. В случае формирования шага специальной «лапкой» при $\alpha = 90^\circ$ требуется большая сила 1080 Н, что отрицательно влияет на повреждение поверхности проволоки при формообразовании витка пружины.

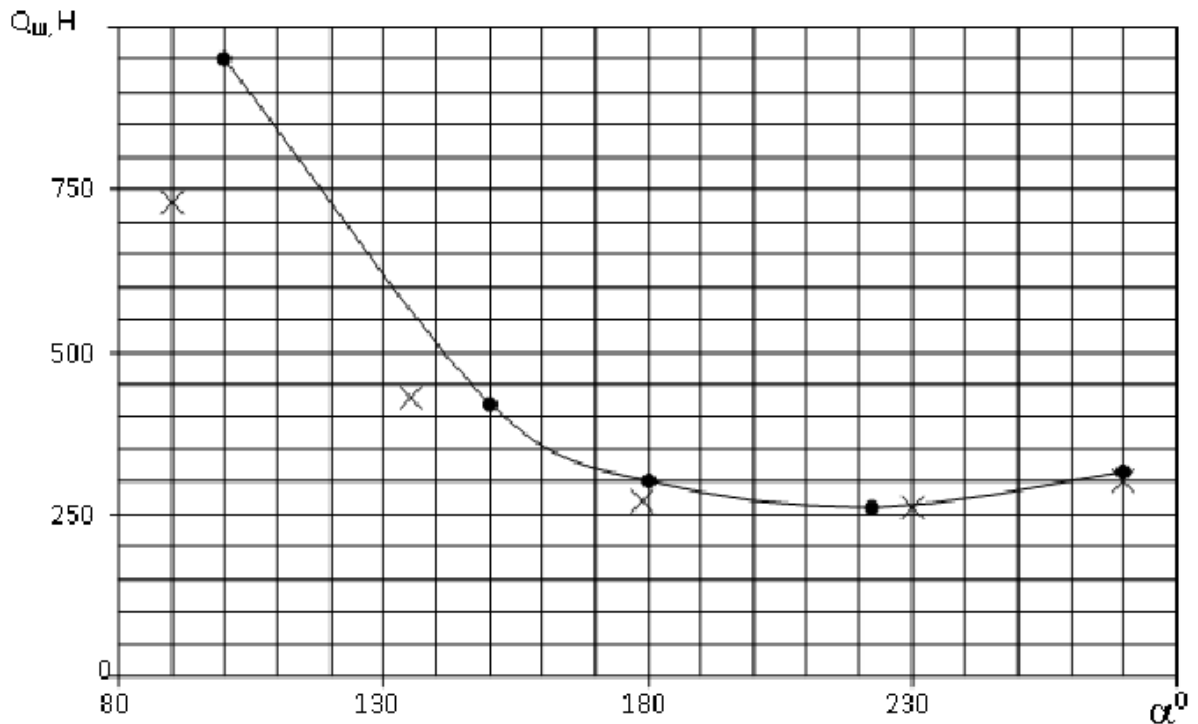


Рисунок 3.6. График зависимости $Q_{\text{ш}}$ от α :

- расчетные точки;
- × - экспериментальные точки.

Особенно вероятно появления ризок при новом непритертом инструменте.

3.3. Отклонения геометрических размеров и силовых параметров пружин сжатия при изготовлении

Соблюдение заданных технологических допусков на высоту пружин при их изготовлении напрямую влияет на обеспечение предельных отклонений силовых характеристик P_1 и P_2 [180].

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 [90, 71, 79].

При изготовлении пружин возникает разброс размеров высоты на каждой технологической операции (рисунки 3.7 и 3.8).

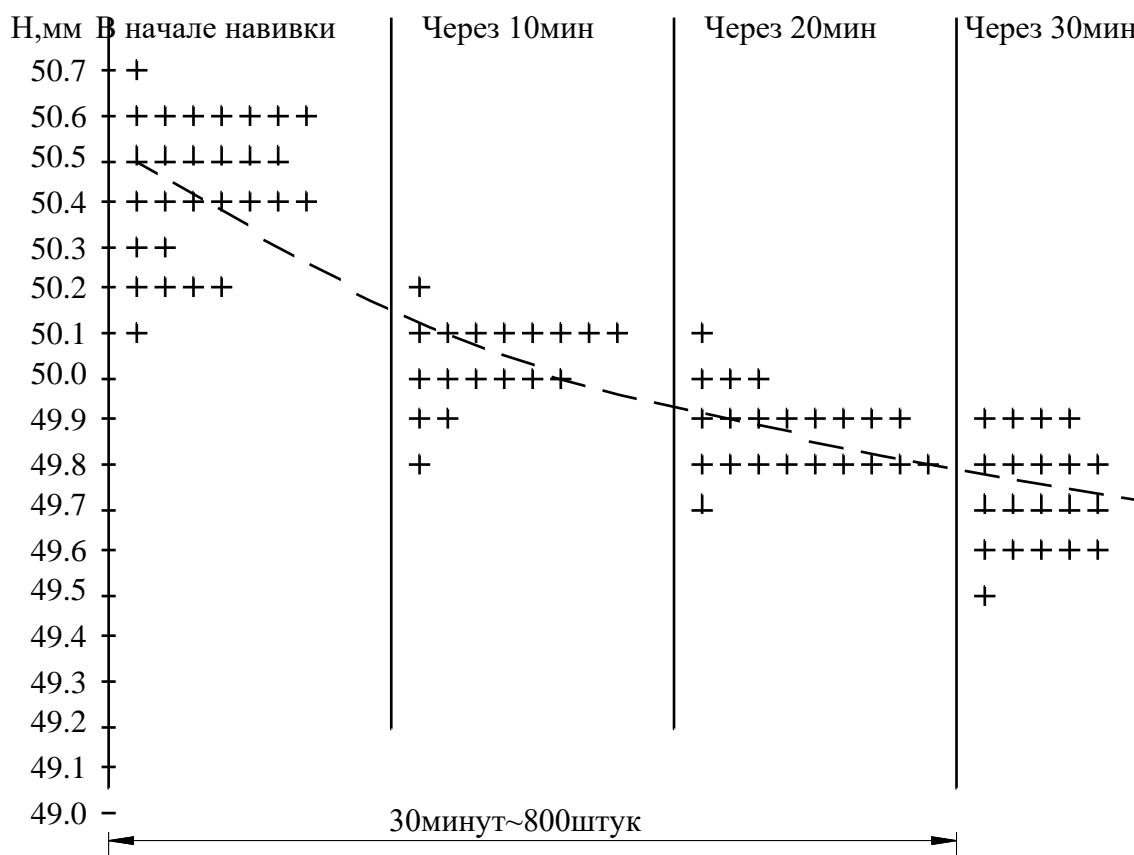


Рисунок.3.7. Рассеивание размера высоты

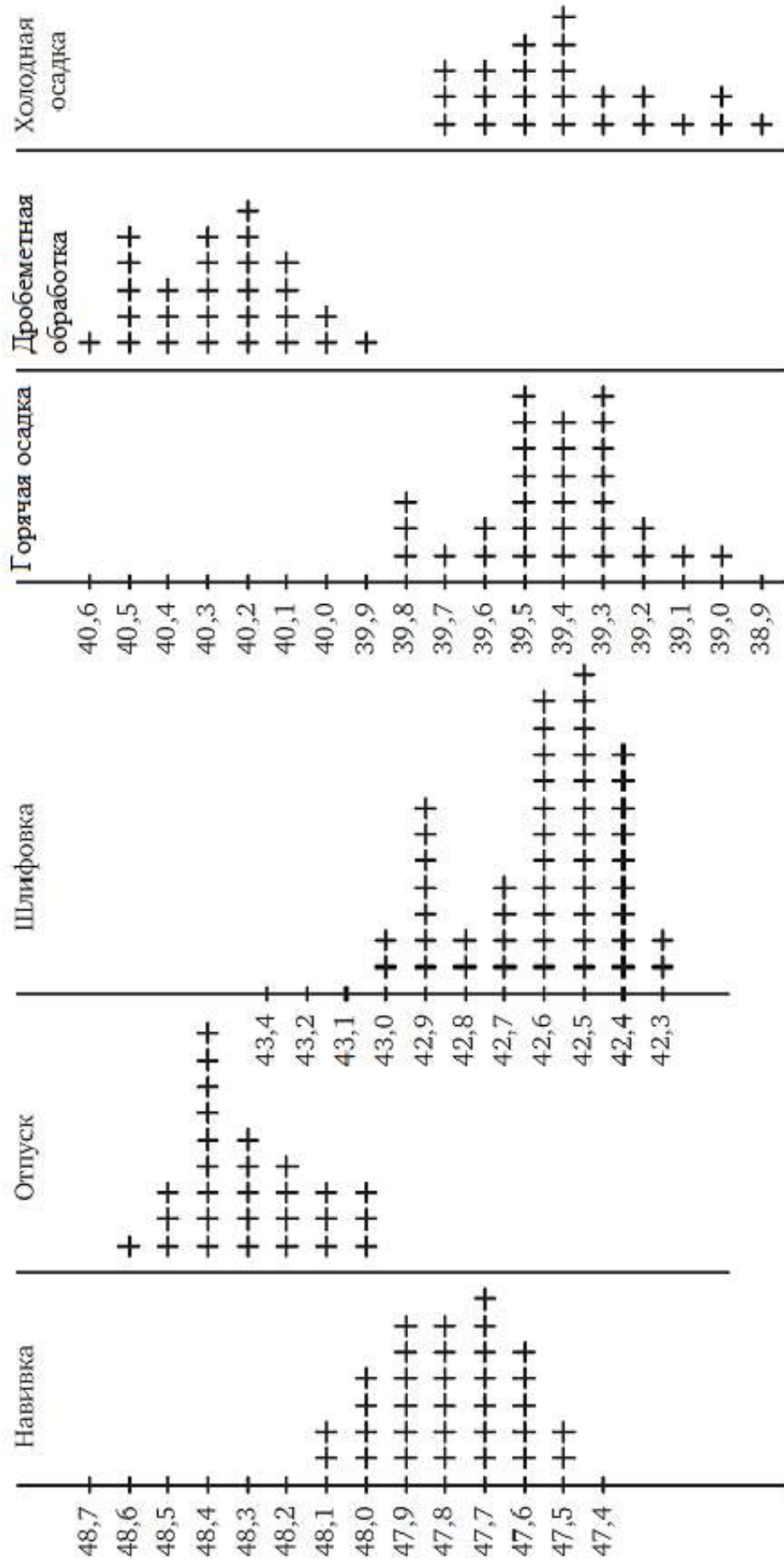


Рисунок 3.8. Рассеивание и изменение высоты пружины при изготовлении

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 выполнения силовых характеристик пружин (рисунок 3.9).

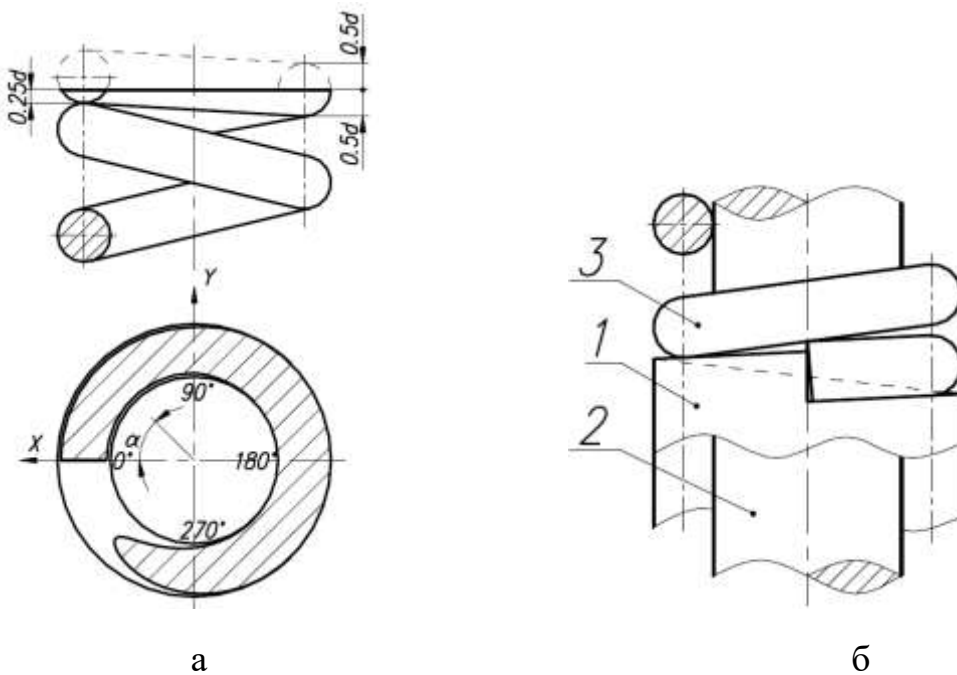


Рисунок 3.9. Влияние формы крайнего опорного витка на геометрическую точность: а – требования к размерам опорного витка; б - контроль формообразования опорных витков с помощью специального калибра

В соответствии с требованиями по геометрической точности высококонагруженных пружин сжатия, установленных в конструкторской

документации, например, в нормалях 9.01.344, для пружин клапана двигателей внутреннего сгорания непараллельность торцевой плоскости и перпендикулярность к образующей пружины должны быть 0,6мм 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 H_0 (~1° 9')

II группа точности....0,04 H_0 (~2° 17')

III группа точности...0,08 H_0 (~ 4° 34')

Исследование расположения данных отклонений при разных углах α (рисунок 3.9, а) подтвердил причину возникновения этих отклонений из-за неравномерности оформления крайних витков. У неправильно сформированного опорного витка вплоть до точки поджатия идет неплавно, неравномерно. 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 (рисунок 3.9,б).

Это позволило полностью исключить несправимый брак по геометрической точности пружин клапана ВАЗ.

3.4. Выводы

1. Установлено, что при осевой или перерезывающей силы имеющую величину более 10% от предельного значения, влияние силы на соотношение

изгибающего и крутящего моментов становится заметным и это необходимо учитывать при расчете круглого стержня на несущую способность.

2. Сила шагообразования $Q_{ш} = 250$ Н является наименьшей при $\alpha_{опт} = 222,5^\circ$. При этом допускается использование значений α в области от 150° до 270° .

3. Главной причиной непараллельности торцевых плоскостей и их неперпендикулярности к образующей пружины является неравномерный угол подъема опорных витков при навивке. Предложена новая конструкция контрольного приспособления, значительно повышающая точность настройки кулачков шагообразования автомата.

Глава 4. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПЕРАЦИЙ УПРОЧНЕНИЯ ПРУЖИН С ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

4.1. Общие сведения

Высоконагруженные пружины сжатия двигателей внутреннего сгорания должны иметь высокое сопротивление усталости. Особенно это касается шестнадцатиклапанных двигателей, в которых применены четырёхклапанные цилиндры. Но в каждом клапане установлены по одной пружине, что существенно уменьшает надёжность работы клапанов. Поломка пружины может вызвать поломку всего двигателя. А поломка одной из двух пружин в клапане классического типа не разрушает двигатель, он может ещё некоторое время работать в аварийном режиме.

При изготовлении пружины проходят три упрочняющие операции: термоосадку при температуре 380 °С, дробемётный наклёп и трёхкратную холодную осадку (перед сортировкой). Особенность технологии состоит в том, что дробемётная обработка снижает эффект от термоосадки и наоборот (если изменить их последовательность). При этом суммарный упрочняющий эффект от использования этих двух и даже трёх технологических операций выше, чем от каждой операции в отдельности. Методик по расчёту напряжённо-деформированного состояния и влияния на него параметров двойного и тройного упрочнения в известной нам литературе нет. Данная глава посвящена разработке математической модели упрочнения высоконагруженных пружин.

4.2. Построение диаграммы деформирования по испытаниям пружины на сжатие в пластической области

Точность диаграммы сдвига τ - γ влияет на точность расчетов силовых характеристик пружин [31, 71, 181]. Диаграмма (нагрузка-осадка) зависит от диаграммы сдвига τ - γ по формуле Людвига [61]. Итоговая формула, связывающая τ и γ имеет вид:

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

где $\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_s}$; $\bar{\gamma} = \frac{\gamma}{\gamma_s}$; γ_s - сдвиговые деформации, соответствующие началу

пластических деформаций;

$\bar{P}^* = \frac{P^*}{P_s}$ - один из коэффициентов аппроксимации диаграммы P - λ кривой второго порядка;

Предел прочности на разрыв проволоки 70ХГФА-Ш составляет $\sigma_B = 164 \dots 178$ кг/мм². Принимаем за среднее значение $\sigma_B = 170$ кг/мм² (~1700 Мпа). Тогда $\tau_s = k_1 \sigma_B$, где $k_1 = 0,524$ - один из коэффициентов аппроксимации диаграммы P - λ ; $\tau_s = 0,524 \cdot 170 = 89$ кг/мм²; $\gamma_s = \frac{\tau_s}{G} = \frac{89}{0,807 \cdot 10^4} = 0,011$. Точка S -конец упругого участка.

Второй номинальный коэффициент для стали 70ХГФА-Ш $\bar{P}^* = \frac{P^*}{P_s} = 1,392 \approx 1,4$. При сдвиговых деформациях $G = \frac{P}{\sqrt{3}} = 87,7$.

Если $\Delta\gamma = 0,01$, то $\Delta\tau = \Delta\gamma \cdot G = 0,01 \cdot 87,7 = 0,87$ кгс/мм².

Таким образом, определены координаты третьей точки «С» ($\gamma = 0,0265$, $\tau = 100,5$), но при расчетах методом конечных элементов его будем учитывать.

$$\tau_s^{400} = \tau_s \cdot K_\tau = 89 \cdot 0,814 = 72,5;$$

$$G^{400} = G \cdot K_G = 0,807 \cdot 10^4 \cdot 0,909 = 0,734 \cdot 10^4;$$

$$\gamma_s^{400} = \frac{\tau_s^{400}}{G^{400}} = \frac{72,5}{0,734 \cdot 10^4} = 0,00988.$$

На рисунке 4.1 представлена диаграмме сдвига $\tau = F(\gamma)$ для $T = 400^\circ\text{C}$ и для $T=20^\circ\text{C}$ при разгрузке.

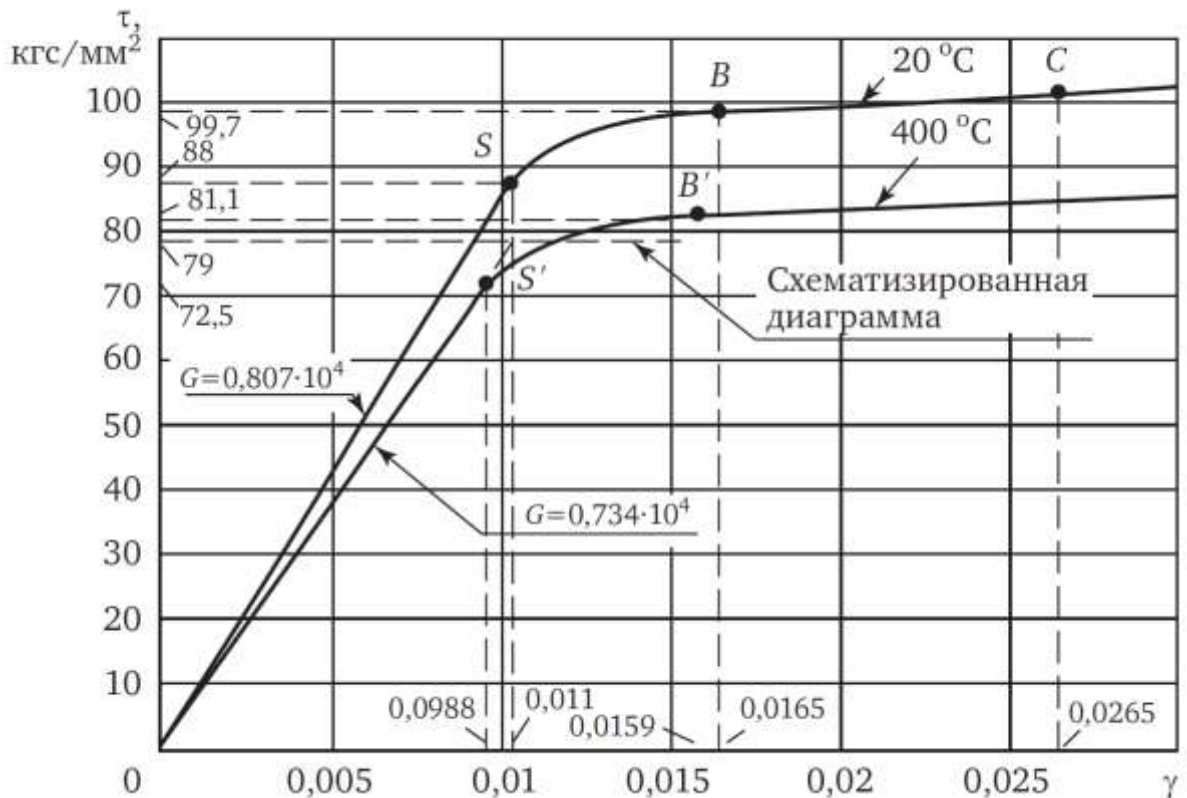


Рисунок 4.1. Диаграммы деформирования при $T=20^\circ\text{C}$ и при $T=400^\circ\text{C}$

4.3. Напряжения при холодной осадке пружины в пластической области

Примем следующие начальные условия:

- диаграмма сдвига принята как для тела с линейным упрочнением;
- поперечные сечения витка пружины не искажаются;

С увеличением глубины заневоливания сначала начинается пластическая деформация на внутренних волокнах витка. Этому значению соответствует $A_0 \approx \frac{1}{c-1}$.

Дуга эллипса замкнется в сечении витка при параметре $A_1 \approx \frac{1}{c+1}$.

В нашем случае $A_0 = \frac{1}{c-1} = \frac{1}{6,16-1} = 0,193$; $A_1 = \frac{1}{6,16+1} = 0,139$.

Параметр A , реализованный при горячей осадке пружин 2112-1007020:

$$A \approx \frac{2\pi R n \tau_s}{G \lambda_3} = \frac{2\pi \cdot 11,1 \cdot 3,95 \cdot 79}{0,734 \cdot 10^4 \cdot 26} = 0,114 < A_1,$$

т.е. в нашем случае весь периметр сечения находится в пластической области. При ещё более глубоком заневоливании эллипс, ограничивающий упругую часть сечения, уменьшается и приближается к окружности и величина эксцентриситета $\varepsilon \rightarrow 0$.

Расчет величин α и ε можно провести только методом подбора.

Величина эксцентриситета ε для упрочняемых пластической осадкой пружин лежит в пределах от 0,25 τ/c до 0,66 τ/c . Эта величина достаточно малая, в расчетах слагаемые с этой величиной малы.

Если принять $\varepsilon \approx 0,3$, тогда:

$$\frac{\tau}{c} = 0,3 \cdot \frac{1,8}{6,16} = 0,08 \text{ мм}$$

Полуось эллипса:

$$a = \frac{A(R + \varepsilon)}{1 - A^2} = \frac{0,114(11,1 + 0,08)}{1 - 0,114^2} = 1,29 \text{ мм.}$$

и эксцентриситет:

$$\varepsilon = \frac{8 - 5(1 - 5A^2) \cdot \frac{\alpha^3}{\tau^3}}{12c} \tau = \frac{8 - 5(1 - 5 \cdot 0,114^2) \cdot \left(\frac{1,29}{1,8}\right)^3}{12 \cdot 6,16} = 0,084 \text{ мм.}$$

Учитывая, что влияние изменения значения эксцентриситета ε и полуоси a при расчете нагрузок и напряжений незначительно можно считать, что $\varepsilon=0,082$. в приближенных расчетах можно полагать $\varepsilon \approx 0$.

Нагрузку P_3 также можно определить по формуле, без учета модуля упругости.

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

$$= \frac{2\pi \cdot 79}{3(11,1+0,082)} \cdot 1,8^3 \cdot \left[1 - \frac{(1-6 \cdot 0,114^2)}{4} \cdot \left(\frac{1,29}{1,8}\right)^3 \right] = 78,9 \text{ кгс} = 789 \text{ МПа.}$$

Максимальные напряжения:

$$\tau_{\text{ост}}^{\text{max}} = \tau_s - \frac{P_3 R^2 r}{J_p} \cdot \frac{\left(1 + \frac{r}{4R}\right)}{(R-r)} = 79 - \frac{78,9 \cdot 11,1^2 \cdot 1,8 \cdot \left(1 - \frac{1,8}{4 \cdot 11,1}\right)}{16,4 \cdot (11,1+1,8)} =$$

$$= 79 - 119,3 = -40,3 \text{ кгс/мм}^2$$

$$\tau_{\text{ост}}^{\text{max}} = \tau_s - \frac{P_3 R^2 r}{J_p} \cdot \frac{\left(1 + \frac{r}{4R}\right)}{(R-r)} = 79 - \frac{78,9 \cdot 11,1^2 \cdot 1,8 \cdot \left(1 - \frac{1,8}{4 \cdot 11,1}\right)}{16,4 \cdot (11,1+1,8)} =$$

$$= 79 - 119,3 = -40,3 \text{ кгс/мм}^2$$

$$\text{где } J_p = \frac{\pi r^4}{2} = \frac{\pi \cdot 1,8^4}{2} = 16,4 \text{ мм}^4 - .$$

Минимальные напряжения:

$$\tau_{\text{ост}}^{\text{min}} = \tau_s - \frac{P_3 R^2 r}{J_p} \cdot \frac{\left(1 - \frac{r}{4R}\right)}{(R+r)} = 79 - \frac{78,9 \cdot 11,1^2 \cdot 1,8 \cdot \left(1 - \frac{1,8}{4 \cdot 11,1}\right)}{16,4 \cdot (11,1+1,8)} =$$

$$= 79 - 79,3 = -0,3 \text{ кгс/мм}^2$$

Появляется возможность определить истинные касательные напряжения на внутреннем волокне при рабочей нагрузке $P_2 = 56,1$ кгс.

$$\begin{aligned}\tau_2' &= \tau_T + \frac{(P_2 - P_3) \cdot R^2 r}{J_p (R - r)} \cdot \left(1 + \frac{r}{4R}\right) = 79 + \frac{(56,1 - 78,9) \cdot 11,1^2 \cdot 1,8}{16,4 \cdot (11,1 - 1,8)} \cdot \left(1 + \frac{1,8}{4 \cdot 11,1}\right) = \\ &= 79 - 34,4 = 44,6 \text{ кгс/мм}^2 = 446 \text{ МПа}\end{aligned}$$

Таким образом при испытании с отнулевым циклом нагружения ($P_1=0$; $P_2=56,1$ кгс) напряжения в опасной точке составляет от $40,3$ кгс/мм² до $44,6$ кгс/мм². Это почти симметричный цикл нагружения! Размах изменения напряжений составит $\tau = (\tau_2 - \tau_{ост}) = 44,6 - (-40,3) = 84,9$ кгс/мм². При работе в двигателе напряжения предварительного поджатия составят $\tau_2' = (\tau_1 + \tau_{ост}) = 37,5 + (-40,3) = -2,8$ кгс/мм², а максимальные напряжения при рабочей нагрузке P_2 $\tau_2' = (\tau_2 + \tau_{ост}) = 84,7 + (-40,3) = 44,4$ кгс/мм². При этом размах изменений $\tau = 44,4 - (-2,8) = 47,2$ кгс/мм² = 472 МПа.

Данные расчеты по известной методике [27] не учитывают влияния последующего дробемётного наклёпа и холодной трёхкратной осадки.

4.4. Определение напряжённо-деформированного состояния (НДС) в сечении витка при горячей осадке пружины

Приведённый выше расчет остаточных касательных напряжений после горячей осадки (термоосадки) с учётом кривизны и перерезывающей силы оказался достаточно сложным. И самое главное в такой сложной постановке нет замкнутого решения по отысканию параметров ε и α . При таком подходе, учитывающем незначительные факторы, невозможно учесть влияние последующих не менее сложных процессов упрочнения (дробемётный наклёп и холодную осадку). Поэтому необходимо упростить первую задачу, пренебечь при горячей осадке влиянием смещения упругой области.

4.4.1. Расчетные соотношения при кручении стержня большой кривизны

Особенностью расчета является необходимость учета кривизны стержня, работающего на кручение.

Влияние кривизны стержня сводится к учёту непараллельности смежных сечений стержня и, следовательно, неоднородности деформаций сдвига на окружности данного радиуса. Деформация сдвига оказывается тем больше, чем короче соответствующая образующая элементарного цилиндра (рисунок 4.3).

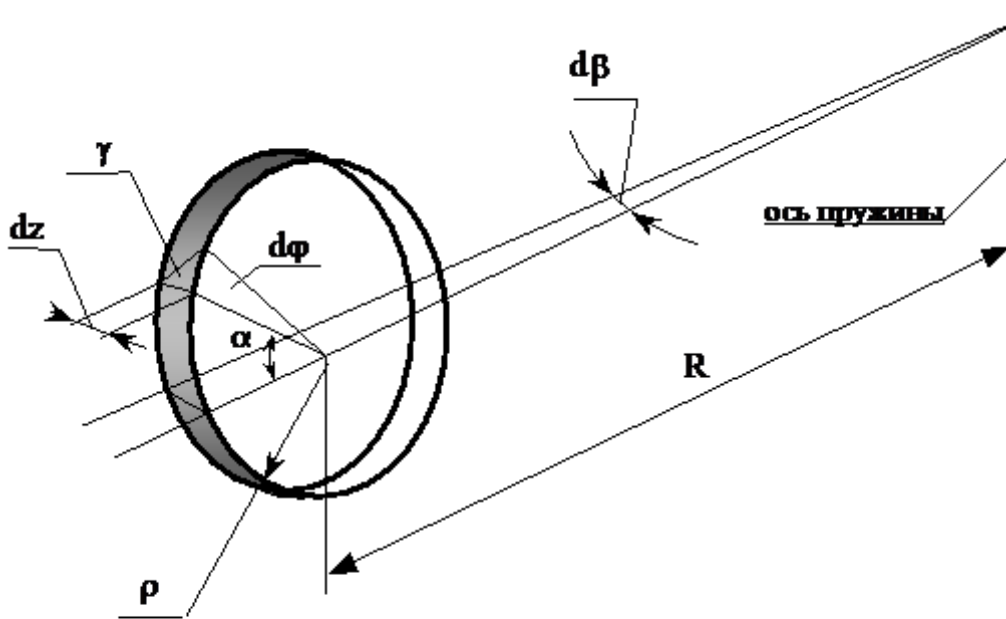


Рисунок 4.3. К выводу расчетных формул

Из рисунка 4.3. имеем:

$$\gamma dz = \rho d\varphi; dz = (R + \rho \cdot \cos \alpha) d\beta; d\beta = \frac{dz_0}{R} \quad (4.1.)$$

Отсюда:

$$\gamma = \rho \frac{d\varphi}{dz} = R\rho \frac{d\varphi}{(R + \rho \cdot \cos \alpha) \cdot dz_0} \quad (4.2.)$$

В формулах (4.1) и (4.2) введены следующие обозначения:

γ - деформация сдвига; $d\varphi$ - угол поворота сечения; R - радиус витка пружины; ρ , α - полярные координаты расчётной точки; dz_0 – длина элемента стержня.

Введя обозначение $\theta = d\varphi/dz_0$ – относительный угол поворота, получим выражение для деформации сдвига в расчётной точке $\{\rho, \alpha\}$:

$$\gamma = R \frac{\theta}{R + \rho \cdot \cos \alpha} \cdot \rho \quad (4.3.)$$

Напряжение при упругой работе материала ($\tau = G\gamma$) определяется соотношением:

$$\tau = \frac{GR\theta}{R + \rho \cdot \cos \alpha} \cdot \rho \quad (4.4)$$

Крутящий момент в сечении

$$T = \int_s \tau \rho dS = GR\theta W^* \quad (4.5)$$

Относительный угол поворота

$$\theta = \frac{T}{GRW^*} \quad (4.6)$$

Касательные напряжения в сечении распределены по закону

$$\tau = \frac{T\rho}{(R + \rho \cdot \cos \alpha) \cdot W^*} \quad (4.7)$$

В формулах (4.5), (4.6) и (4.7) обозначено

$$W^* = \int_0^r \int_0^{2\pi} \frac{\rho^3 d\rho \cdot d\alpha}{R + \rho \cdot \cos \alpha} \quad (4.8)$$

Величина W^* является геометрической характеристикой сечения и по размерности соответствует полярному моменту сопротивления круга. Для вычисления перемещений аналогично можно получить (вывод опущен) геометрический фактор жёсткости для стержня большой кривизны

$$I^* = R W^* . \quad (4.9)$$

Осадка пружины при крутящем моменте $T = PR$ (P - внешняя нагрузка):

$$\lambda = \frac{2\pi R^2 T}{GI^*} n,$$

где n - число витков пружины.

Или, заменив T по формуле (4.5), получим связь λ и θ :

$$\lambda = 2\pi R^2 n \theta; \quad (4.10)$$

4.4.2. Определение поля остаточных касательных напряжений

Для выполнения расчетов проведено разбиение сечения пружины по радиусу на 60 частей и углу на 40 частей. По радиусу пробегаем значения от $R/60$ до R , по углу от $2\pi/40$ до 2π . Порядок отсчета угла α при построении разбиения как на рис. 4.3. В результате расчет проводится для 2400 элементов разбиения (расчетных точек). Для каждого из них вычисляется координата по углу, средний радиус, площадь.

Все расчеты, включая описанные далее в работе, реализованы в пакете MathCAD 7.0.

В процессе горячей осадки при $T=400$ °С) пружина сжимается до смыкания витков. Принято $\lambda=26$ мм.

Осадка λ и относительный угол θ закручивания связаны выражением (4.10), а деформации сдвига при известном θ определяются по формуле (4.3) касательные напряжения τ определяются при нагружении по заданной диаграмме сдвига $\tau = F(\gamma)$ для $T = 400$ °С (рисунок 4.1) и для $T=20$ °С при разгрузке.

Крутящий момент при термоосадке найден из выражения (4.5). Считая разгрузку упругой, находим размах напряжений при снятии нагрузки по

формуле (4.7). Остаточные напряжения после горячей осадки определим суммированием напряжений при нагружении и при разгрузке (таблицу 9).

Таблица 9

Расчетные величины осадки, высоты пружины и остаточных напряжений после горячей осадки

Величина осадки при смыкании витков λ , мм	Уменьшение высоты пружины при горячей осадке $\lambda_{\text{ост}}$, мм	Максимальное напряжение $\tau_{\text{max}}^{\text{ост}}$, кгс/мм ²
26	4,1	35,8

Расчетом установлены величины максимальных остаточных напряжений на поверхности пружины. На рисунке 4.4 показаны касательные напряжения в сечении. На рисунке 4.5 схематически показаны напряжения.

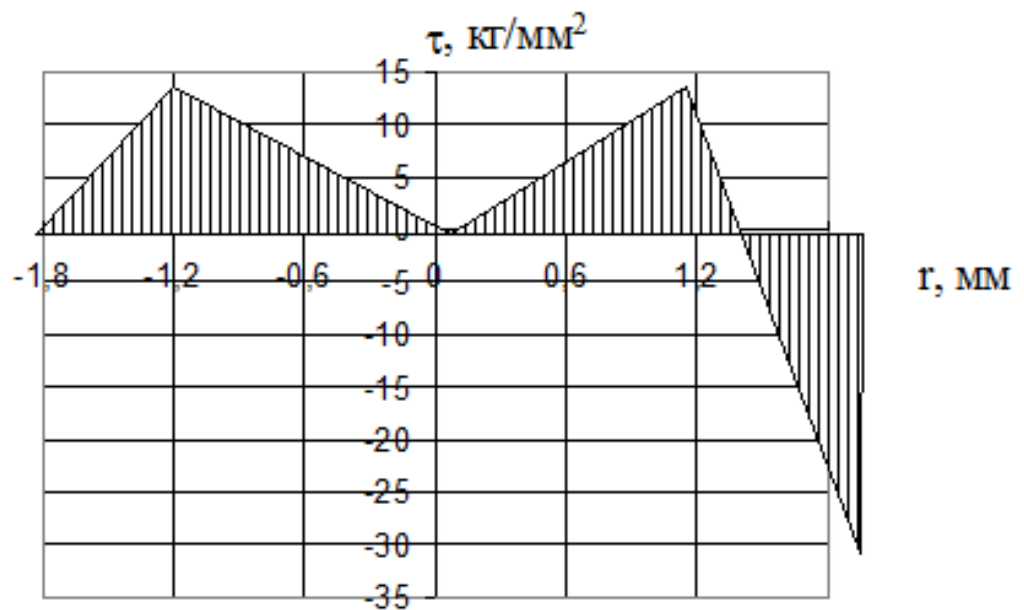


Рисунок 4.4. Остаточные касательные напряжения после горячей осадки на горизонтальном диаметре сечения витка (ось пружины справа)

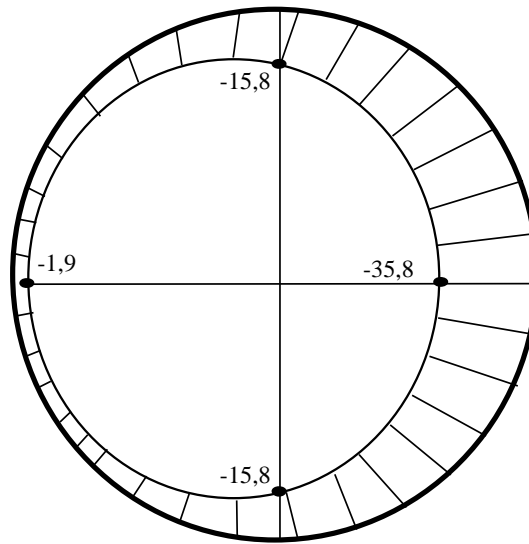


Рисунок 4.5. Остаточные касательные напряжения после горячей осадки на поверхности пружины (ось пружины справа)

4.5. Расчет кинетики деформирования при дробемётной обработке

Выполнить прямой расчёт напряженно-деформированного состояния пружины по конечному состоянию поля внедренной пластической деформации было бы ошибкой. В процессе дробемётной обработки происходит постепенное накопление линейной пластической деформации, которая, воздействуя на касательные напряжения, полученные при термоосадке, постепенно их уменьшает. Строго говоря, наличие остаточных касательных напряжений также влияет на величину внедрённой пластической деформации, т.к. в предварительно нагруженном теле состояние пластического течения наступит при меньших напряжениях, чем в ненагруженном. Будем, однако, пренебрегать этим обстоятельством в целях упрощения расчёта.

Важно отметить при этом, что расчёт процесса дробемётной обработки следует вести последовательными шагами, учитывая изменение НДС в предыдущем расчёте. Такой метод расчёта принято называть расчётом кинетики напряжённо-деформированного состояния.

В качестве исходных данных для расчёта используем поле остаточных деформаций сдвига и поле остаточных пластических деформаций сдвига, полученных при расчёте процесса термоосадки. Кроме того, нам понадобится поле внедренной пластической деформации от дробемёта, которое найдем при травлении образца-свидетеля - тонкой контрольной пластинки, которая помещается в дробемётную камеру вместе с партией пружин.

В работе [86] приведены поля остаточных напряжений после дробемётной обработки для деталей из различных материалов при различной толщине наклёпанного слоя. Эти поля отвечают зависимости пластической деформации от глубины слоя, имеющий характер, приведенный на рисунке 4.6.

График для очень малой глубины нагартованного слоя проведён штриховой линией, так как в этой области затруднительно получить точные данные. Но можно сказать, что в этой области глубины δ порядка сотых долей миллиметра величина пластической деформации уменьшается по мере приближения к поверхности, а у самой поверхности образца может даже стать отрицательной.

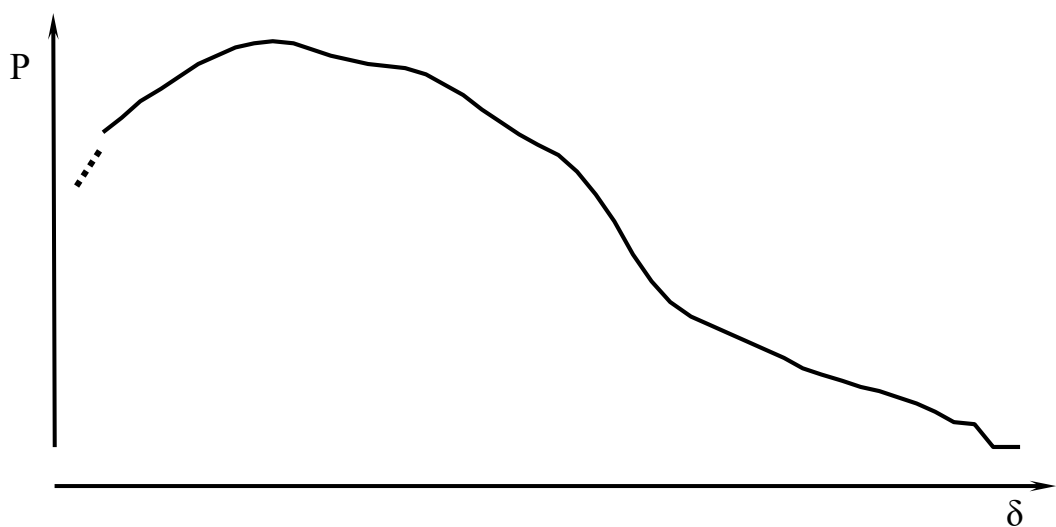


Рисунок 4.6. Характер зависимости пластической деформации от глубины наклёпанного слоя

4.5.1. Определение внедренной пластической деформации по контрольной пластинке

Контрольная пластинка, закреплённая на жёстком основании, подвергнутая дробемётной обработке с одной стороны, после освобождения изгибается. Радиус кривизны зависит от полученной пластической деформации, распределённой по глубине нагартованного слоя по некоторому закону.

Если снять некоторый слой металла (например, травлением в кислоте), то радиус кривизны увеличится, т.к. часть пластической деформации удалена вместе с материалом. Серия таких операций позволяет построить зависимость $\rho(t)$ (ρ - радиус кривизны, t - толщина пластинки).

На практике измеряют не радиус кривизны, что затруднительно, а стрелу прогиба h пластинки (рисунок 4.7) с помощью приспособления с индикатором часового типа.

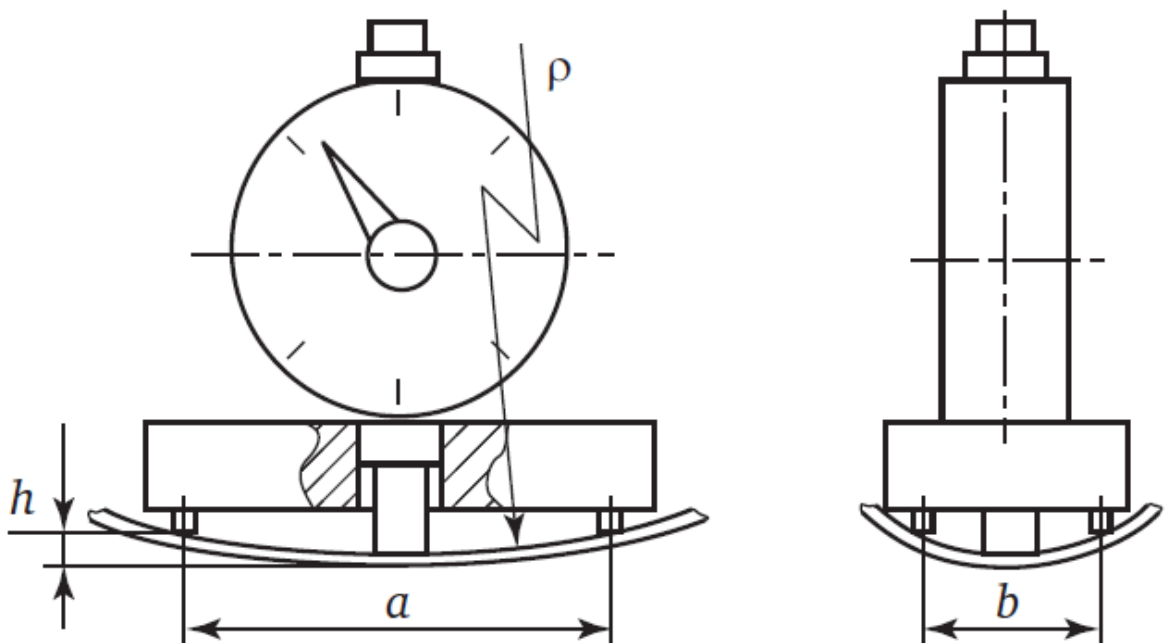


Рисунок 4.7. Замер стрелы прогиба контрольной пластины

Из геометрических построений можно определить зависимость между радиусом сферы ρ и прогибом пластины h :

$$2\rho \sin \left[\arccos \left(\frac{\rho - h}{\rho} \right) \right] = \sqrt{a^2 + b^2} = c,$$

где c – диагональ прямоугольника, образованного опорными точками приспособления.

Чтобы определить, как изменяется пластическая деформация по толщине наклёпанного слоя, составим матричную модель контрольной пластинки.

4.5.2. Матричная модель контрольной пластинки. Расчет поля пластической деформации

Представим пластинку в виде набора элементарных слоев, в пределах которых пластическая деформация считается постоянной [90]. Для пластинки запишем уравнение совместности деформации, уравнение равновесия и закон связи между напряжениями и деформациями.

Уравнение совместности (уравнение Коши) запишем, приняв гипотезу плоских сечений:

$$\varepsilon_i = \alpha y_i + \varepsilon_0 \quad (4.11)$$

где ε_i – деформация в i -ом слое;

$\alpha = 1/\rho$ – кривизна стержня;

y_i – координата i -го слоя;

ε_0 – деформация нейтрального слоя ($y=0$).

Соответствующее матричное уравнение имеет вид:

$$\varepsilon = Aq,$$

где q – матрица обобщенных перемещений;

ε - вектор-столбец деформаций в расчётных точках $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n]^T$

A – матрица Коши.

Матрица Коши имеет вид (Δ – удлинение пластинки):

$$q = \begin{vmatrix} x \\ \Delta \end{vmatrix} \quad (4.12)$$

С учетом (4.11) получим матрицу A :

$$A = \begin{vmatrix} y_1 & y_2 & \dots & y_n \\ 1/1 & 1/1 & \dots & 1/1 \end{vmatrix}^T \quad (4.13)$$

Матричное уравнение равновесие связывает внешние нагрузки с напряжениями:

$$Q = B\sigma \quad (4.14)$$

где $Q = \begin{vmatrix} M \\ N \end{vmatrix}$ - матрица обобщённых нагрузок, M – изгибающий момент,

N – нормальная сила. В свободной пластинке они равны нулю;

$\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n]^T$ - вектор-столбец напряжений в расчетных точках.

Матрицу B получим, используя принцип возможных перемещений.

$$B = A^T \cdot V \quad (4.15)$$

где $V = I \cdot V_i$ – матрица представительных объёмов;

I – единичная матрица размерностью ($n \times n$);

$V_i = b \cdot l \cdot t_i$ – объём i -го элементарного слоя пластинки;

$t_i = t/n$ – толщина элементарного слоя.

Наконец, матричное уравнение, связывающее напряжения и деформации, имеет вид:

$$\sigma = C(\varepsilon - p) \quad (4.16)$$

Где $p = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$ – вектор-столбец пластических деформаций.

Решая совместно (4.11), (4.14) и (4.16), получим:

$$Q = BSAq - BCp,$$

Или обозначив $K = BSA$ – матрица жёсткости, получим $Q = Kq - BCp$.

В нашем случае $Q = 0$, поэтому $Kq = BCp$.

Умножив слева на обратную матрицу K^{-1} ,

$$q = Dp, \quad D = K^{-1}BC \quad (4.17)$$

Матрица p представляет набор k из n элементов не являющихся нулями, остальные $n-k$ – нули:

$$p = [p_1, p_2, \dots, p_k, 0, 0, \dots, 0]^T \quad (4.18)$$

Напомним, что $q = [x, \Delta]^T$, тогда система уравнений (4.17) при усечении матрицы (4.18) до $\bar{p} = [p_k, 0, 0, \dots, 0]$ распадается на два уравнения:

$$\begin{aligned} p_k &= D \bar{x} \\ 0 &= D \Delta \end{aligned} \quad (4.19)$$

Из первого уравнения находим p_k , из второго – Δ . При известном p_k добавляем в матрицу \bar{p} новое неизвестное p_{k-1} и вновь решая систему типа (4.19) находим p_{k-1} . Повторяя решение (4.19) k раз, определяем все элементы матрицы p .

Теперь, используя полученную модель, построим поле внедренной пластической деформации.

Экспериментальные данные по травлению односторонне наклёпанных контрольных пластинок приведены в таблице 10 и на рисунке 4.8 [91]

Травление контрольных пластинок производили в концентрированной соляной кислоте при температуре $\approx 80^\circ\text{C}$. Пластинки периодически вынимались для контроля толщины с помощью микрометра.

Влияние твердости и толщины пластинки на изменение ее геометрии при травлении

HRC ₃ =46		HRC ₃ =41		HRC ₃ =37	
t	h	t	h	t	h
1,32	0,275	1,32	0,300	1,32	0,310
1,26	0,250	1,25	0,285	1,26	0,285
1,14	0,150	1,14	0,225	1,13	0,235
1,08	0,100	1,07	0,180	1,07	0,195
1,03	0,060	1,03	0,145	1,02	0,160
0,97	0,030	0,99	0,097	0,98	0,115
0,94	0,025	0,95	0,065	0,93	0,070
0,91	0,010	0,915	0,050	0,90	0,055
0,83	0,005	0,84	0,025	0,82	0,030

Маркировку пластин осуществляли с помощью медной проволоки. Продолжительность травления 2,5 часа. Если учесть, что при травлении снимается слой металла и при толщине 0,9 мм искривление пластинки исчезает, то толщина наклёпанного слоя составила:

$$\Delta_t = \frac{1,32 - 0,9}{2} = 0,21 \text{ мм.}$$

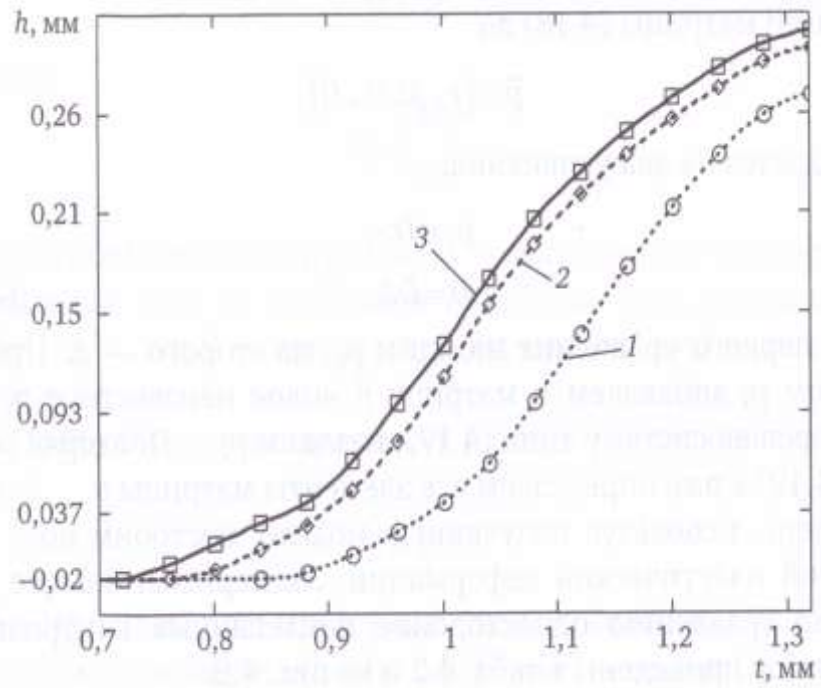


Рисунок 4.8. Зависимость прогиба пластины h от её толщины t при травлении h , мм в кислоте. 1- $HRC_3 = 46$; 2- $HRC_3 = 41$; 3- $HRC_3 = 37$.

Результаты расчета пластической деформации в контрольной пластинке приведены на рисунке 4.9.

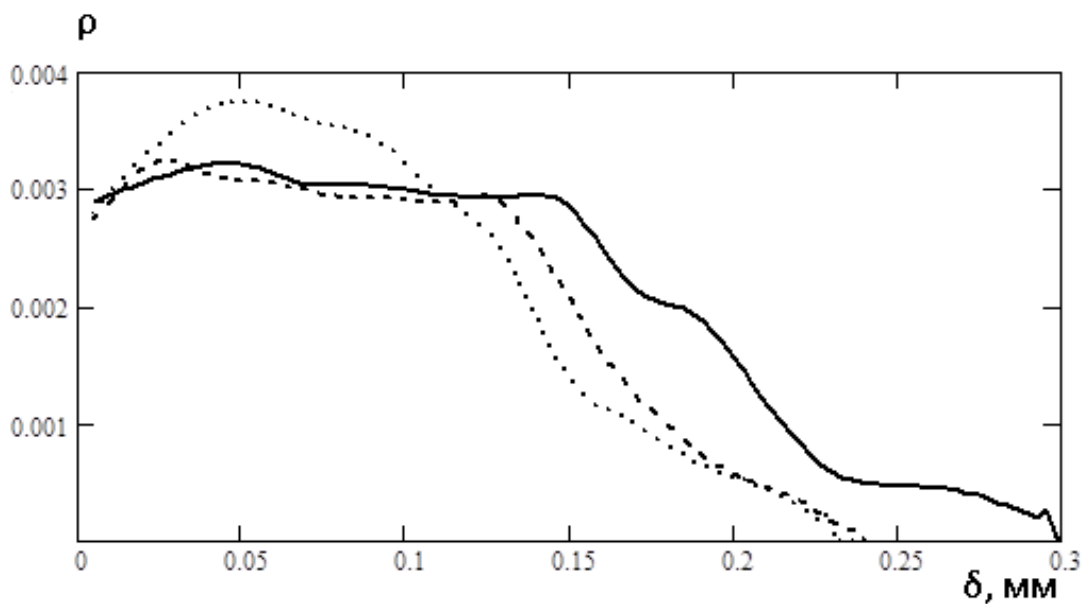


Рисунок 4.9. Расчетная зависимость пластической деформации от глубины наклёпанного слоя

4.5.3. Расчет нормальных напряжений элемента пружины

Для расчета поля нормальных напряжений построим матричную модель (без учета опорных витков). Разбиваем сечение пружины по радиусу (каждый длиной $L=2\pi \cdot R \cdot N$, N -количество витков), в пределах которых компоненты пластической деформации, деформации и напряжений постоянны.

Матрица обобщенных перемещений имеет вид ($n+1$ элемент):

$$q=(dr_1 \ dr_2 \ \dots \ dr_n \ dz)^T,$$

где dr_i – перемещение точки, находящейся на i -ом радиусе от центра сечения; dz – удлинение пружины вдоль оси проволоки.

Вектор-столбец деформаций в расчетных точках имеет вид (количество элементов $3 \cdot n \cdot m$)

$$\varepsilon = (\varepsilon_{z1} \ \varepsilon_{\phi_1} \ \varepsilon_{r1} \ \dots \ \varepsilon_{zk} \ \varepsilon_{\phi_k} \ \varepsilon_{rk})^T.$$

Запишем уравнение совместности деформации, уравнение равновесия и закон связи между напряжениями и деформациями.

Матрица Коши (ее размер $(3 \cdot n \cdot m) \times (n+1)$) связывает вектор-столбец деформаций с обобщенными перемещениями следующим образом (уравнение совместности деформации)

$$\varepsilon=Aq. \quad (4.20)$$

Для элемента разбиения, находящегося на i -ом радиусе, на j -ом углу в матрице Коши заполняются следующие элементы:

$$A_{3 \cdot j-2+3 \cdot (i-1) \cdot m, n+1} := \frac{1}{L} \quad A_{3 \cdot j-1+(i-1) \cdot 3 \cdot m, i} := \frac{1}{2 \cdot r_{cp_i}}$$

$$A_{3 \cdot j-1+(i-1) \cdot 3 \cdot m, i} := \frac{1}{2 \cdot r_{cp_i}} \quad A_{3 \cdot j+(i-1) \cdot 3 \cdot m, i} := \frac{1}{dr}$$

$$A_{3 \cdot j+(i-1) \cdot 3 \cdot m, i-1} := \frac{-1}{dr}$$

Матричное уравнение равновесия связывает внешние нагрузки с напряжениями:

$$Q=V\sigma. \quad (4.21)$$

Где Q – матрица обобщенных нагрузок ($n+1$ элемент). В нашем случае все ее элементы равны нулю;

$\sigma=(\sigma_{z1} \ \sigma_{\phi_1} \ \sigma_{\tau_1} \ \dots \ \sigma_{zk} \ \sigma_{\phi_k} \ \sigma_{\tau_k})^T$ - вектор-столбец напряжений в расчетных точках (количество элементов $3 \cdot n \cdot m$).

Матрицу V получим, используя принцип возможных перемещений (ее размер $(n+1) \cdot (3 \cdot n \cdot m)$):

$$V=A^T V.$$

Здесь V – матрица представительных объемов (ее размер $(3 \cdot n \cdot m) \cdot (3 \cdot n \cdot m)$). Для каждого элемента разбиение в матрице V заполняется по три диагональных элемента. А именно, записывается величина объема данного элемента разбиения $V_k = s_k \cdot L \cdot 2\pi / m$. Недиагональные элементы матрицы V равны нулю.

Матричное уравнение, связывающее упругие напряжения и деформации для любого элемента разбиения, задается обобщенным законом Гука.

Матрица упругости C (ее размер $(3 \cdot n \cdot m) \cdot (3 \cdot n \cdot m)$) представляет собой блочную матрицу. По диагонали строят блоки 3×3 , имеющие одинаковый вид, остальные элементы нули. Блок выглядит следующим образом:

$$C_{\text{blok}} := \begin{bmatrix} (1 - \mu) \cdot E1 & \mu \cdot E1 & \mu \cdot E1 \\ \mu \cdot E1 & (1 - \mu) \cdot E1 & \mu \cdot E1 \\ \mu \cdot E1 & \mu \cdot E1 & (1 - \mu) \cdot E1 \end{bmatrix},$$

где $E1 = \frac{E}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}$. E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона.

Матричное уравнение, связывающее напряжения и деформации:

$$\sigma = C \cdot \varepsilon - C_p \cdot p. \quad (4.22)$$

где C_p – диагональная матрица (ее размер $(3 \cdot n \cdot m) \cdot (3 \cdot n \cdot m)$). По диагонали $C_{k,k} = 2 \cdot G$, G – модуль сдвига.

Решая совместно (4.20), (4.21), (4.22), получим:

$$q = D_p \cdot p, \quad D_p = K^{-1} \cdot B \cdot C_p.$$

Теперь, зная поле внедренной пластической деформации, рассчитали поле нормальных напряжений после дробемётной обработки (рисунок 4.10).

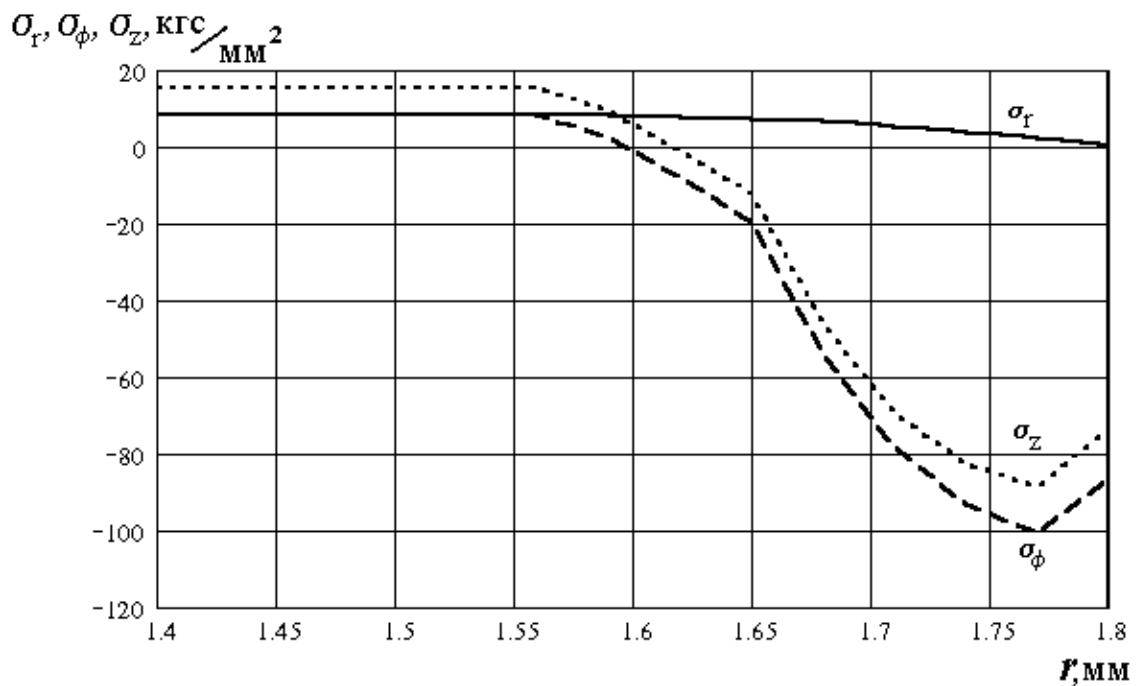


Рисунок 4.10. Нормальные напряжения после дробемётной обработки

Вблизи поверхности пружины двухсторонние напряжения сжатия от дробемётной обработки очень высокие, что существенно замедляет скорость зарождения и развития трещин.

4.5.4. Определение поля напряжений на поверхности пружины при дробеметной обработке

При расчёте напряжений и деформаций от дробемётной обработки, выполненной на пружине, которая предварительно прошла горячую осадку, приняты следующие допущения:

1. Поверхность витка обрабатывается равномерно со всех сторон.
2. Поле пластической деформации в пружине такое же, как и в контрольной пластинке (строго говоря, это допущение не вполне справедливо, так как в материале пружины, в отличие от пластинки, присутствуют начальные напряжения от первого заливоливания и пластическое состояние в ней наступает раньше).

Будем рассматривать нагружение путём введения в радиальном направлении «клина» пластической деформации, форма и размеры которого известны (рисунок 4.11).

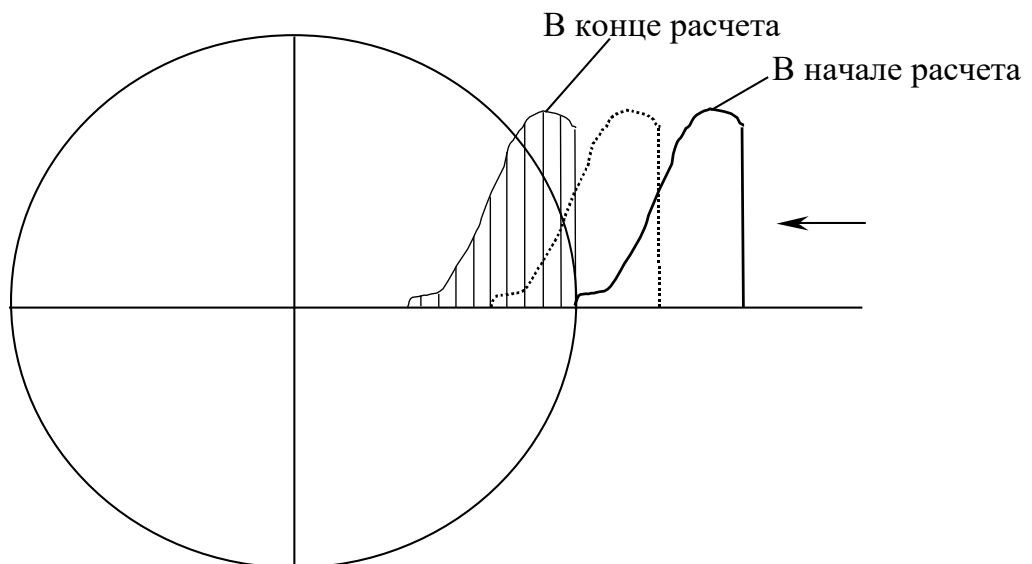


Рисунок 4.11 – Введение «клина» пластической деформации

Выполняем пошаговый расчёт деформирования. Для этого «клин» пластической деформации разобьём по длине на участки, ширина которых равна принятому шагу разбиения по радиусу пружины Δr . На каждом шаге величина пластической деформации считается постоянной $p_k(\Delta k)$ (здесь k – номер очередного шага). Так как возникающие при таком нагружении напряжения (осевые σ_r , окружные σ_ϕ и радиальные σ_r) ортогональны по отношению к остаточным касательным напряжениям $\tau_{z\phi}$, нагружение нельзя считать пропорциональным и расчёт следует вести по какой-либо теории пластичности инкрементального типа (теории течения).

Наиболее простой, и достаточно адекватной, теорией подобного типа является модель Прагера-Ишлинского, суть которой состоит в следующем. Полное напряжение σ , как это принято в большинстве теорий инкрементального типа, разделяется на активное a и дополнительное $a_{доп}$:

$$\sigma = a_{акт.} + a_{доп.},$$

условие течения $a_{акт} = \sigma_T$, при этом дополнительное напряжение изменяется пропорционально полученной пластической деформации

$$a_{доп.} = E' \cdot p,$$

где E' - модуль упрочнения материала.

Нагружение кинематическое, поэтому удобней вести расчет не в пространстве напряжения, а в пространстве деформаций. Запишем аналогичные соотношения для деформаций.

Полная деформация γ разделяется на пластическую $\gamma_{пл}$, активную $\gamma_{акт}$ и дополнительную $\gamma_{доп}$:

$$\gamma = \gamma_{пл} + \gamma_{акт} + \gamma_{доп.},$$

условие течения - $\gamma_{акт} = \gamma_T$, при этом дополнительная деформация изменяется пропорционально полученной пластической деформации.

$$\gamma = \frac{G'}{G - G'} \cdot \gamma_{\text{пл}}$$

где G' - модуль упрочнения материала (при сдвиге).

Процесс расчета иллюстрирует схема на рисунке 4.12.

В начале расчета нам известны остаточная деформация сдвига (γ) и остаточная пластическая деформация сдвига ($\gamma_{\text{пл}}$) для всех элементов разбиения, возникшие после термоосадки.

Рассмотрим некоторый элемент разбиения на k -ом шаге расчета. Предположим, что для него известны γ и $\gamma_{\text{пл}}$ после $(k-1)$ -го шага. Если мы покажем, что для этого элемента можно определить γ и $\gamma_{\text{пл}}$ после k -го шага, значит мы сможем рассчитать γ и $\gamma_{\text{пл}}$ после последнего шага для всех элементов разбиения, то есть определить в пружине поля остаточной деформации сдвига, остаточной пластической деформации сдвига, а по ним и остаточных касательных напряжений после дробеметной обработки.

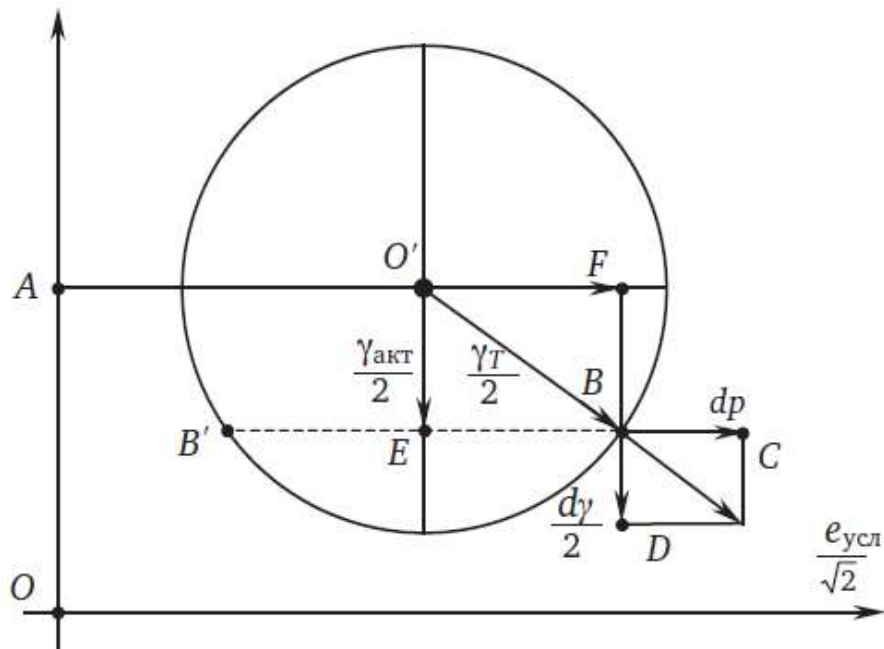


Рисунок 4.12. К методике расчета остаточных касательных напряжений после дробеметной обработки

Для выполнения расчета введем четырехмерное пространство девиаторов деформаций $\gamma/2, e_z / \sqrt{2}, e_\varphi / \sqrt{2}, e_r / \sqrt{2}$. Индексы z, φ, r - показывают направления: осевое, окружное и радиальное соответственно. В этом пространстве поверхность текучести является сферой радиуса $\gamma_T/2$.

В дальнейшем будем говорить «до и после нагружения», подразумевая k -ый шаг.

Пусть до нагружения центр поверхности текучести для рассматриваемого элемента разбиения находился в т. O' . Его координата по оси сдвиговых деформаций равна $\gamma_{пл} + \gamma_{доп}$. Остальные три координаты нам не пригодятся (их искать не будем). Пусть при нагружении мы попали на поверхность текучести в т. B . Так как смещение поверхности текучести пойдет по направлению нормали к ней, проведенной из т. B (т.е., по направлению вектора $O'B$), то удобно для наглядности провести сечение нашего четырехмерного пространства двумерной плоскостью, проходящей через т. O' и натянутой на два вектора: $O'B$ и параллельный оси сдвиговой деформации. В этом сечении поверхность текучести будет представлять собой окружность того же радиуса. Одна ось (вертикальная) - ось сдвиговых деформаций. Вторая - ортогональная ей (вектор в направлении этой оси в четырехмерном пространстве лежит в трехмерном подпространстве нормальных деформаций). Получим схему на рис. 4.12. Вторую ось будем в дальнейшем для простоты называть «условная». До нагружения мы находились внутри поверхности текучести на прямой $B'B$ (в четырехмерном пространстве это трехмерное подпространство). Нагружение происходит ортогонально оси сдвиговой деформации. Точка состояния сначала попадает в точку B , а потом движется по нормали к поверхности текучести. При этом происходит прирост пластических деформаций $dp_z, dp_\varphi, dp_r, dp_{пл}$, причем

первые три известны ($dp_z = dp_\varphi$, $dp_r = -2dp_z$), последний - необходимо определить. При этом

$$dp = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{dp_z^2 + dp_\varphi^2 + dp_r^2} = dp_z \sqrt{3}$$

где dp – прирост пластической деформации вдоль «условной» оси.

Далее нетрудно вычислить $d\gamma_{пл}$ из числа геометрической пропорции (подобие треугольников):

$$\frac{BC}{BD} = \frac{O'F}{O'E}$$

$$d\gamma_{пл} = 2 \cdot \sqrt{3} p_z \cdot \frac{\gamma_{акт} - \gamma_{доб}}{\sqrt{\gamma_T^2 - (\gamma_{доп} - \gamma_{акт})^2}}$$

Заметим, что в данной схеме знак прироста $d\gamma_{пл}$ совпадает со знаком $\gamma_{акт}$. На рисунке 4.12 показан случай, когда происходит уменьшение остаточной пластической деформации сдвига и, следовательно, напряжений $\tau_{ост}$ (по модулю). Такое состояние, как будет показано в расчете, имеет место на периферии поперечного сечения.

После нагружения получим:

$$\gamma_{пл}^{k+1} = \gamma_{пл}^k + d\gamma_{пл}$$

Теперь по полю $\gamma_{пл}^{k+1}$ необходимо определить поле полных деформаций сдвига γ (или иначе, $\gamma_{z\varphi}$). Они однозначно связаны с относительным углом закручивания. Запишем (индексы i, j определяют координаты точки).

$$\gamma_{упр\ i, j} = \frac{Rr_i}{R + r_i \cos \alpha} \theta - \gamma_{пл\ i, j};$$

$$\tau_{ост} = G\gamma_{упр};$$

$$T_{\text{ост}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \tau_{\text{ост},i,j} r_i \Delta S_i = 0;$$

или

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m G \left(\frac{R r_i}{R + r_i \cos \alpha_j} \theta - \gamma_{\text{пл},i,j} \right) \cdot r_i \Delta S_i = 0.$$

Тогда было получена формула для определения остаточного угла кручения и измененных после дробеметной обработки касательных сдвиговых деформаций:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \gamma_{\text{пл},i,j} r_i \Delta S_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{R \cdot r_i}{R + r_i \cos \alpha_j}}.$$

Окончательно, искомая полная деформация сдвига:

$$\gamma_{\text{зф},i,j} = \frac{R \cdot r_i}{R + r_i \cos \alpha_j} \theta.$$

Все необходимые данные для расчета следующего шага получены. Количество шагов, необходимых для внедрения всего клина пластической деформации от дробеметной обработки задается произвольно (в расчете задано 20 шагов).

В результате расчета получено распределение остаточных касательных напряжений после дробемёта (рисунки 4.13 и 4.14) и величина остаточной осадки:

$$\lambda_{\text{ост. дроб}} = 3,44 \text{ мм}$$

Так как после операции горячей осадки остаточная осадка составила 4,1 мм, то после дробеметной обработки высота пружины увеличилась.

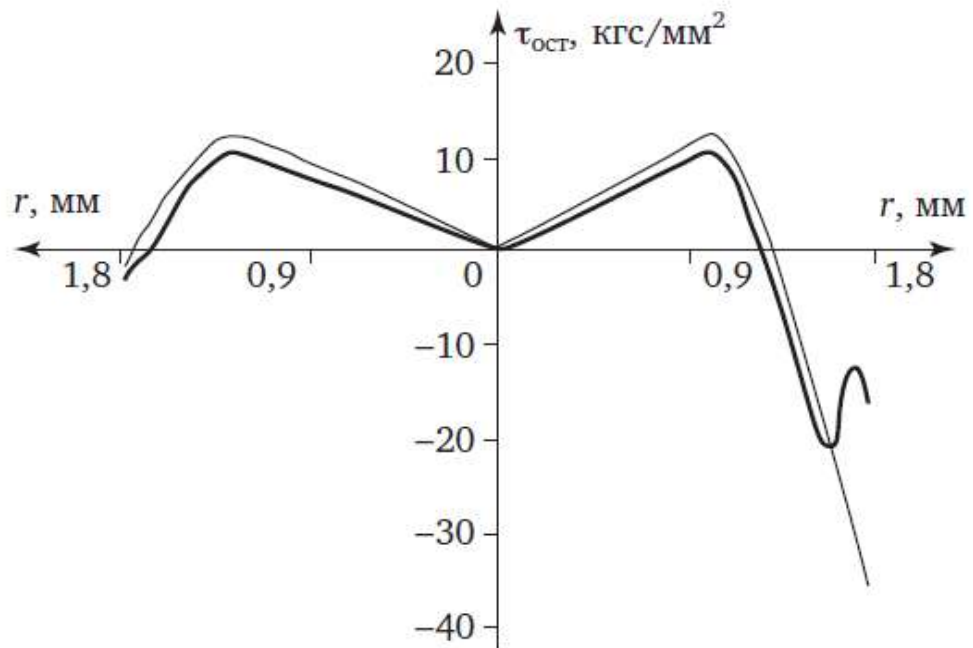


Рисунок 4.13. Напряжения на горизонтальном диаметре пружины (ось пружины справа): тонкая линия - после горячей осадки; полужирная линия - после дробеменной обработки

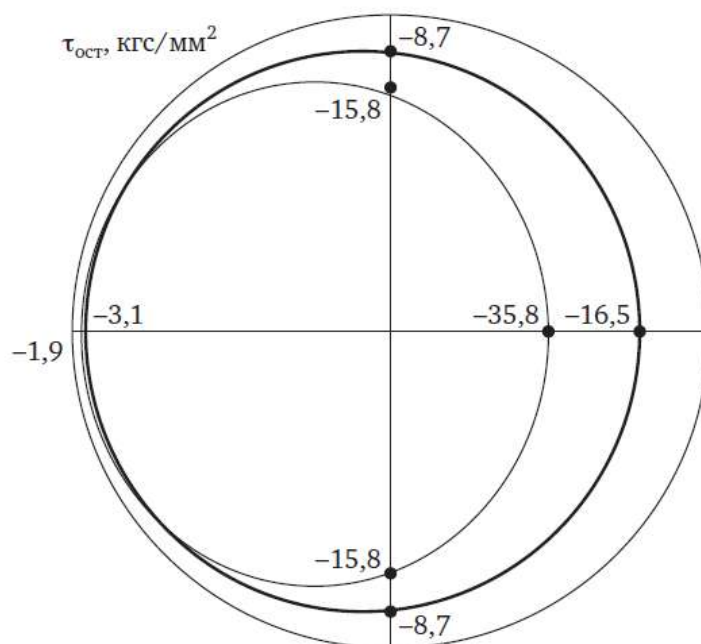


Рисунок 4.14. Остаточные касательные напряжения на поверхности пружины (ось пружины справа): тонкая линия - после горячей осадки; полужирная линия - после дробеменной обработки

Таким образом, отчетливо видно, что дробемётная обработка частично снимает остаточные касательные напряжения на поверхности пружины (отрицательный эффект).

4.6. Расчет кинетики деформирования при холодной трехкратной осадке

Повторная осадка, как и первая проводится сжатием пружины до соприкосновения витков при комнатной температуре. Так как после дробемета остаточная осадка пружины составляла 3,44 мм, то при повторном заневоливании пружина сжимается на $26 - 3,44 = 22,56$ мм.

Важно отметить при этом, что расчет процесса повторной осадки нельзя вести по методике, описанной в разделе 4.3. Необходимо учитывать наличие нормальных остаточных напряжений в пружине, так как в предварительно нагруженном теле состояние пластического течения наступит при меньших напряжениях, чем в ненагруженном. Поэтому, как и при анализе дробемета, будем проводить расчет последовательными шагами, то есть расчет кинетики деформирования по теории течения. Каждый шаг (в расчетной программе принято количество шагов $\text{Step} = 20$) представляет собой дополнительное поджатие пружины (по отношению к поджатию на предыдущем шаге) на величину $d\lambda = \lambda_2 / \text{Step} = 1,128$ мм какой-то определенной силой.

В качестве исходных данных для расчета используем поля нормальных и сдвиговых остаточных деформаций (полных и пластических), полученные после расчета процесса дробеметной обработки. Всего будет 8 полей, и на каждом шаге нагружения, если хотя бы в одной расчетной точке происходит пластическое деформирование все восемь изменяются. Если же пластическое

деформирование еще не наступило, то меняется только поле полных сдвиговых деформаций.

Теперь рассмотрим некоторый элемент разбиения на k -ом шаге расчета. Предположим, что для него известны λ , $\lambda_{\text{пл}}$, ε_z , p_z , ε_φ , p_φ , ε_r , p_r (8 компонент), после $(k-1)$ -го шага. Если мы покажем, что для этого элемента можно определить все 8 компонент после k -го шага, значит мы сможем рассчитать λ , $\lambda_{\text{пл}}$, ε_z , p_z , ε_φ , p_φ , ε_r , p_r после последнего шага для всех элементов разбиения. После упругой разгрузки по полям пластических деформаций можно определить поля полных деформаций, а по ним и остаточных напряжений после повторного заневоливания.

Для выполнения расчета используем четырехмерное пространство девиаторов деформаций $\lambda/2$, $e_z/\sqrt{2}$, $e_\varphi/\sqrt{2}$, $e_r/\sqrt{2}$ упомянутое в п. 4.5.4.

Процесс расчета иллюстрирует схема на рисунке 4.15.

В дальнейшем будем говорить «до и после нагружения», подразумевая k -ый шаг. Если при нагружении поверхность текучести не достигается, то для рассматриваемого элемента компоненты пластических деформаций не изменяются.

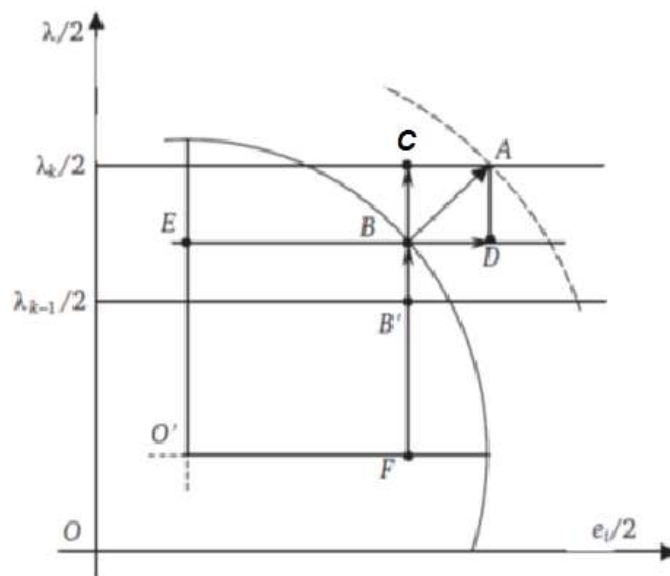


Рисунок 4.15. К расчету напряжения после повторной осадки

Рассмотрим случай, когда поверхность текучести достигается. Проведем объяснение хода расчета на примере двумерного случая (в четырехмерном случае рассуждения аналогичны).

Пусть до нагружения центр поверхности текучести для рассматриваемого элемента разбиения находился в т.О', а деформация сдвига была γ_{k-i} . Точка состояния находилась в т.В'. Нагружение происходит в направлении оси сдвиговых деформаций, причем деформация сдвига увеличивается на известную нам величину $d\gamma$. Пусть при нагружении мы попали на поверхность текучести в т.В, находим длину вектора В'В. Далее вычисляем смещение поверхности текучести в направлении сдвиговых деформаций $BC=d\gamma-V'B$. Теперь зная положение точки В относительно центра О' составляем пропорцию $EB/FB=BD/BC$, из которой находим BD. Смещение поверхности текучести по каждой из осей отвечает приросту соответствующей пластической деформации.

Проведя расчет для всех элементов разбиения мы получим четыре поля пластической деформации $\gamma_{пл}$, p_z , p_ϕ , p_r . По методике, описанной в п. 4.4.3 и п.4.4.4 определяем поля γ , ε_z , ε_ϕ , ε_r .

Все необходимые данные для расчета следующего шага получены. В результате расчета получены распределение остаточных касательных напряжений после повторного заневоливания (рисунки 4.16 и 4.17) и величина остаточной осадки $\lambda_{ост}=4,17$ мм.

Так как после дробеметной обработки остаточная осадка составляла 3,44 мм, то в результате повторного заневоливания пружина уменьшает длину на $\Delta\lambda=(4,17-3,44)=0,73$ мм.

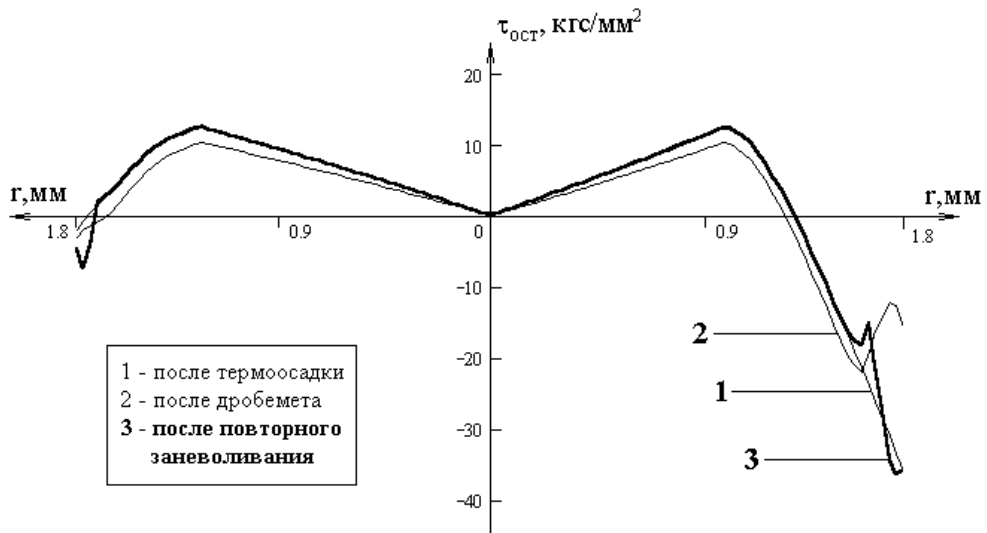


Рисунок 4.16. Остаточные касательные напряжения на горизонтальном диаметре пружины

Таким образом, расчет НДС, возникающее в пружине в ходе упрочняющих операций, удалось показать, что дробеметная обработка частично снимает остаточные касательные напряжения на поверхности пружины (отрицательный эффект), но проводимое повторное заневоливание их снова восстанавливает.

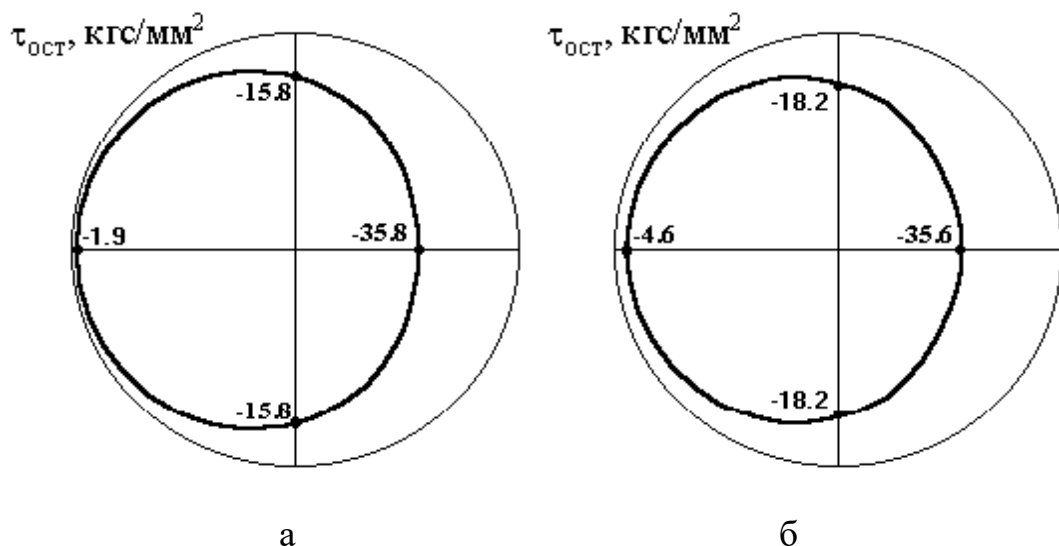


Рисунок 4.17 – Остаточные касательные напряжения на поверхности пружины: а - после термоосадки (первая осадка); б - после повторного заневоливания (трёхкратная холодная осадка)

4.7. Выводы

1. Впервые разработана математическая модель процесса упрочнения высоконагруженных пружин сжатия, учитывающая взаимное влияние друг на друга трёх видов упрочняющей обработки. Расчеты параметров упрочнения, проведенные на модели, показали удовлетворительные совпадения с экспериментальными данными, полученными при изготовлении опытно-промышленных партий пружин, при специальных экспериментальных исследованиях, а также при сопоставлении их с параметрами, определенными по методикам других авторов (для одного вида нагружения), в частности:

- несовпадение уровня напряжений при горячей осадке по сравнению с расчетом по методике Пономарева С.Д., составляет 11,2 %;

- несовпадение величины остаточной осадки пружины $\lambda_{ост}$, рассчитанной по разработанной методике и величины осадки при изготовлении опытно-промышленных партий составляет 18%;

- несовпадение расчетной высоты пружины после дробемётной обработки с экспериментальными данными (для разных случаев и режимов) составляет 3,4...4%;

- расчетная глубина наклёпанного слоя (глубина залегания напряжений двухстороннего сжатия) при дробемётной обработке отличается от экспериментальной, полученной при травлении.

2. Определены напряжения во всех опасных точках. Показано, что после трёхкратной осадки в сечении возникают такие касательные напряжения, что внутреннее волокно сечения работает в двигателе примерно при симметричном цикле, а наружное – при отнулевом.

3. Горячая осадка пружин сжатия в связи с уменьшением предела текучести при температуре резко увеличивает остаточную деформацию.

Поэтому дробемётная обработка в меньшей степени уменьшает эффект упрочнения от горячей осадки, чем от холодной осадки.

Глава 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРУЖИН СЖАТИЯ

5.1. Методика проектирования

Была проведена разработка методики проектирования технологических процессов изготовления высоконагруженных пружин сжатия, упрочнённых пластической осадкой [90, 175, 176, 182, 183, 184, 189], которая до 25...30% повышает нагрузочную способность пружин по сравнению со стандартными пружинами. До недавнего времени такой способ упрочнения раньше практически не применяли из-за отсутствия стандартов, руководящих материалов и методик проектирования.

Параметры витка (D ; d ; P_3) для обычных пружин регламентированы ГОСТ 13766-85...13775-85. В зависимости от допускаемых напряжений различают три класса пружин. Для I кл. напряжения небольшие ($\tau_3=0,3\sigma_B$), поэтому они обеспечивают неограниченную выносливость даже при малых инерционных зазорах.

У пружин II класса $\tau_3=0,5\sigma_B$, поэтому они меньше по габаритам, но выносливость их может быть ограниченной. Для гарантии значительной выносливости инерционный зазор не должен быть слишком малым, а пружины в ряде случаев необходимо упрочнять дробеструйным наклёпом.

Пружины III класса имеют ещё большие напряжения при соприкосновении витков, а поэтому большой шаг и высокую скорость прохождения динамической волны вдоль пружины. Они применяются при импульсных нагрузках, которые в обычных пружинах I и II классов могут вызвать соударение витков и быстрое разрушение. В зависимости от применяемого материала пружины подразделяются также на разряды.

Расчёт сводится к назначению одного из вариантов параметров витка по таблицам и вычислению всех остальных параметров пружины. При этом появляется возможность расширить диапазон параметров (c ; d и др.) по сравнению с приведённым в таблице ГОСТ.

Введём понятие относительной конструктивной жесткости пружины $\bar{P}=P_2/P_1$. Этот параметр характеризует плавность изменения нагрузки и назначается конструктором. От него больше всего зависят габариты пружины. Также назначается из конструкторских соображений параметр C , с увеличением которого уменьшается высота, но увеличиваются d и D . И, наоборот, с уменьшением назначаемой высоты H'_3 или H_0 увеличивается индекс и диаметр.

Рассмотрим способ упрочнения и метод расчёта пружин, упрочнённых пластической осадкой в направлении последующего действия рабочей нагрузки. Пластическая осадка (для пружин массового производства), полугорячая осадка (для пружин клапана двигателей автомобилей) или длительное заневоливание (для специальных пружин мелкосерийного производства) – это последний этап технологического процесса, при котором после упругой разгрузки пружина получает остаточные напряжения обратного знака. Эти напряжения, складываясь впоследствии с положительными напряжениями от действия рабочей нагрузки, позволяют повысить нагрузку пружин в эксплуатации. После упрочнения такие пружины нельзя подвергать воздействию высоких температур, снимающих остаточные напряжения.

Диаграмма осадки такой пружины, навитой с большим шагом, чем обычные, приведена на рисунке 5.1.

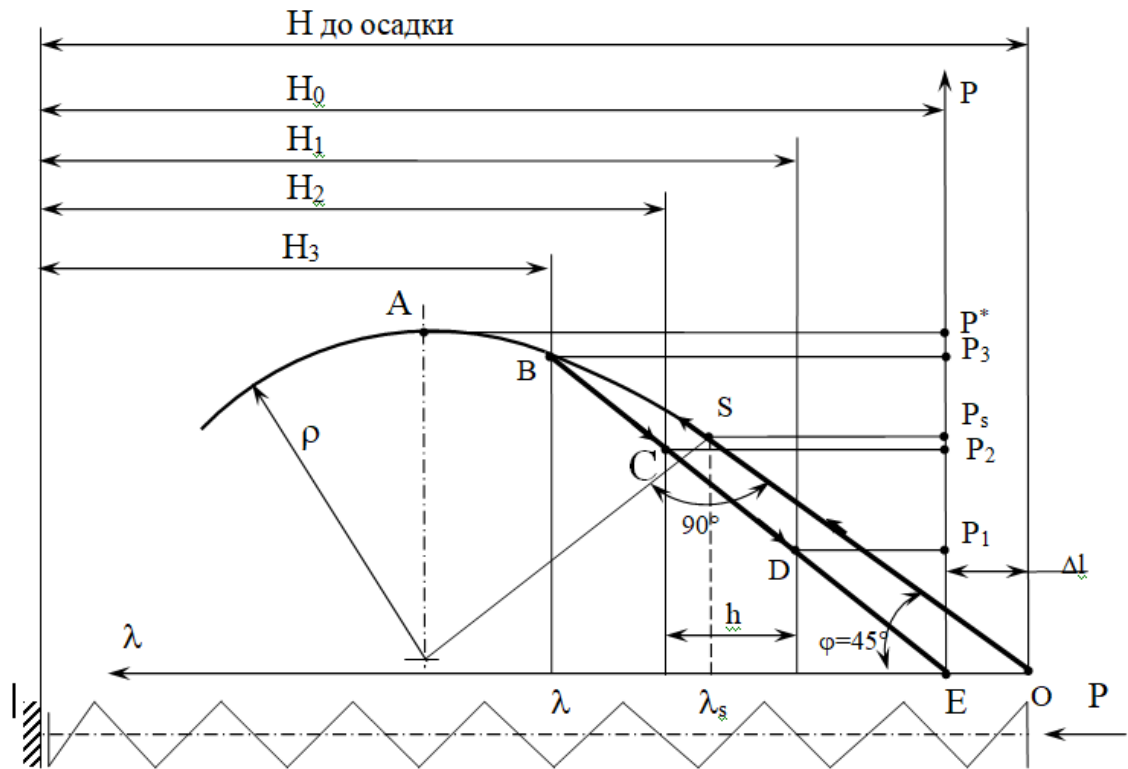


Рисунок 5.1. Диаграмма пластической осадки пружины сжатия

Увеличение несущей способности витка происходит не за счёт упрочнения металла при пластических деформациях кручения (эти деформации малы), а вследствие перераспределения напряжений в сечении пружины. На рисунке 5.2 приведены эпюры напряжений в упругой (ОВ) и пластической (ОСВ) областях, а также остаточные напряжения после разгрузки (ОДЕ). Рассматривая их, можно отметить, что в упругой области нагружения наружные волокна нагружены почти до предела текучести, промежуточные волокна работают на половину своих возможностей. А в пластической области промежуточные волокна нагружаются до предела текучести, и крутящий момент в сечении значительно возрастает. После разгрузки появляются остаточные напряжения обратного знака $-\tau_{\text{ост.}}$, которые складываясь с напряжениями от рабочей нагрузки уменьшают их,

благодаря чему такие пружины имеют значительную выносливость даже при уменьшении сечения проволоки.

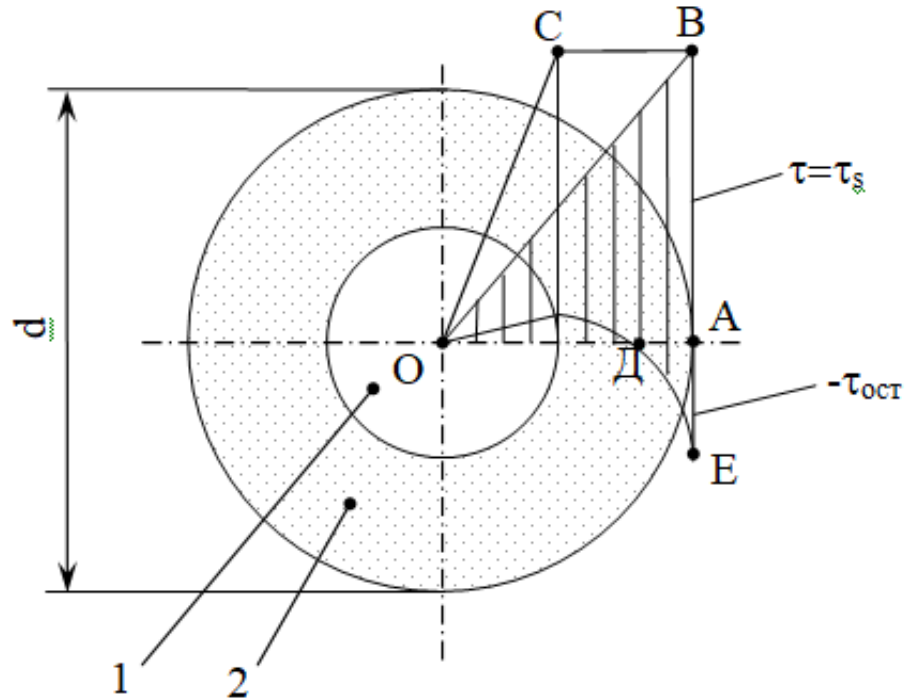


Рисунок 5.2. Эпюры напряжений кручения при осадке: 1 – упругая зона, 2 – пластическая зона

Конструкторский расчёт

Если уменьшить диаметр проволоки на 10%, то жёсткость, зависящая от диаметра в 4-ой степени, уменьшится на 40%. Чтобы вернуться к той же силовой характеристике, которая была раньше, необходимо число рабочих витков уменьшить на 40%, т.к. жёсткость зависит от числа витков в 1-ой степени. Пружина становится меньше по габаритам примерно на 30%, а по массе на 50%.

Для обеспечения значительной выносливости (N циклов) нельзя нагружать упрочнённую пружину до нагрузки P_3 (рисунок 5.1).

Для пружин неограниченной выносливости и значительной асимметрии цикла $r = P_1/P_2$ нужен инерционный зазор, согласно работы [49] δ

$= 0,427$ (т.е. $P_2 \leq P_3/1,75$). Все остальные пружины могут быть нагружены в пределах зазора $\delta = 0,1 \dots 0,427$. Следует отметить, что при $\delta = 0,5$; $P_2 = 0,5P_3$, т.е. используется только половина полученной упругой характеристики. Для пружин с малой асимметрией цикла, но с большим числом нагружений можно рекомендовать назначать $\delta \approx 0,30$. К таким пружинам можно отнести пружины натяжения ремней, цепей, тросов передач. Нажимные пружины валков, тормозов и других устройств, хотя имеют несколько больший рабочий ход, но количество циклов нагружения у них меньше, поэтому для них также можно рекомендовать $\delta \approx 0,3$. Пружины штампов, как правило, имеют и большой рабочий ход, т.е. большую асимметрию цикла r и значительное число циклов нагружения, поэтому для них рекомендуется $\delta = 0,3 \dots 0,427$. Предельная поверхность допускаемого нагружения упрочнённых пружин приведена на рисунке 5.3 [91].

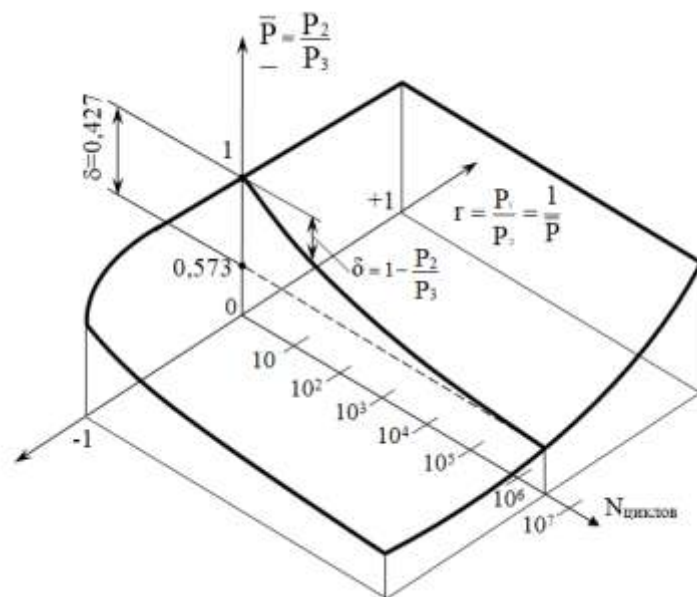


Рисунок 5.3. Предельная поверхность допускаемого нагружения упрочненных пружин

В таблицах 11 и 12 приведены коэффициенты механических свойств и расчетные формулы для проведения конструкторского расчета.

Коэффициенты механических свойств

	Проволока	$\bar{P}^*_{ном.}$	$K_{Iном.}$	K_M
1	Высокопроченная $\sigma_B \geq 185$	1,49	0,451	0,5
2	Среднепроченная $\sigma_B < 185$	1,433	0,466	0,2
3	Закалка до навивки	1,392	0,524	
4	Закалка после навивки	1,35	0,515	

Расчетные формулы для проведения конструкторского расчета

- (1) $z = P_2(1 - 1/\bar{P})/h$;
(2) $P_3 = P_2/(1 - \delta)$;
(3) $P_3 = \pi d^2 K_{II} \sigma_B / (8 \cdot C \cdot K_C)$;
(4) $P_1 = P_2 / P$;
(5) $P = 1/(1 - zh/P_2)$;
(6) $P_2 = (1 - \delta)P_3$;
(7) $K_C = (4C - 1)/(4C - 4) + 0.615/C$;
(8) $\Delta \sigma_i = \sigma_{Bi}^{РАСЧ} - \sigma_{Bi}^{ТАБЛ} = 8P_3CK_C / (\pi d_i^2 K_{II}) - \sigma_{Bi}^{ТАБЛ}$;
(9) $D = d(C + 1)$;
(10) $C = (D - d)/d$;
(11) $n = 1000d / (C^3 z)$;
(12) $Z = 1000d / C^3 n$;
(13) $t = P_3 / (zn) + d$;
(13') $t = d + \Delta l/n$;
(13'') $t = P_3 / (zn) + d + \Delta l/n$
(до осадки);
(14) $\bar{\tau}_3 = 8K_C P_3 C / (\pi d^2 \sigma_B)$;

Формулы сжатия (15-18)

- (15) $H_3 = d(n + 1,5)$;
(16) $H_0 = H_3 + P_3 / Z$;
(17) $H_1 = H_0 - P_1 / Z$;
(18) $H_2 = H_0 - P_2 / Z$;

Формулы растяжения (19-22)

$$(19) \quad H_0 = d(n+1);$$

$$(19') \quad H_0 = d(n+1) + \Delta l$$

$$(20) \quad H_1 = H_0 + P_1 / z;$$

$$(21) \quad H_2 = H_0 + P_2 / z;$$

$$(22) \quad H_3 = H_0 + P_3 / z;$$

$$(23) \quad C_{сж} = \sqrt[3]{1000 d_i / z \left\{ \left[\frac{H_0 - P_3 / z}{d_i} \right] - 1,5 \right\}};$$

$$(24) \quad C_{РАСТ} = \sqrt[3]{1000 d_i / z \left[\frac{H_0}{d_i} - 1 \right]};$$

$$(25) \quad n_{сж} = (H_2 - 1,5d_i) / \left\{ \left[\frac{P_2}{1 - \delta} - P_2 \right] * C^3 / (1000d_i) + d_i \right\};$$

$$(26) \quad n_{РАСТ} = (H_2 - d_i) / \left[d_i + P_2 C^3 / (1000d_i) \right];$$

$$(27) \quad \sigma_B = 0,13(HRC)^2 - 5,8(HRC) + 155;$$

$$(28) \quad n_{сж} = H_3' / d - 1,5;$$

$$(29) \quad n_{РАСТ} = (H_3 - d) / \left[d + P_3 C^3 / (1000d) \right];$$

$$(29') \quad n = H_3' / d + 1;$$

$$(30)$$

$$(31) \quad K_1 = K_{НОМ} / \left[1 + K_M / (C - 1) \right];$$

$$(32) \quad \bar{P}^* = \bar{P}_{НОМ}^* \left[1 + K_M / (C - 1) \right];$$

$$(33) \quad P_S = \pi d^2 \sigma_B K_1 / (8C);$$

$$(34) \quad \lambda_S = \pi C^2 d n \sigma_B K_1 / 8000;$$

$$\varphi = \bar{\lambda} - 1 - 3,44 \left(\bar{P}^* - 1 \right) \times$$

$$(35) \quad \left\{ \sqrt{1 - \left[0,707 - 0,293 \left(\bar{\lambda} - 1 \right) / \left(\bar{P}^* - 1 \right) \right]^2} - 0,707 \right\};$$

$$(36) \quad \lambda_3 = \lambda_S \left(\bar{\lambda} - \varphi \right);$$

$$(37) \quad P_3 = \lambda_3 z;$$

$$(38) \quad \Delta l = \lambda_S \varphi;$$

$$(39) \quad P_0 = z \Delta l;$$

$$(40) \quad \tau_0 = 8 P_0 (D - d) / (\pi d^3) \leq \tau_{Дон}$$

$$(41) \quad P_3 = P_S \left(\bar{\lambda} - \varphi \right);$$

$$(42) L_{СЖ} = 3,2(D-d)(n+2);$$

$$(42') L_{РАСТ} = 3.2(D-d)n;$$

$$(43) Q_{СЖ} = 19.25 \cdot 10^{-6} (D-d) \cdot d^2 (n+2); \quad \text{кг}$$

$$(43') Q_{РАСТ} = 19.25 \cdot 10^{-6} (D-d) d^2 n; \quad \text{кг (без зацепов)}$$

Аппроксимирующую окружность пластического участка нагружения можно построить графоаналитическим методом. Для этого на графике (рис.5.1) откладывают нагрузку P^* и координаты точки S начала пластических деформаций, рассчитанные по формулам (30) –(33)

Номинальные коэффициенты относительных механических свойств получены без учёта влияния кривизны витка, т.е. индекса $c=(D-d)/d$. Аппроксимирующую окружность с помощью циркуля проводят таким образом, чтобы она проходила через точку S и была касательна к двум прямым: AP^* и OS . Величину H_3 , т.е. положение точки, соответствующей началу разгрузки, можно определить как для пружины с поджатыми шлифованными торцовыми витками по формуле (15) (таблица 12).

В таблице 13 представлены два конструктивных варианта: при задании силовой характеристики и при задании геометрических параметров пружины.

На практике могут встретиться промежуточные расчётные случаи, когда из 5-ти заданных параметров некоторые – силовые, а остальные – геометрические, например, h, δ, P_2, H_2, C или h, δ, P_2, H_0 . Формулы (23) и (25) (таблица 13) приведены для использования в этих случаях.

Таблица 13

Варианты расчёта

№	Заданные параметры										Определим
									Задано	Варьируем	
1	h	δ	P_2	\bar{P}	C				Силовая хар-ка Индекс	$C; \bar{P}$	Диам. проволоки
2	h	δ				H_3	D	d	Диам. проволоки Объём пружины	$d;$ $D; H'_3$	Силовую хар-ку

Алгоритм расчёта

Ниже приведен общий алгоритм расчета параметров пружин при проведении конструкторского расчета по различным вариантам.

КОНСТРУКТОРСКИЙ ВАРИАНТ 1
УПРУГАЯ ОБЛАСТЬ

ДАНО: $h, \delta, P_2, \bar{P}, C$

ОПРЕДЕЛИТЬ: D, d, n, τ_3

H_0, H_1, H_2, H_3

t, P_1, P_2, P_3

НАЗНАЧИМ: K_c ; материал; необходимость округления D ;
пружина растяжения или сжатия.

ВЫЧИСЛИМ: (1) Z ; $K_c(7)$; $P_3(2)$; $P_1(4)$.

Для каждого из табличных диаметров d_i начиная с d_{min} вычислим $\Delta\sigma_i$ (8), пока не выполнится условие $\Delta\sigma_i \leq 0$; вычислим $D(9)$, округлим до табличного; вычислим $C(10)$; $n(11)$; $t(13)$; $K_y(7)$; $\bar{\tau}_3(14)$; H_0, H_1, H_2, H_3 по формулам (15...18) или (19...22).

КОНСТРУКТОРСКИЙ ВАРИАНТ 1 ПЛАСТИЧЕСКАЯ ОБЛАСТЬ
--

ДАНО: $h \delta_{\text{назн.}} P_2 P C$

ОПРЕДЕЛИТЬ: $Ddn \delta_{\text{скоррект.}}$

$H_0 H_1 H_2 H_3$

$P_S P_1 P_2 P_3$

$t \Delta l P_0 \tau_0$

НАЗНАЧИМ: $\bar{\lambda}$; материал;

ВЫЧИСЛЯЕМ: $Z(1); P_1(4); P_3(2)$.

Для каждого из табличных диаметров d_i , начиная с d_{min} , определим $\bar{P}_{\text{ном}}^*$; $K_{I_{\text{ном}}}$; K_M в зависимости от $\sigma_6 \geq 185$ или $\sigma_6 < 185$ и вычислим $n(11)$; $K_I(31)$; $\bar{P}^*(32)$; $P_S(33)$; $\Phi(35)$; $P_{3i}(41)$; после выполнения условия $P_{3i} \geq P_{3-2}$. Вычислим $D(9)$, округлим до табличного, вычислим $C(10)$; $n(11)$; $\lambda_S(34)$; $\Delta l(38)$; $t(13)$; $H_0 H_1 H_2 H_3$ по формулам (15...18);

КОНСТРУКТОРСКИЙ ВАРИАНТ 2 УПРУГАЯ ОБЛАСТЬ
--

ДАНО: $h \delta H_3 Dd$

ОПРЕДЕЛИТЬ: $Ddn \bar{\tau}_3$

$H_0 H_1 H_2 H_3$

$t P_1 P_2 P_3$

НАЗНАЧИМ: K_ψ ; σ_6 или HRC ; пружина сжатия.

ВЫЧИСЛИМ: $C(10)$; $K_c(7)$; в случае задания HRC вычислим

$\sigma_6(27)$; $P_3(3)$; $P_2(6)$; $n(28$ или $29)$; $Z(12)$; $\bar{P}(5)$; $P_1(4)$; $t(13)$; $\bar{\tau}_3(14)$; $H_1 H_2 H_3 H_0$ по формулам (15...18)

КОНСТРУКТОРСКИЙ ВАРИАНТ 2
ПЛАСТИЧЕСКАЯ ОБЛАСТЬ

ДАНО: $h\delta H_3 Dd$

ОПРЕДЕЛИТЬ: $Ddn\delta$

H_0, H_1, H_2, H_3

P_S, P_1, P_2, P_3

$t, \Delta l, P_0 \tau_0$

НАЗНАЧИМ: $\bar{\lambda}$; $\bar{P}_{ном.}^*$; $K_{Iном.}$; K_M ; σ_e или HRC , пружинасжатия .

ВЫЧИСЛИМ: $C(10)$; в случае задания HRC вычислим $\sigma_e(27)$; $K_I(31)$; $\bar{P}^*(31)$; $\bar{P}_S(33)$; $\Phi(35)$; $P_3(41)$; $P_2(6)$; $n(28$ или $29)$; $\lambda_S(34)$; $Z(12)$; $t(13)$; $\bar{P}(5)$; $P_I(4)$; $\Delta l(38)$; $H_0 H_1 H_2 H_3$ (15...18) или (19...22);

Рекомендации по расчёту и применению упрочнённых пружин

Практика показала, что чертежи на многих заводах выполнены не по ГОСТ. Это в большей степени относится к уровню нагружения $K_u = \tau_3 / \sigma_e$. Чтобы определить промежуточные, нестандартные значения этого коэффициента, необходимо производить расчёты.

Приведём пример алгоритма такого расчёта, реализованного в данной методике:

НАЗНАЧИМ: d ; D ; H_0 ; P_2 ; σ или HRC (пересчёт по (27))

ВЫЧИСЛИМ: $C(10)$; $Z(12)$; $H_3(15)$; λ_3 ; P_3 ; K_C ; K_{II} ; δ .

В этом алгоритме введены новые формулы в дополнение к таблице 12.

$$\lambda_3 = H_0 - H_3, \quad P_3 = Z \cdot \lambda_3, \quad K_u = \frac{8 P_3 C K_c}{\pi d^2 \sigma_e}, \quad \delta = (P_3 - P_2) / P_3.$$

Для анализа результатов расчёта можно использовать график на рисунке 5.4. С увеличением $K_{ц}$ возможности упрочнения уменьшаются, т.к. существующая пружина уже была перегружена. Но если при этом на чертеже анализируемой пружины был значительный инерционный зазор δ , то возможности упрочнения увеличиваются.

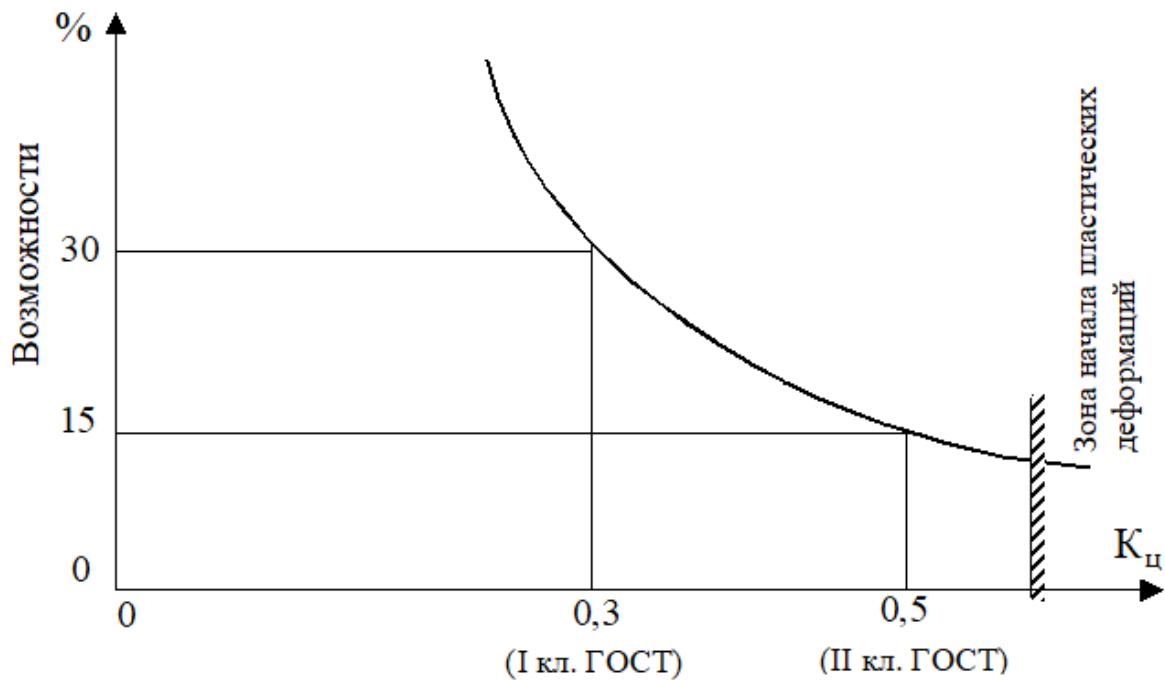


Рисунок 5.4. Возможности упрочнения пружин в зависимости от реализации уровня нагружения существующего варианта

При проектировании можно прогнозировать возможность релаксации в зависимости от технологии осадки и инерционного зазора δ :

1. Осадка в процессе сборки для статических пружин (например, пружина шарнира наружного зеркала автомобиля) – нагрузка уменьшится со временем при эксплуатации на $\sim 7\%$.

2. Осадка технологическая, однократная без выдержки по времени.

а) если при работе инерционный зазор $\delta \geq 0,1$, то заметной релаксации не ожидается;

б) если пружина статическая, типа предохранительной, с малым числом циклов, малым инерционным зазором $\delta = 0 \dots 0,03$, то возможна релаксация до 7 %.

3. Осадка с выдержкой 10...20 сек, или 5...8 кратная осадка до нагрузки P_3 :

а) если при работе $\delta \approx 0$, то ожидается релаксация ≈ 4 %;

б) если $\delta > 0,1$, то заметной релаксации не ожидается.

4. Осадка технологическая с заневоливанием на 48 часов или 300-кратная осадка – релаксация при эксплуатации не ожидается даже при $\delta \rightarrow 0$.

Расчёт пружин в упругой области (неупрочнённых) не вызывает особых затруднений, хотя принцип расчёта отличается от стандартной методики. Единственно, что следует отметить: точность расчёта по силовой характеристике зависит от плотности типоряда диаметров проволоки d_i , а если расчёт заканчивается выбором последнего диаметра, то он может быть недостоверным. Т.е. после примерного расчёта по силовой характеристике следует повторить его по геометрическим параметрам. При этом достигается более высокая точность. Расчёт пружин в пластической области (упрочнённых осадкой) удобнее проводить, задавая геометрические параметры. Представим себе пружину, сжатую в блок до соприкосновения витков в пластической области, и, помещённую в гнездо диаметром D и высотой H_3' . В наибольшей степени расчётная силовая характеристика и длина будут зависеть от диаметра проволоки d . В наименьшей степени – от глубины $\bar{\lambda}$ (рекомендуемая величина $\bar{\lambda} = 1,6$).

При расчёте упрочнённой пружины диаметр проволоки необходимо принимать на 7...15% меньше, чем у неупрочнённой. Тогда силовая

характеристика не будет резко отличаться. Если задать тот же диаметр d , то пружина будет несколько длиннее и на 20...30% повысится нагрузка. Когда назначается высота H_3' , то при конкретном диаметре d фактически назначается число витков n .

Оно может быть дробным, например 5,79, что неудобно для технологии и контроля. Чтобы получить во втором расчёте $n=5,5$, нужно H_3' уменьшить на величину $0,29d$.

Если пружина оказалась короче, чем необходимо в существующем монтажном пространстве, то её можно растянуть введением величины недоосадки ΔH . При этом увеличится только шаг витков. Эта операция похожа на заполнение лишнего монтажного пространства подкладными шайбами или втулками.

При изменении инерционного зазора δ и рабочего хода h конструкция рассчитанной пружины не изменяется. Изменяются только условия эксплуатации пружины, т.е. рабочие нагрузки и соответствующие им длины.

Результаты расчёта переносятся на эскиз пружины. Если пружина сравнительно длинная $H/D > 2$, то в пункте I технических условий записывается уточнение: упрочнить пластической осадкой на оправке или в гильзе. Если $H_0/D \geq 2,6$, то пружина может потерять устойчивость даже в упругой области.

Упрочнение пружин сжатия термоосадкой, дробементной обработкой и холодной осадкой [77, 78, 174, 189, 190]

Расчёт напряжений при нагрузках P_1 , P_2 и P_3 следует проводить по следующим формулам:

$$\tau_i = K \frac{8P_i D_0}{\pi d^3}; \text{ кг/мм}^2; \quad K = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0,615}{C}; \quad C = \frac{D_0}{d}$$

Коэффициент запаса выносливости n_τ по уровню напряжений определяют по формуле:

$$n_\tau = \frac{\tau_N}{\tau_2}$$

В результате дробемётной обработки увеличивается усталостная прочность пружин, при этом уменьшается способность к релаксации нагрузки. После осадки на наружном поверхностном слое пружины появляются наибольшие остаточные касательные напряжения. После дробеметной обработки в поверхностном слое пружины остаточные касательные напряжения исчезают, а образуются остаточные напряжения сжатия. При этом глубина упрочненного слоя зависит от прочности металла пружины (для «сырых» сталей: глубина упрочненного слоя до 0,8 мм, остаточные напряжения сжатия - 400...450 МПа; для более прочных материалов глубина упрочненного слоя - до 0,2 мм, а остаточные напряжения сжатия - 700...1000 МПа). Глубина упрочненного слоя и величина остаточных напряжений также повышаются при увеличении диаметра и скорости удара дроби.

На рисунке 5.5. показано, что при увеличении глубины упрочненного слоя происходит уменьшение остаточных касательных напряжений $\tau_{ост}$. При последующем нагружении пружины, упрочненной дробеметной обработкой, пластическая деформация в поверхностном слое пружины начинается при меньших величинах касательных напряжений. При этом можно отметить, что дробеметная обработка частично снимает упрочняющий эффект от термоосадки.

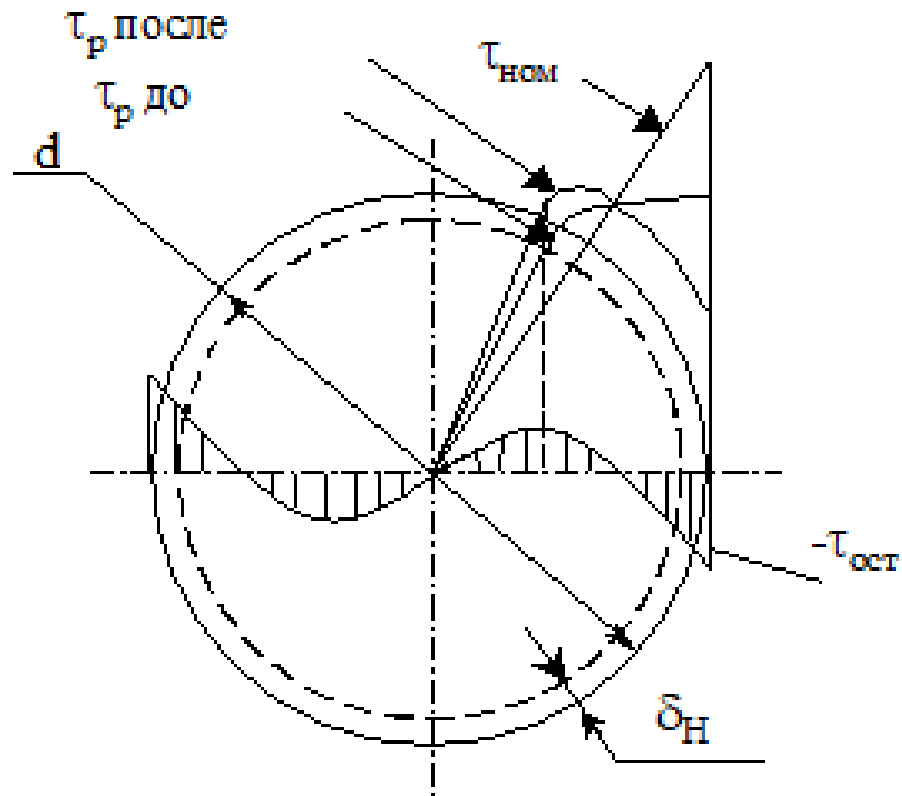


Рисунок 5.5. Распределение остаточных касательных напряжений в сечении пружины после дробеметной обработки

Определение глубины упрочненного поверхностного слоя после термоосадки

Для определения глубины упрочненного поверхностного слоя после термоосадки (глубина распределения остаточных напряжений на поверхности пружины), необходимо проведение травления образцов пружин в течение 3 ч в концентрированной соляной кислоте при температуре менее 100°C .

После дробеметной обработки в поверхностном слое пружины возникают остаточные напряжения сжатия σ_1 и σ_2 , остаточные касательные напряжения, вызванные термоосадкой, исчезают, и высота пружины увеличивается.

При низкотемпературном отпуске при температуре 180 °С высота пружины также увеличивается. В случае отсутствия отпуска пружин или его проведения при меньшей температуре, в течение нескольких дней или месяцев в материале пружин произойдет старение при комнатной температуре, и высота пружины также может увеличиться.

Последующая трёхкратная холодная осадка, проводимая перед испытанием пружин на рабочую нагрузку, приводит к появлению новых остаточных касательных напряжений в упрочненном поверхностном слое пружины слоях. При этом остаточную деформацию пружины можно приблизительно определить как сумму деформации (увеличения высоты) пружины после дробемётной обработки и отпуска, что позволяет регулировать деформацию пружины при термоосадке с силой P_2 .

Построение диаграммы деформирования при сжатии пружин

Для дальнейших расчетов геометрических и силовых характеристик пружин необходимо построение диаграммы деформирования при сдвиге τ - γ .

Расчет остаточных напряжений при сжатии пружины

Остаточные напряжения (внутренний слой):

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

где $J_p = \frac{\pi r^4}{2}$ – момент инерции сечения пружины.

Остаточные напряжения (внешний слой):

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

Истинные касательные напряжения во внутреннем слое при рабочей нагрузке P_2 (с учетом остаточных напряжений от термоосадки) определяют по формуле:

$$\tau_2' = \tau_T + \frac{(P_2 - P_3) \cdot R^2 r}{J_p (R - r)} \cdot \left(1 + \frac{r}{4R}\right);$$

Расчет кинетики деформирования при дробемётной обработке

Важно отметить, что при расчёте процесса дробемётной обработки необходимо учитывать изменение напряженно-деформированного состояния пружины, полученное при предыдущей обработке. Такой метод расчёта принято называть расчётом кинетики напряжённо-деформированного состояния.

В качестве исходных данных для расчёта необходимо использовать поле остаточных деформаций сдвига и поле остаточных пластических деформаций сдвига, полученных при расчёте процесса термоосадки. Кроме того, необходимо определить поле внедренной пластической деформации от дробемётной обработки, найденное при травлении образца-свидетеля - тонкой контрольной пластинки, которая помещается в дробемётную камеру вместе с партией пружин.

Определение внедренной пластической деформации по контрольной пластине

Контрольная пластинка, закреплённая на жёстком основании, подвергнута дробемётной обработке с одной стороны, после освобождения

изгибается. Радиус кривизны зависит от полученной пластической деформации, распределённой по глубине нагартованного слоя по некоторому закону

Зависимость между радиусом сферы ρ и прогибом пластины h :

$$2\rho \sin \left[\arccos \left(\frac{\rho - h}{\rho} \right) \right] = \sqrt{a^2 + b^2} = c,$$

где c – диагональ прямоугольника, образованного опорными точками приспособления.

На основании проведенных исследований была разработана методика проектирования технологических процессов изготовления высоконагруженных пружин сжатия, упроченных пластической осадкой, дробеструйной обработкой, термоосадкой, холодной трехкратной осадкой [183, 184, 175, 176]. Общая последовательность проектирования приведена в таблице 14.

Последовательность проектирования технологических процессов
изготовления высоконагруженных пружин сжатия

<p>1. Задание исходных параметров пружины: $d, D, H_0, P_2, n, n_1, c$, рабочий ход h, σ</p> <p>2. Расчет параметров пружины в упругой и пластической областях: $C=(D-d)/d; Z=1000d/C^3 n; H_3=d(n+1,5); \lambda_3=H_0 - H_3; P_3=Z\lambda_3;$ $K_s = 8P_3 C K_c / \pi d^3 \sigma_s; \delta=(P_3 - P_2) / P_3; \tau_1; \tau_2; \tau_3; \tau; n_s.$</p> <p>3. Анализ результатов расчетов, выбор или подтверждение марки пружинной стали. Определение необходимости упрочнения пружины дробеструйной обработкой, термоосадкой, холодной осадкой</p>
<p>4. Построение диаграммы деформирования $\tau - \gamma$ по результатам испытания пружины на осадку</p> <p>5. Расчет напряженно-деформированного состояния пружины при термоосадке, включая величину осадки в момент соприкосновения витков λ; уменьшение высоты пружины после термоосадки $\lambda_{ост}$; наибольшее отрицательное остаточное касательное напряжение τ_{max}</p>
<p>6. Экспериментальное определение внедренной пластической деформации от дробеметной обработки при травлении образца свидетеля, а также расчет поля пластических деформаций</p> <p>7. Расчет распределения остаточных поверхностных касательных напряжений при дробеметной обработке $\tau_{ост. дроб.}$ и их глубины $\delta_{н.}$, остаточной осадки пружины $\lambda_{ост. дроб.}$ с учетом поля остаточных пластических деформаций сдвига на предыдущей операции термоосадки</p>
<p>8. Расчет кинетики деформирования при трехкратной холодной осадке с учетом полей нормальных и сдвиговых остаточных деформаций при предыдущей операции упрочнения. Определение остаточных касательных напряжений $\tau_{ост}$ и остаточной осадки $\lambda_{ост}$</p>
<p>9. Расчет высоты пружины при навивке, после шлифовки, после термоосадки, после дробеметной обработки, после трехкратной холодной осадки</p>
<p>10. Проектирование оснастки</p>
<p>11. Оформление технологической документации</p>
<p>12. Опытная проверка технологии изготовления</p>
<p>13. Испытания на крип и сопротивление усталости</p>
<p>14. Запуск в производство</p>

5.2. Разработка технологического процесса изготовления высоконагруженных пружин сжатия двигателей ВАЗ

Для сравнения и оценки характеристик, от которых зависит качество пружин, включая сопротивление усталости и крип, рассчитали параметры пружин сжатия (клапана) двигателя ВАЗ (рисунок 5.6) [90, 175,176, 95,183, 189, 190].

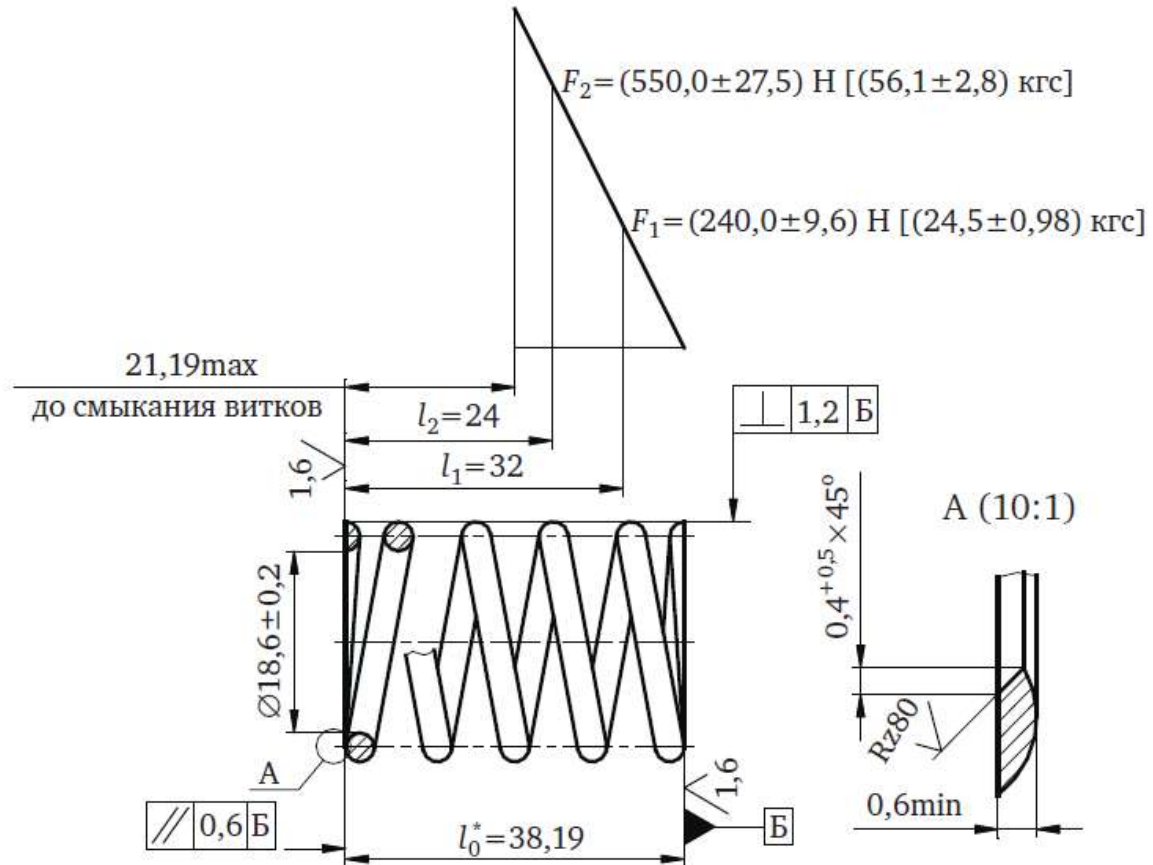


Рисунок 5.6. Пружина сжатия (клапана) двигателя ВАЗ 2112

Расчёт напряжений при нагрузках P_1 , P_2 и P_3 выполнен по формулам

[28]:

$$\tau_i = k \frac{8P_i D_0}{\pi d^3}; \quad k = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0,615}{C}; \quad C = \frac{D_0}{d}$$

Для пружины 2112:

$$C = \frac{22,2}{3,6} = 6,17; \quad K = \frac{4 * 6,17 - 1}{4 * 6,17 - 4} + \frac{0,615}{6,17} = \frac{23,68}{20,68} + 0,0997 = 1,245$$

$$\tau_2 = 1,245 * \frac{8 * 56,1 * 22,2}{\pi * 3,6^3} = 84,67 \quad \text{кгс/мм}^2$$

$$\tau_1 = \tau_2 * \frac{P_1}{P_2} = 84,67 * \frac{24,5}{56,1} = 37,5 \quad \text{кгс/мм}^2$$

$$\tau_3 = \frac{\tau_2}{1 - \delta} = \frac{84,7}{1 - 0,24} = 111 \quad \text{кгс/мм}^2$$

Для пружины 2101:

$$K = \frac{4 * 8,08 - 1}{4 * 8,08 - 4} + \frac{0,615}{8,08} = \frac{31,32}{28,32} + 0,076 = 1,18$$

$$\tau_2 = 1,18 * \frac{8 * 46,1 * 29,1}{\pi * 3,63} = 86,4 \quad \text{кгс/мм}^2$$

$$\tau_1 = \tau_2 * \frac{P_2}{P_1} = 86,4 * \frac{28,9}{46,5} = 54,5 \quad \text{кгс/мм}^2$$

$$\tau_3 = \frac{\tau_2}{1 - \delta} = \frac{86,4}{1 - 0,137} = 100,0 \quad \text{кгс/мм}^2$$

Проверка устойчивости при осадке.

Условие, при котором не теряется устойчивость $H_0/D \leq 2,6$ – в упругой области.

Для пружины 2101: $H/D = 50/32,7 = 1,53$;

Для пружины 2112: $H/D = 38,19/25,8 = 1,48$;

Устойчивость при осадке достаточна, гильза или оправка для осадки не нужна.

Сравнительная жесткость Z и податливость ΔH_1 при выборе допуска на нагрузку P_1 .

Для пружины 2112:

$$Z = \frac{P_2 - P_1}{h} = \frac{56,1 - 24,5}{8} = 3,95 \quad \text{кгс/мм}$$

$$\Delta H_1 = \frac{2 \cdot \Delta P_1}{Z} = \frac{2 \cdot 0,98}{3,95} = 0,496 \approx 0,5 \quad \text{мм}$$

Для пружины 2101:

$$Z = \frac{46,1 - 28,9}{9,7} = 1,773; \quad \Delta H_1 = \frac{2 \cdot 1,5}{1,773} = 1,69 \approx 1,7 \quad \text{мм}$$

Проверка запаса по циклической долговечности.

В работе [164] приведена зависимость циклической долговечности пружин из проволоки Отева 60, которая соответствует по химическому составу и свойствам стали 70ХГФА-Ш, от амплитуды напряжений ($\tau_2 - \tau_1$), т.е., от показателя $r = \tau_1 / \tau_2 = P_1 / P_2$ (см. рисунок 5.7)

Для пружины 2101: $r = 534 / 846 = 0,63$;

Для пружины 2112: $r = 375,7 / 819,7 = 0,46$;

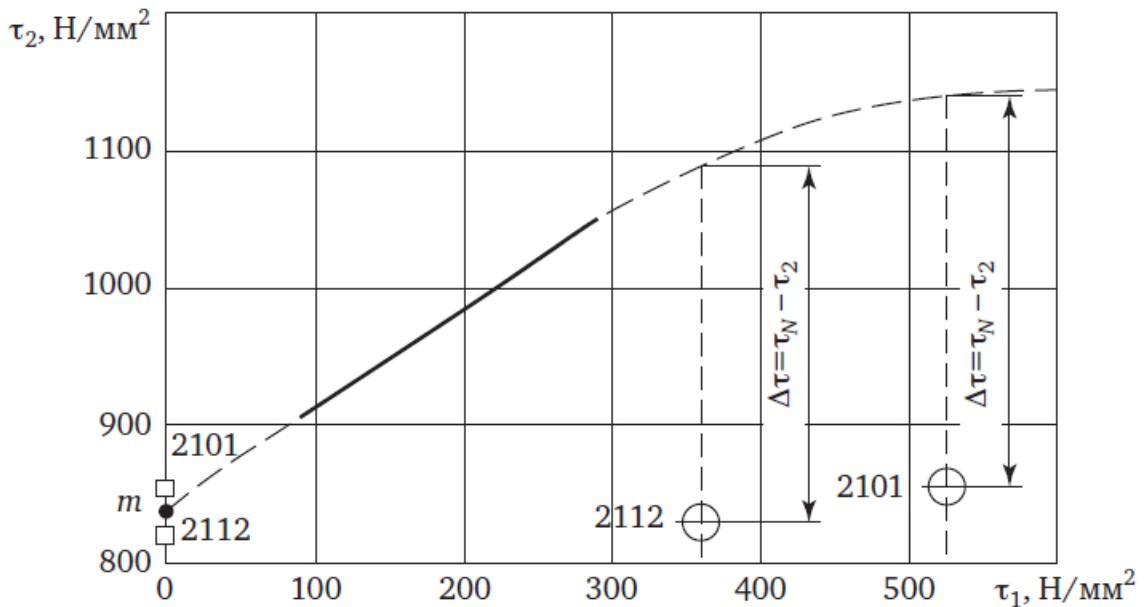


Рисунок 5.7. Зависимость циклической долговечности пружин из стали Отева 60 от касательных напряжений $\tau_2 - \tau_1$ [164]

Кривая на графике в пределах $\tau_1 = 100-300$ МПа соответствует циклической долговечности $N_{ц} \geq 25 \cdot 10^6$ пружин, изготовленных по обычной технологии.

Кривую на графике аппроксимировали с учетом наибольших допускаемых напряжений τ_2 .

Характеристику запаса циклической долговечности n_τ рассчитали исходя соотношения напряжений:

$$n_\tau = \tau_N / \tau_2 = 1140 / 846 = 1,347 \text{ — для 2101;}$$

$$n_\tau = \tau_N / \tau_2 = 1065 / 820 = 1,299 \text{ — для 2112.}$$

В соответствии с диаграммой Смита (см. рисунок 5.8) подтверждено, что что предел выносливости по напряжениям у пружины 2112 меньше, чем у пружины 2101.

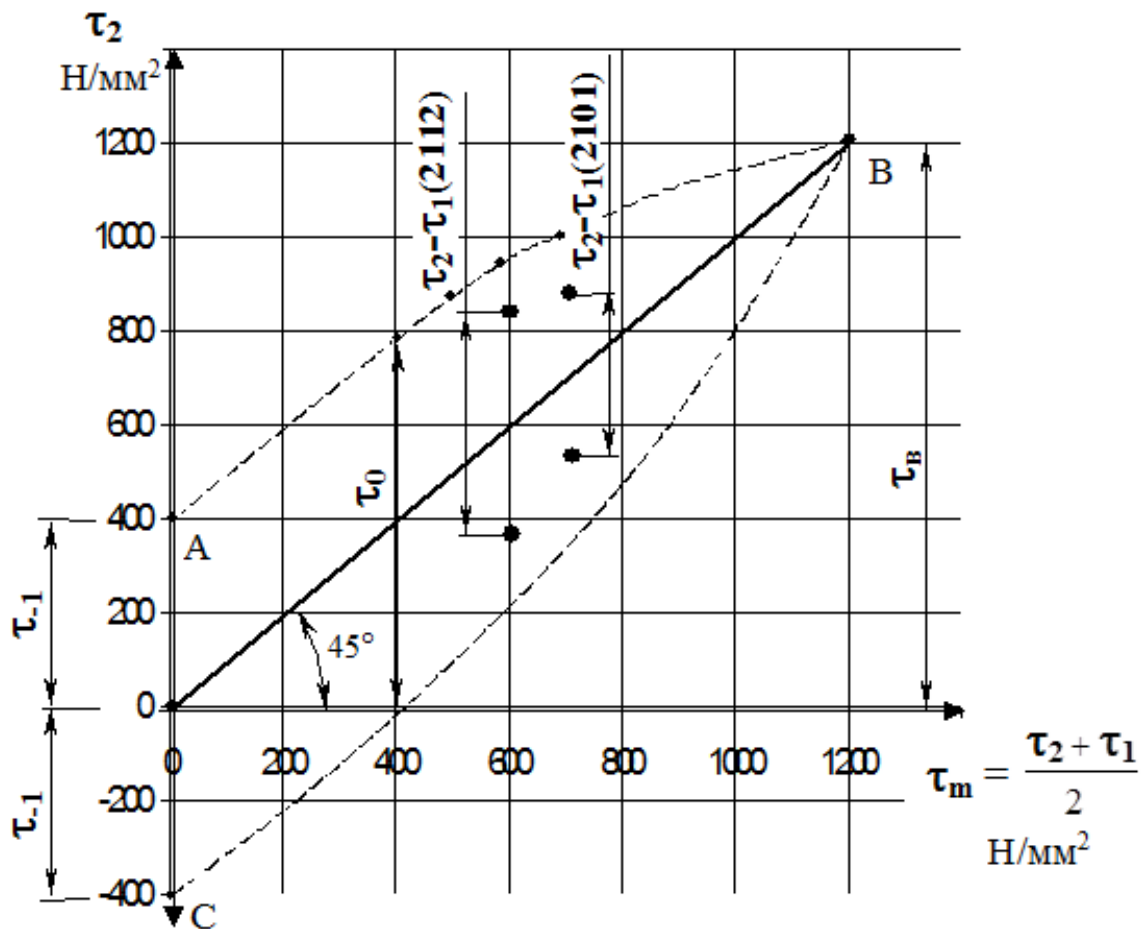


Рисунок 5.8. Диаграмма Смита для пружин сжатия двигателя ВАЗ

Технологические расчеты включают определение размеров пружин перед осадкой, расчет деформации при горячей осадке, остаточной деформации, получаемой в результате пластической осадки, дробеметной обработки, определение поля остаточных касательных напряжений.

Исследования показали, что после горячей осадки пружины имеют более высокие показатели циклической долговечности, чем после холодной осадки.

При горячей осадке пружина сжимается до соприкосновения витков. В расчетах принято $\lambda=26$ мм.

Связь между осадкой λ и относительным углом закручивания θ установлена выражением $\lambda = 2\pi R^2 n \theta$, а деформацию сдвига при известном θ

определяют по формуле $\gamma = R \frac{\theta}{R + \rho \cdot \cos \alpha} \cdot \rho$ Касательные напряжения τ

определяют при нагружении по заданной диаграмме сдвига $\tau = F(\gamma)$ для $T = 400$ °С и при разгрузке для $T = 20$ °С.

Крутящий момент при термоосадке найден из выражения $T = \int_s \tau \rho dS = GR\theta W^*$. Считая разгрузку упругой, нашли размах напряжений

при снятии нагрузки по формуле $\tau = \frac{T\rho}{(R + \rho \cdot \cos \alpha) \cdot W^*}$. Остаточные

напряжения после термоосадки определили суммированием напряжений при нагружении и разгрузке. Результаты расчета показаны в таблице 15.

Результаты расчета

Величина осадки в момент соприкосновения витков при горячей осадке λ , мм	Уменьшение высоты пружины после горячей осадки $\lambda_{ост}$, мм	Максимальное отрицательное остаточное напряжение $\tau_{ост}^{max}$, МПа
26	4,1	358

Из расчета видно, что максимальные остаточные напряжения возникают в точке на внутренней поверхности пружины.

Расчёт параметров осадки пружины 2112 проведён также с уменьшением предела прочности материала. Величина термоосадки для опытной партии пружин составила $\Delta l = 4,8$ мм. Для сравнения, величина осадки по методике, изложенной в работе [194], равна 4,1 мм, т.е. несовпадение составляет – 14,6 %.

Расчет кинетики деформирования при дробеметной обработке ведут последовательными шагами, учитывая изменение НДС в предыдущем расчете.

В качестве исходных данных для расчета используют поле остаточных деформаций сдвига и поле остаточных пластических деформаций, полученных при расчете процесса горячей осадки. Кроме того, используют поле внедренной пластической деформации от дробемета на образце-свидетеле, т.е. тонкой контрольной пластины, которую помещают в дробеметную камеру вместе с партией пружин.

Для определения пластической деформации по толщине наклепанного слоя составили матричную модель. Процедура решения реализована в пакете

Mathcad. Распределение пластических деформаций от дробеметного наклепа по глубине пластинки (сечению витка пружины) приведено в работе [194].

Поле нормальных напряжений после дробеметной обработки, рассчитанное с применением построенной матричной модели, показано на рисунке 5.9.

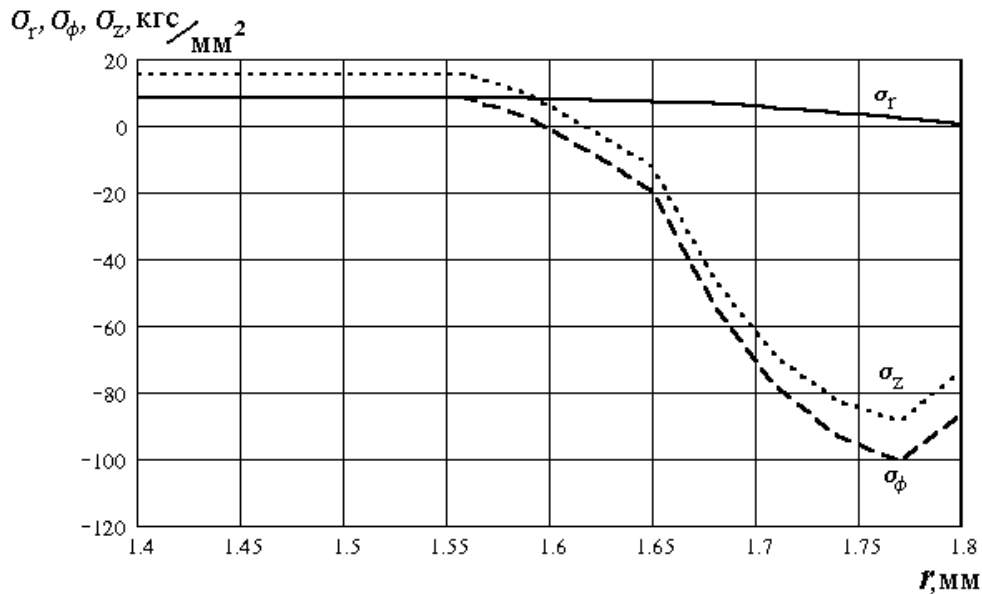


Рисунок 5.9. Нормальные напряжения после дробемётной обработки

Результаты расчета распределения остаточных касательных напряжений после обработки дробью и остаточной осадки, реализованные в пакете Mathcad показаны в статье [194]. Величина остаточной осадки после дробеметной обработки составила, по расчету, $\lambda_{ост.} = 3,44$ мм. Так как после термоосадки остаточная деформация составляет 4,1 мм, то в результате дробеметной обработки пружина увеличивает длину на $(4,1 - 3,44) = 0,66$ мм.

Осадка при повторном заневоливании (3-х кратная холодная осадка):

$$\lambda_{нов} = \lambda - \lambda_{ост} + \lambda_{ост.дроб.},$$

где λ – осадка при первом заневоливании; $\lambda_{ост}$ – остаточная осадка после заневоливания, $\lambda_{ост.дроб.}$ – остаточная осадка после дробемётной обработки.

В результате расчета получены распределение остаточных касательных напряжений после повторного заневоливания и величина остаточной осадки

$$\lambda_{\text{ост}} = 4,17 \text{ мм.}$$

Так как после дробеметной обработки остаточная осадка составляла 3,44 мм, то в результате повторного заневоливания длина пружины уменьшается на

$$\Delta\lambda = (4,17 - 3,44) = 0,73 \text{ мм.}$$

Таким образом, рассчитав НДС, возникающие в пружине в ходе упрочняющих операций, установлено, что дробеструйная обработка частично снимает остаточные касательные напряжения на поверхности пружины. Но проводимое повторное заневоливание их снова восстанавливает. Напряжения в опасной точке (на внутреннем горизонтальном радиусе) $\tau_{\text{max}} = -37,84 \text{ кгс} / \text{мм}^2$, что оказалось выше, чем при термоосадке ($\tau_{\text{max}} = -30,48 \text{ кгс} / \text{мм}^2$).

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 16. С уменьшением температуры при осадке нужно уменьшать исходную высоту пружины, т.к. она уменьшает свою остаточную деформацию и при холодной осадке остаточная деформация составляет всего 1,5 мм. Эти исходные данные получены в ходе экспериментов.

По данным Пономарева С.Д., при температуре 240 °С модуль упругости и предел текучести еще не изменяются. А при температуре 380...400 °С эти изменения становятся значительными.

Несмотря на уменьшение глубины пластической зоны в сечении витка вариант 2 новой технологии создаёт остаточные касательные напряжения почти такие же, как и более энергозатратный вариант 1. При этом уровень выносливости и релаксационные свойства (как показали эксперименты) удовлетворяют требованиям чертежа. Это говорит о том, что при температуре 240 °С (по сравнению с 380 °С) ещё происходит низкотемпературное термомеханическое упрочнение. Уровень остаточных напряжений на внутреннем волокне настолько высокий, что в этой опасной точке реализуется более благоприятный симметричный цикл нагружения.

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

Таблица 16

Результаты расчета остаточных напряжений в сечении витка

Параметры (формула)	Варианты технологии		
	1	2	3
Вводимые параметры			
Температура при осадке, °С	380	240	20
Условный предел текучести, τ_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, λ_3 , мм	26	23,5	21
Остаточная деформация ΔH , 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
Расчётные параметры			
A	0,114	0,129	0,145
a	1,29	1,457	1,64
Rz	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, мм	0,51	0,34	0,16

В результате была разработана новая технология изготовления пружины сжатия двигателя ВАЗ [1, 90, 91, 95, 175], включающая следующие операции (Приложение):

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. Измеряется диаметр проволоки, эллипсность сечения, предел прочности на разрыв. Проводятся испытания на кручение и на навивку.
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. Цель отпуска – частично снять остаточные напряжения изгиба и ускорить старение материала. У пружин увеличивается нагрузка P_s , соответствующая началу появления остаточных деформаций.
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 дроби, изношенности дроби и др. Дробь ДСЛ 0,5 545 ГОСТ 11964-81. Стрела прогиба контрольной пластинки $A \geq 0,35 \pm 0,05$ мм. На поверхности пружины создаются двусторонние напряжения сжатия, препятствующие раскрытию усталостных трещин

8. Термомеханическая. Печь «Fiat», (Италия). Температура $240 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ Время нагрева 8 мин. Горячая осадка пружины, выдержка 3-4 сек., подача эмульсии. Пружины с цветами побежалости, начиная с бледно-красного ($255 \text{ }^\circ\text{C}$), фиолетового ($295 \text{ }^\circ\text{C}$) являются недопустимым браком.

Цель термоосадки – создать на поверхности пружины отрицательные касательные напряжения, что увеличит нагрузочную способность, релаксационную стойкость и сопротивление усталости пружин.

9. Промывка. Моечная машина 141-021

10. Холодная 3-х кратная осадка и контроль по нагрузке.

Установка АЕ-3.1000. Осадить пружины до соприкосновения витков 3 раза и сортировать по P_1 , P_2 , N_3 с определением % заниженных и завышенных по нагрузке 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

Выполненный расчет характеристик упрочнения высоконагруженной пружины сжатия двигателя ВАЗ 2108 согласно методике, изложенной в работе [77] позволил установить недостаточность степени горячей осадки. Был выявлен большой недоход до соприкосновения витков, который оказывает решающее влияние на низкое сопротивление усталости при испытании на циклическую долговечность. По этой же методике [77] были выполнены расчеты технологических параметров пружин сжатия (клапана) 2101-1007021, 2108-1007021. Разработанные технологии успешно внедрены в производство.

Математическая модель упрочнения [90, 194] позволила рассчитать остаточные напряжения от термоосадки (горячей осадки), т.к. учитывает влияние предыдущей технологической операции нового техпроцесса – дробеметной обработки. Расчетная величина остаточной деформации при этом составила $\lambda_{ост} = 2,90\text{мм}$.

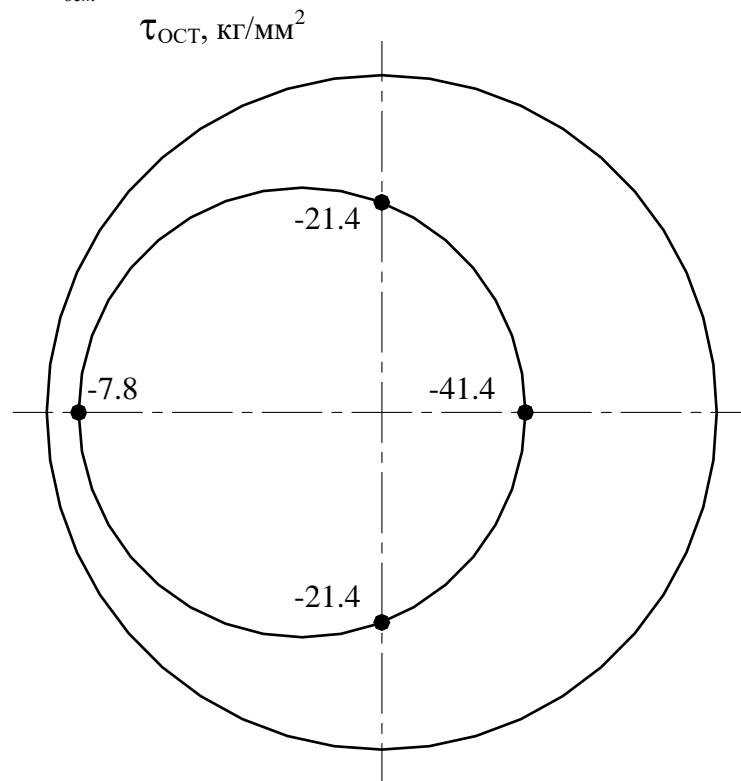


Рисунок. 5.10. Остаточные касательные напряжения на поверхности пружины

Анализируя результаты расчета и сравнивая их с расчетом по методике Пономарева С.Д., можно отметить следующее::

1. Различие в результатах расчетах остаточных касательных напряжений незначительны и составляют $41,4 - 39,8 = 1,6 \text{ кг/мм}^2$ или 3,8%.
2. Несовпадение величины расчетной пластической осадки и экспериментальной ее величины составляет $3,5 - 2,9 = 0,6 \text{ мм}$ или 14,5%, что в принципе допустимо для инженерных расчетов, учитывая гипотезы, допущения и сложность расчетов, а также учитывая рассеивание экспериментальных данных от партии к партии.
3. Созданные касательные напряжения $\tau_{\text{ост}}$ на внутренней поверхности пружины при использовании новой разработанной технологии имеют величину, не меньшую, чем при традиционной технологии. Это связано с тем, что пластические сдвиговые деформации наружных наклепанных слоев больше, чем ненаклепанных, т.к. пластическое состояние возникает при меньших сдвиговых деформациях из-за наличия напряжений сжатия от дробеметной обработки, т.е. в соответствии с условием пластичности.

Особенности новой технологии и ее преимущества состоят в следующем:

изменяется последовательность упрочняющих операций, т.е. сначала осуществляется дробеметная обработка, а после этого - термоосадка.

изменяется температура при термоосадке с $380 \text{ }^\circ\text{C}$ на $240 \text{ }^\circ\text{C}$. это связано главным образом с тем, что при более высоких температурах происходит релаксация напряжений двухстороннего сжатия на поверхности пружины, т.е. снимаются напряжения от дробеметного наклепа, кроме того, при температуре более $250 \text{ }^\circ\text{C}$ начинается интервал температур цветов побежалости, т.е. зона сравнительно хрупкого состояния металла.

- аннулируются две технологические операции: предварительная дробеметная обработка и отпуск после дробеметной обработки.

- появляется возможность перенести сортировочную головку с автоматов типа АЕЗ.1000 на револьверный диск печи для термоосадки ФИАТ, т.е. исключить целую технологическую операцию «сортировка» с ручной загрузкой;

сокращается количество и длина транспортных перемещений, появляется возможность сгруппировать в поточную линию оборудование для пружины 2112, с разрывом этой линии на дробеметной обработке. (Здесь не обойтись без накопителя деталей разовой загрузки 45кг);

- в связи с тем, что дробеметная обработка происходит до термоосадки и не снимает эффект от последней, появляется возможность изменить режимы наклепа, т.е. применить более крупную дробь, но уменьшить скорость. Если применить рубленную дробь, то должен уменьшиться износ лопаток дробеметного барабана;

- повышается точность пружин по нагрузке. Особенно это важно для пружины 2112, т.к. допуск на нагрузку у нее выбирается при деформации $\Delta H=0,75$ мм., а колебания высоты при традиционной обработке значительно выше.

- разработанная технология позволяет обеспечить выполнение требований чертежа по релаксационной стойкости и по сопротивлению усталости.

5.3. Выводы

1. Разработана методика проектирования технологических процессов изготовления высоконагруженных пружин сжатия, включающая:

- расчет всех конструкторских и силовых параметров пружины в упругой и пластической областях:

- корректировку чертежа пружины (при необходимости), выбор или подтверждение марки пружинной стали. Определение необходимости упрочнения пружины дробеструйной обработкой, термоосадкой, холодной осадкой.

- расчет напряженно-деформированного состояния пружины при горячей осадке, включая величину осадки λ в момент соприкосновения витков; уменьшение высоты пружины после горячей осадки $\lambda_{ост}$; наибольшее отрицательное остаточное касательное напряжение τ_{max} .

- экспериментальное определение внедренной пластической деформации от дробеметной обработки при травлении образца свидетеля, а также расчет поля пластических деформаций.

- расчет распределения остаточных поверхностных касательных напряжений при дробеметной обработке тост.дроб. и их глубины δ_n , остаточной осадки пружины $\lambda_{ост.дроб.}$ с учетом поля остаточных пластических деформаций сдвига на предыдущей операции термоосадки.

- расчет кинетики деформирования при трехкратной холодной осадке с учетом полей нормальных и сдвиговых остаточных деформаций при предыдущей операции упрочнения. В результате расчета получают распределение остаточных касательных напряжений $\tau_{ост}$ и остаточной осадки $\lambda_{ост}$.

- прогнозирование сопротивления усталости.

2. Разработана новая энергосберегающая технология пружин сжатия (клапана) автомобиля ВАЗ 2101-1007020, 2101-1007021, 2108-1007020, 2108-1007021, 2112-1007020).

При испытаниях изготовленных пружин по новой технологии установлено, что:

- сопротивление усталости пружин соответствует требованиям чертежа;

- повысилась устойчивость к температурной релаксации нагрузки в 1,7 раза;

- устранен брак по геометрической точности, а именно по непараллельности и перпендикулярности опорных торцов пружин, а также по высоте пружин;

- уменьшился расход электроэнергии при горячей осадке на 37%, а также за счет отмены отпуска после дробеметного наклепа;

- исключена операция отпуска после технологической операции дробеметного наклепа.

Глава 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРУЖИН СЖАТИЯ

6.1. Метод травления пружин и контрольной пластинки

Для проверки величины и знака напряжений на поверхности после горячей осадки пружины обработаны в кислоте при $t \sim 80$ °С в течение 3 ч [186]. В таблице 17 и на рисунке 6.1 показана зависимость уменьшения высоты пружины от уменьшения диаметра проволоки при травлении.

Таблица 17

Зависимость уменьшения высоты пружины от уменьшения диаметра проволоки при травлении

Марка стали	Параметр	Значения параметров						
70ХГФА-Ш ¹⁾	H ₀	40,6	40,8	40,8	41	41,3	41,5	41,7
	d	3,6	3,41	3,35	3,2	3,1	3,0	2,8
Oteva 60 ²⁾	H ₀	40,0	40,8	41	41,2	41,3	41,5	-
	d	3,6	3,4	3,25	3,15	3,05	2,9	-

Примечание:

- 1) Пружина обработана дробью;
- 2) Пружина после горячей осадки без обработки дробью.

Высоты пружин, указанные в таблице $H_{\text{табл.}} = H_{\text{измер.}} + \Delta d$; Δd – величина уменьшения диаметра проволоки.

При сравнении экспериментальных кривых можно сделать вывод, что остаточные напряжения пружины после горячей осадки были выше, чем у пружин после горячей осадки и дробеметного наклепа [90, 167].

Обработанная дробью контрольная пластинка была также подвергнута травлению в кислоте HCl. Прогиб пластинки зависит от двух параметров:

уровня напряжений σ_1 и σ_2 (σ_n), созданных на поверхности наклепом, и глубины наклепа δ_n . Напряжения максимальны на поверхности и уменьшаются вглубь, переходя в уравнивающие напряжения растяжения.

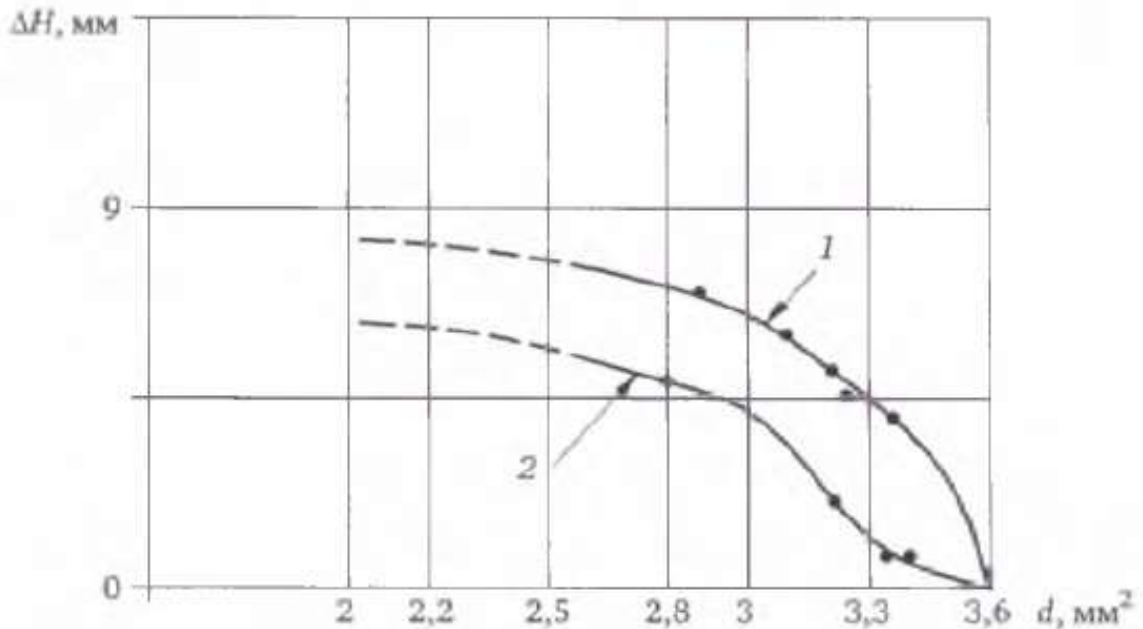


Рисунок 6.1. Зависимость уменьшения высоты пружины от уменьшения диаметра проволоки при травлении: 1 – проволока Отева 60, после горячей осадки. 2 – Проволока 70ХГФА-Ш, после горячей осадки и дробеметного наклепа при $\delta=0,25$ мм

Твердость контрольной пластинки должна соответствовать твердости поверхности пружины, т.е. составлять $HRC_{\Sigma}=46\dots48$.

В первом приближении глубину наклепа δ_n можно определить травлением в кислоте. График изменения стрелы прогиба Δ пластинки в зависимости от изменения её толщины h приведен на рисунке 6.2

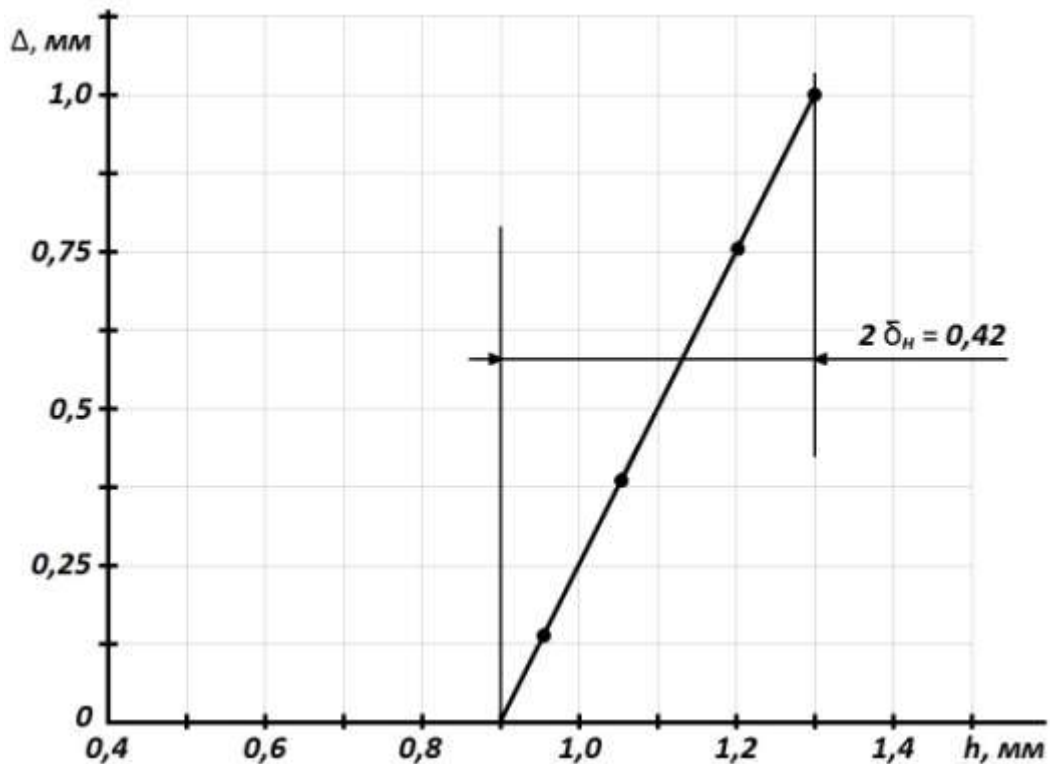


Рисунок 6.2. График изменения стрелы прогиба пластинки в зависимости от уменьшения ее толщины при травлении

Из рисунка 6.2. видно, что пластинка полностью выпрямится при уменьшении её толщины с 1,32 до 0,9 мм.

Была проведена экспериментальная проверка зависимости глубины наклепа и её стрелы прогиба h от твердости пластинки. Были изготовлены две партии пластинок с разной твердостью. Пластинки были подвергнуты дробеметной обработке в камере одновременно с пружинами. Одна из партий пластинок после наклепа подвергнута травлению в горячей кислоте с целью определения глубины наклепа при разной твердости HRCэ.

Из таблицы 18 и рисунка 6.3 видно, что стрела прогиба пластинки изменяется незначительно при разной твердости. В работах [54, 86, 187] установлено, что с увеличением твердости материала уменьшается глубина наклепа, при этом увеличиваются напряжения сжатия. Например, на сталях, не подвергнутых термоулучшению, толщина наклепанного слоя составляет

до 0,8 мм, а остаточные напряжения на поверхности $\sigma_1 \approx \sigma_2 = 400 \dots 450$ МПа. При возрастании твердости толщина наклепанного слоя δ будет меньше и составит 0,21 мм, однако $\sigma_1 \approx \sigma_2 \geq 100$ МПа. На рисунке 6.4 показаны эпюры этих напряжений, созданные при дробеметной обработке пластинок разной твердости, из площади эпюр видно, что они создают примерно одинаковые изгибающие моменты прогиба пластинок.

Таблица 18

Зависимость стрелы прогиба контрольной пластинки от её твердости

№ пластинки	Твердость HRC _э	Стрела прогиба h, мм
1	47	0,32
2	52	0,32
3	60	0,33

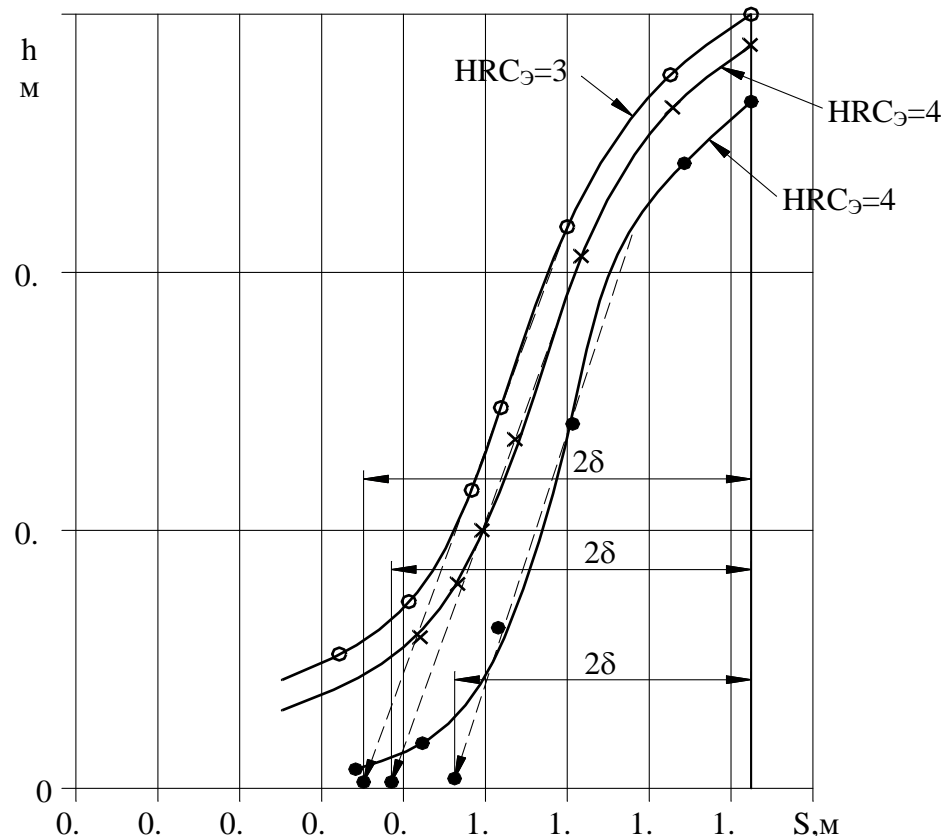


Рисунок 6.3. Изменение стрелы прогиба h от толщины пластинки S при разной твердости после кислотной обработки; δ_i – толщина упрочненного слоя

Влияние уменьшения толщины пластинки S разной твердости при травлении на стрелу прогиба h

HRC ₃ =46		HRC ₃ =41		HRC ₃ =37	
S	h	S	h	S	h
1,32	0,275	1,32	0,300	1,32	0,310
1,26	0,250	1,25	0,285	1,26	0,285
1,14	0,150	1,14	0,225	1,13	0,235
1,08	0,100	1,07	0,180	1,07	0,195
1,03	0,060	1,03	0,145	1,02	0,160
0,97	0,030	0,99	0,097	0,98	0,115
0,94	0,025	0,95	0,065	0,93	0,070
0,91	0,010	0,915	0,050	0,90	0,055
0,83	0,005	0,84	0,025	0,82	0,030

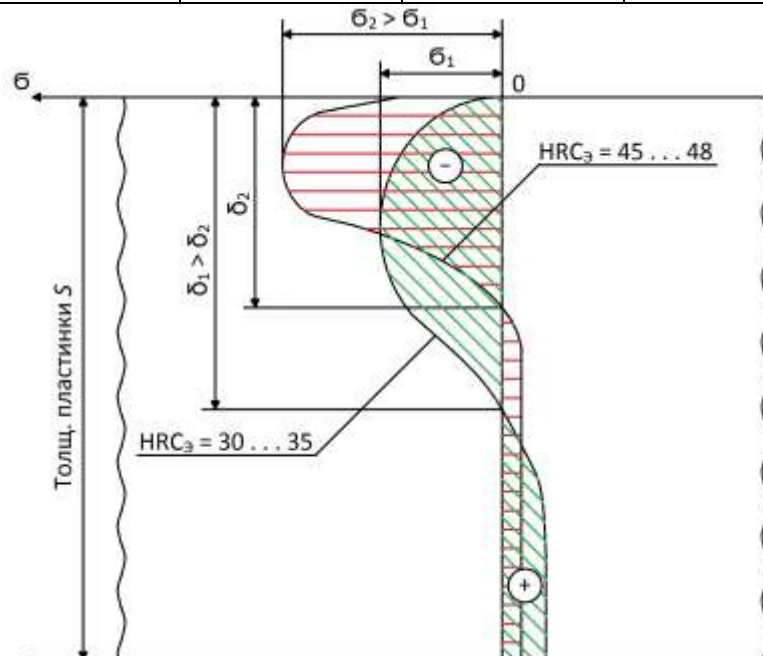


Рисунок 6.4. К объяснению причин малого влияния твердости пластинки на величину стрелы прогиба

6.2. Определение напряжений на поверхности пружин, образующихся при дробеметном наклепе

Для определения остаточных напряжений на поверхности были подготовлены пружины сжатия двигателя ВАЗ. Исходная проволока d 3,6 мм из стали 70ХГФА-Ш. Стрела прогиба при дробеметной обработке 0,41 мм. Дробь ДСЛ-0,5. Продолжительность 16 мин.

Маршруты обработки:

1 партия – без отпуска после дробеметной обработки;

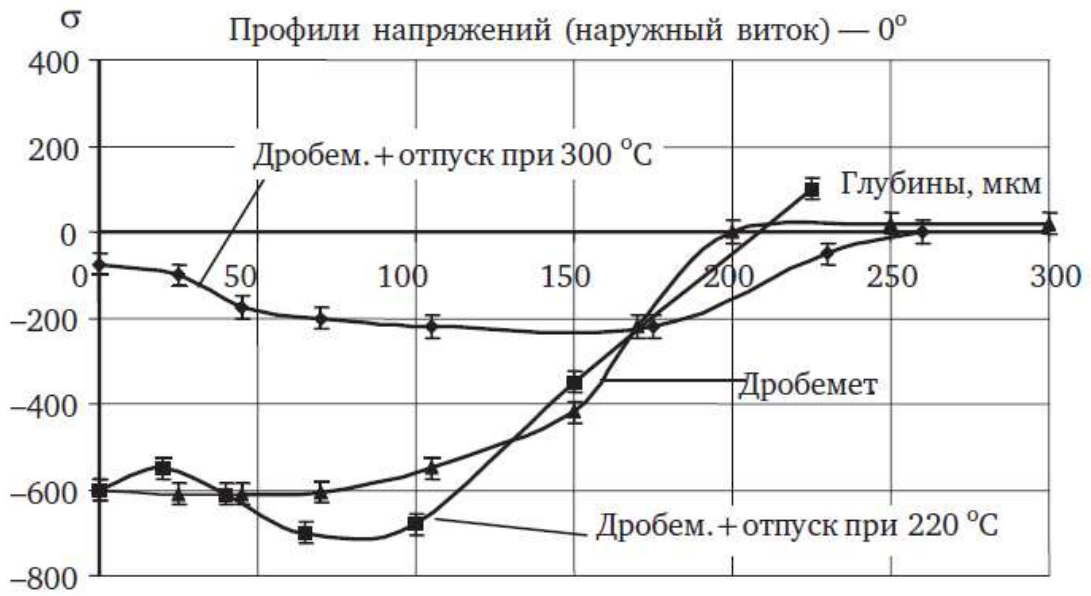
2 партия – с термообработкой 220 °С продолжительностью 0,5 часа;

3 партия - с термообработкой 350 °С продолжительностью 0,25 часа

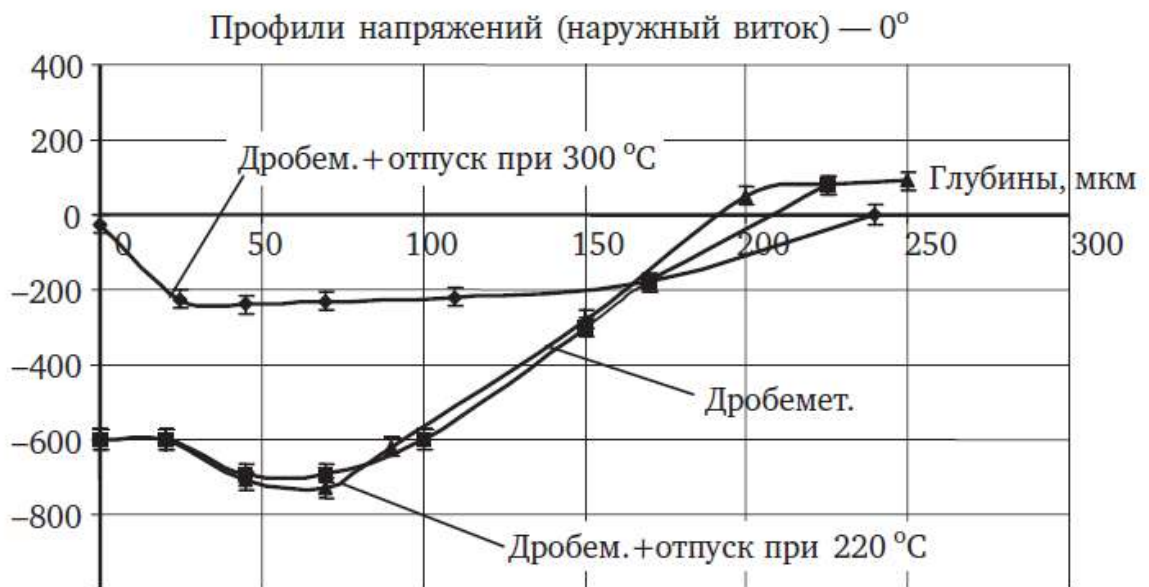
С помощью рентгеновского дифрактометра “XSTRESS 3000” на фирме Сонат были сделаны измерения остаточных напряжений на поверхности и под слоем от дробеметной обработки. Следует отметить, что прибор “XSTRESS 3000” является элементом отладки и контроля отклонения при выполнении процесса обработки поверхности.

Измерения напряжений под слоем осуществлялись после дискретного удаления материала с поверхности. Погрешность метода измерений напряжений ± 40 МПа, или $\sim 5\%$ от максимального уровня.

Величины измерений вдоль проволоки витка показаны на рисунке 6.5 и в Приложении.



а



б

Рисунок 6.5 - Профили напряжений сжатия: а) внешняя поверхность;
б) внутренняя поверхность

6.3. Выводы

1. Напряжение на поверхности пружин из партии 1 и 2 имеют профили напряжений и деформации, отличающиеся от пружин из партии 3.
2. Напряжение на всех поверхностях пружин из партий 1 и 2 находится в интервале от 400 МПа до 600 МПа.
3. Максимальное напряжение пружин из партий 1 и 2 находится в интервале от 600 МПа до 800 МПа. Затронутая обработкой глубина находится в интервале от 180 мкм до 250 мкм.
4. Пружины из партии 3 характеризуются напряжением поверхности порядка 50 МПа. Максимум сжатия – между 250 МПа и 300 МПа. Затронутая обработкой глубина находится в интервале 200 – 250 мкм.
5. Разница деформации и контура напряжений пружин из партии 3 и партии 1 и 2 может объясниться последующей за дробеметной обработкой термообработкой пружин из партии 3.

Глава 7. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРУЖИН СЖАТИЯ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ. ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ ВЕЛЕРА В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ $\tau_0 - N_{ц}$

7.1. Испытания опытных и опытно-промышленных партий пружин на циклическую долговечность

Пружины, изготовленные по традиционной и новой технологии, испытывались на циклическую долговечность [106, 142, 182, 190].

Конструкция и технические возможности испытательного стенда (рисунок 7.1) вызывают необходимость уменьшить его загрузку, если пружины создают значительную статическую нагрузку при их сжатии в период разгона привода до резонансного режима. Такое ограничение рассчитывается по формуле:

$$A \cdot n = 70,$$

где A - амплитуда колебаний, м;

n - число колебаний в минуту.

Например, если амплитуда составляет $A=34$ мм, то число колебаний в минуту не должно быть больше, чем:

$$n = 70/0,034 \leq 2060$$

Пружины устанавливали на стенд, как показано на рисунке 7.1.

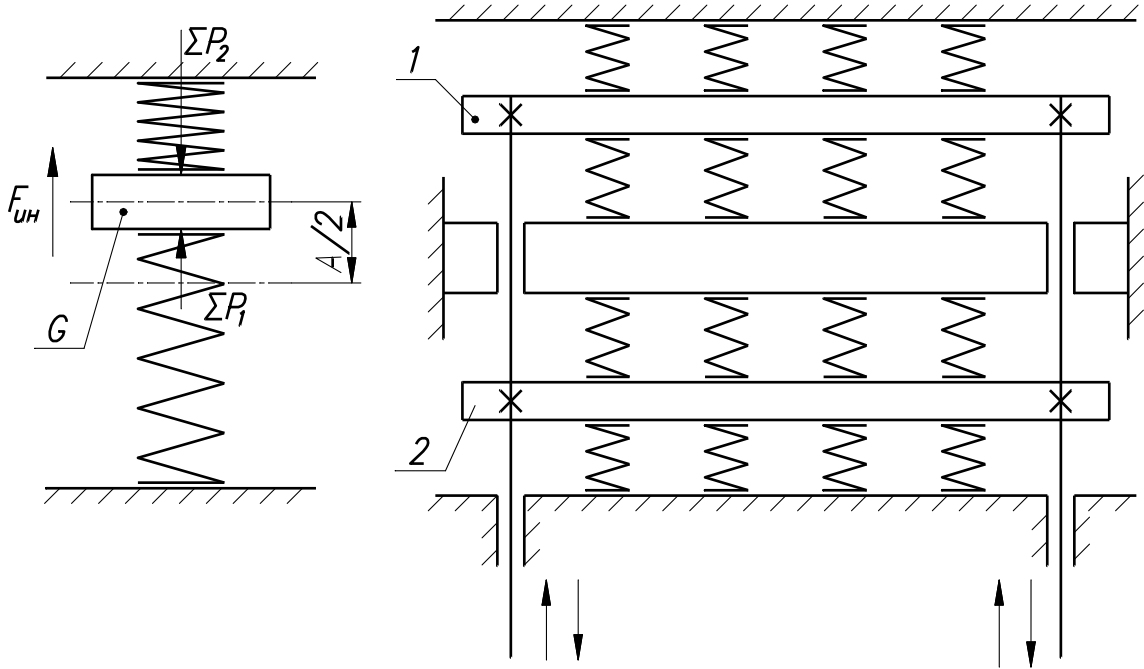


Рисунок 7.1. Динамическая модель испытательного стенда

Зависимость циклической долговечности пружин $N_{ц}$ от условных напряжений $\tau_2^{усл}$ показана на рисунке 7.2. На данном рисунке показаны следующие партии пружин со следующими обозначениями:

- - $N=23 \times 10^6$, Высота $H=39-39,5$ мм, $r = 0,1$; $P_2 = 58,7$ кг
- $N=12,5 \times 10^6$, Высота $H=42-43$ мм, $r = 0,175$; $P_2 = 68,5$ кг
- - $N=9,8 \times 10^6$, Высота $H=43,5-44,5$ мм, $r = 0,24$; $P_2 = 75,3$ кг
- , - $N=4,5 \times 10^6$, Высота $H=43,5-44,5$ мм, $r = 0,1$. При горячей осадке $\lambda_{ост} = 4$ мм вместо 5-6 мм.
- - $N=0$; $r = 0,1$; $P_2 = 56,5$ кг. Отпуск после дробеметной обработки не проводился.
- × - $N=9,9 \times 10^6$; $r = 0,1$; $P_2 = 63,7$ кг. С рисками на пружинах после навивки.
- - $N=0,16 \times 10^6$; $r = 0,05$; $P_2 = 75,2$ кг. Амплитуда $A=20$ мм.
- Δ - $N=0,14 \times 10^6$; $r = 0$; $P_2 = 66,5$ кг. Амплитуда $A=20$ мм. Высота пружины 44

мм. Дробь 0,8 мм. После холодной трехкратной осадки $\lambda_{\text{ост}} > 5$ мм

* - $N=0,28 \times 10^6$; $r = 0,25 \dots 0,28$; $P_2 = 66,2$ кг. Амплитуда $A=17$ мм. После холодной трехкратной осадки $\lambda_{\text{ост}} \leq 5$ мм.

Θ - $N=1,06 \times 10^6$; $r = 0,25 \dots 0,3$; $P_2 = 67,9$ кг. $A=17$ мм. После холодной трехкратной осадки $\lambda_{\text{ост}} = 1,7 \dots 2$ мм

Пружины проходили осадку по высоте от 38 до 24 мм. Цикл нагружения асимметричный.

Для проведения обычных испытаний, заданных чертежом пружины 6×10^6 циклов продолжительность испытаний при отнулевом цикле напряжений составит $m = N / n \cdot 60 \cdot 8 \text{ч} \cdot K = 89$ часов,

где N – заданное количество испытательных циклов; $K = 0,7$ - коэффициент использования машинного времени, учитывающий простои при загрузке, остановки для замены разрушенных пружин и др.; n – частота колебаний в минуту.

Продолжительность обычных испытаний при $26,1 \times 10^6$ циклов составляла 387 часов работы стенда.

Условные напряжения $\tau_{\text{усл}}$ (рисунок 7.2) определяли по формуле:

$$\tau_2^{\text{усл}} = \tau_{\text{ном}} \cdot P_i / P_{\text{ном}} = 829 \cdot P_i / 56,1 = 14,8 P_i \text{ МПа},$$

где $\tau_{\text{ном}}$ и $P_{\text{ном}}$ - номинальные напряжения и нагрузка P_2 ;

P_i - нагрузка P_2 , измеренная у каждой пружины при $H=24$ мм перед установкой на испытательный стенд.

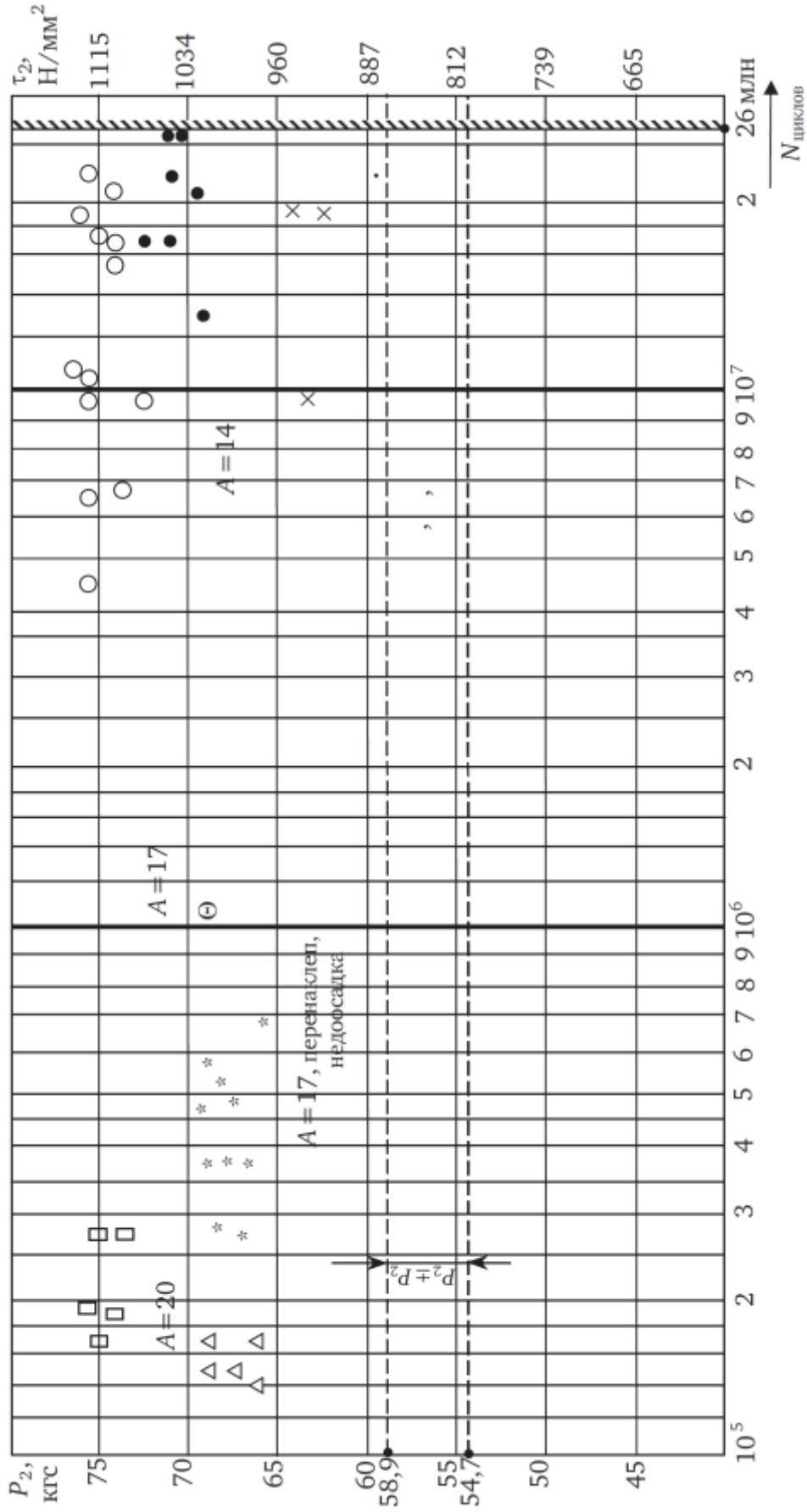


Рисунок 7.2. Величины сил и напряжений при испытаниях.

На рисунке 7.3 показаны величины напряжений $\tau_{\text{усл}}$ при разной высоте образцов пружин. Расчет напряжений выполнен по следующим формулам:

$$\tau_2' = \tau_2 \frac{P_2^{\text{средн}}}{P_2^{\text{ном}}} = 829 \frac{71}{56,1} = 1049 \text{ н/мм}^2,$$

где $P_2^{\text{средн}}$ – (кгс) среднее измеренное значение нагрузки перед установкой на вибростенд.

$$\tau_2'' = 829 \frac{75}{56,1} = 1108 \text{ н/мм}^2$$

$$\tau_1' = \tau_2 \frac{42 - 38}{42 - 24} = 829 \frac{4}{18} = 184 \text{ н/мм}^2$$

$$\tau_1'' = \tau_2 \frac{44,5 - 38}{44,8 - 24} = 829 \frac{6,5}{20,5} = 262 \text{ н/мм}^2$$

$$\tau_1''' = \tau_2 \frac{44,5 - 42}{44,5 - 24} = 829 \frac{2,5}{20,5} = 101 \text{ н/мм}^2$$

Следует отметить, что если рассчитывать напряжения τ_2' и τ_2'' по линейному закону, т.е. по формулам из подобия треугольников на рис. 23, то значения τ_2^i получаются несколько ниже. Например,

$$\tau_2'' = \tau_2 \frac{44,5 - 24}{39,5 - 24} = 829 \frac{20,5}{15,5} = 1096 < 1108$$

$$\tau_2' = \tau_2 \frac{42 - 24}{39,5 - 24} = 829 \frac{18}{15,5} = 962 < 1049$$

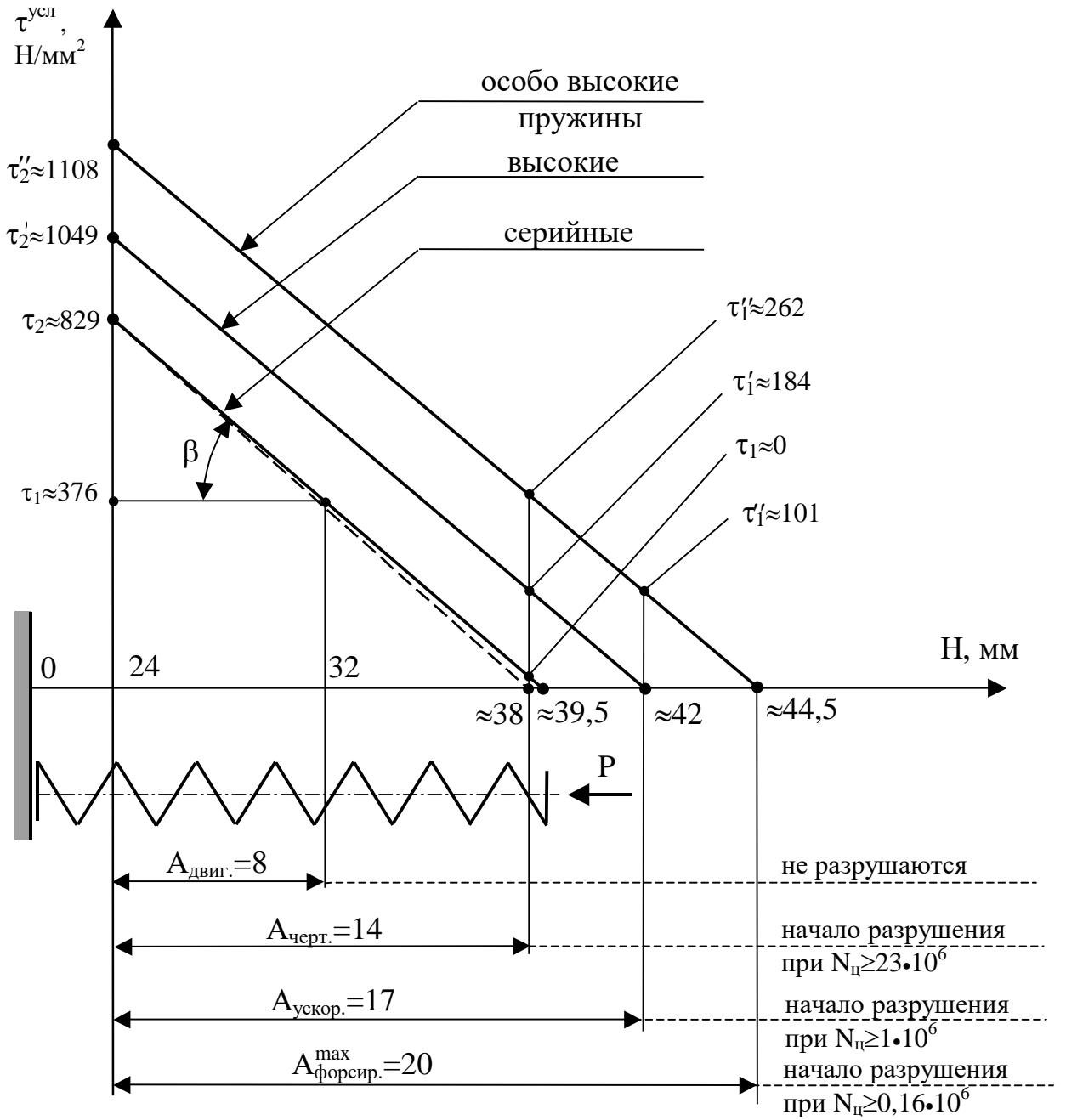


Рисунок 7.3. Напряжения $\tau_{усл}$ при разной высоте образцов пружин

7.2. Представление кривой Велера в системе координат $\tau_0 - N_{ц}$

При испытании пружин образцов пружин с увеличенной и нормальной высотой отношение $r = \tau_1/\tau_2$ изменяется в пределах от 0 до 0,24. Графическое представление кривой Велера можно показать в системах координат $\tau - N_{ц}$ или $\tau_2 - \tau_1$ (рисунки 7.4 и 7.5) [164].

Изменение вектора изменения наибольшей циклической долговечности пружин на рисунке 7.4 показывает прямая линия m-n.

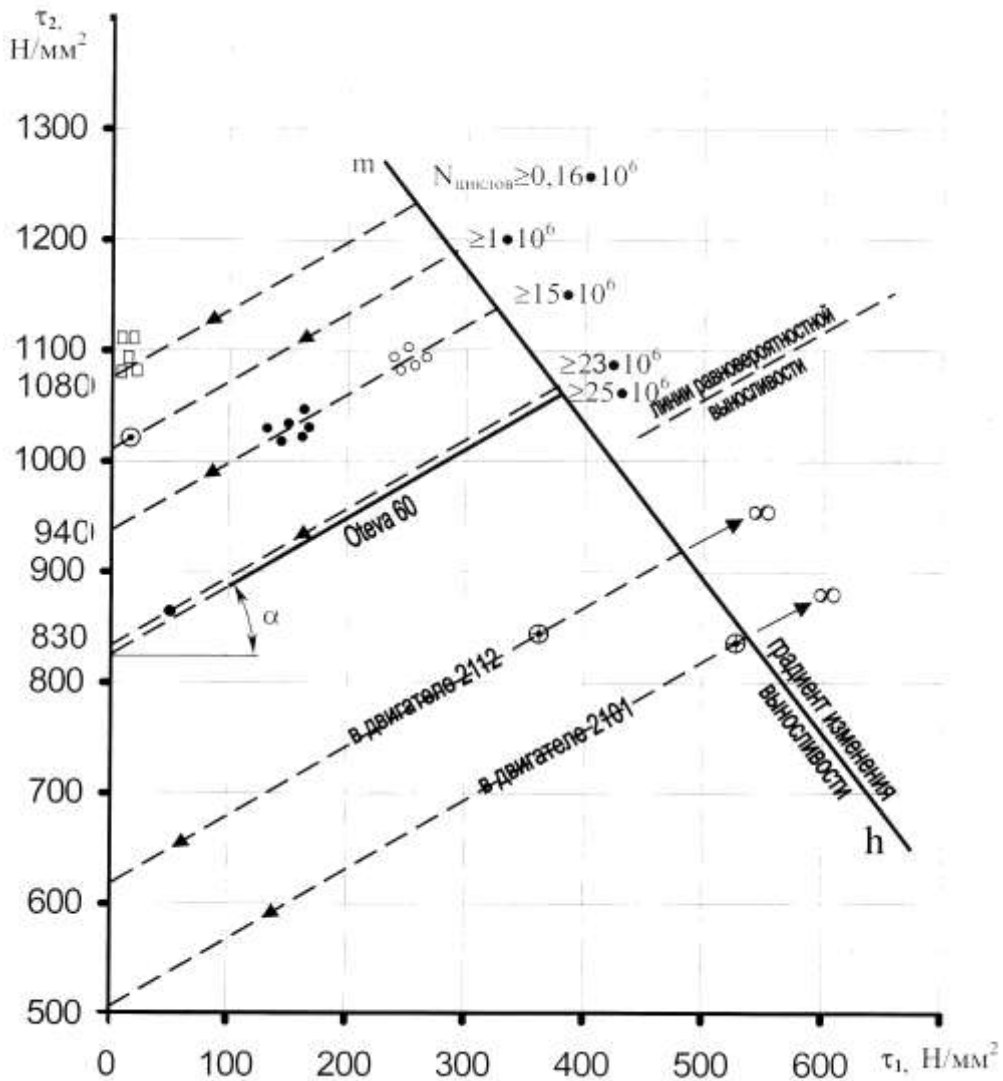


Рисунок 7.4. Циклическая долговечность пружин из сталей 70ХГФА-Ш(-----) и Oteva (—)

В таблице 20 показаны результаты преобразования характеристик испытаний циклической выносливости пружин из рисунка 7.4 к асимметричному циклу испытаний при $r = 0$.

Таблица 20

Преобразование характеристик испытаний циклической выносливости пружин к асимметричному циклу испытаний при $r = 0$

№ партии (табл.8)	Обозначения	P_2 , кгс	$N_{ц}$ при разрушении	A , мм	H_0 , мм	τ_2 , Н/мм ²	τ_0 , Н/мм ²	Примечание
1	.	58,7	$23 \cdot 10^6$	14	39,3	868	833	
2	•	68,5 73,2 72 69,3 72 71 69,7	$12,5 \cdot 10^6$ $17,2 \cdot 10^6$ $17,2 \cdot 10^6$ $20,6 \cdot 10^6$ $21 \cdot 10^6$ $26 \cdot 10^6$ $26 \cdot 10^6$	14 14 14 14 14 14 14	42 43 42,8 42 42,8 42,1 42	1014 1083 1065 1025 1065 1050 1032	907 949 937 918 937 940 925	
3	o	74 75,2 76 76,7 74,1 75,6 75,6 74,7 75,6 75,6 75,6 75,3 73,2	$16,9 \cdot 10^6$ $17,2 \cdot 10^6$ $18,9 \cdot 10^6$ $10,6 \cdot 10^6$ $16,6 \cdot 10^6$ $10,7 \cdot 10^6$ $22,8 \cdot 10^6$ $20,6 \cdot 10^6$ $6,5 \cdot 10^6$ $4,5 \cdot 10^6$ $4,5 \cdot 10^6$ $9,8 \cdot 10^6$ $9,8 \cdot 10^6$	14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14	43,5 43,8 44,5 44,5 43,9 44,3 44,3 43,8 44,3 44,3 44,3 44 43,8	1095 1112 1125 1135 1096 1118 1118 1105 1118 1118 1118 1114 1083	948 957 951 961 938 950 950 950 950 950 950 953 928	
7	□	75 75,2 74 73 75	$0,19 \cdot 10^6$ $0,16 \cdot 10^6$ $0,18 \cdot 10^6$ $0,25 \cdot 10^6$ $0,25 \cdot 10^6$	20 20 20 20 20	44 44 43,6 43,5 44	1110 1112 1095 1080 1110	1110 1112 1095 1080 1110	
10	◎	67,9	$1,06 \cdot 10^6$	17	42	1005	975	
2112		56,1	∞	8	39,5	830	629	
2101			∞				500	
8	Δ	67,5	$0,17 \cdot 10^6$	20	41,8	999	999	Брак технологии
9	*	65,5	$0,39 \cdot 10^6$	17	41	969	969	
4	,	57,3 58	$4,5 \cdot 10^6$ $5,7 \cdot 10^6$	14 14	39 39	848 858	821 831	
6	×	63,7 62,7 61,5	$9,9 \cdot 10^6$ $20 \cdot 10^6$ $19,7 \cdot 10^6$	14 14 14	40 40 39,5	943 928 910	889 874 870	

До проведения испытаний измерили нагрузку P (Н) и рассчитывали напряжения $\tau_0 = 14,8P_2 - 26,8(H_0 - 24 - A)$, Н/мм².

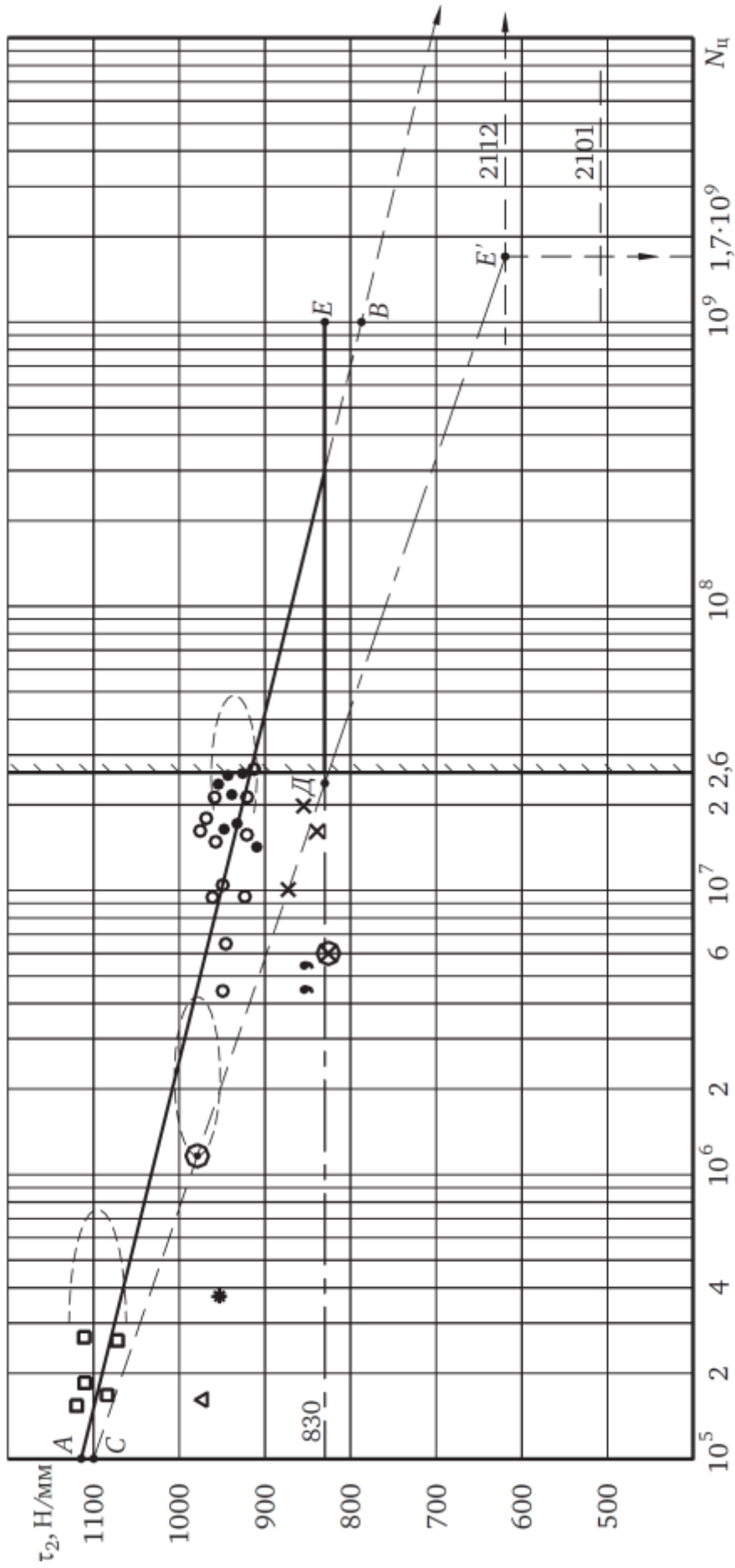


Рисунок 7.5. Кривая Велера в системе координат $\tau - N_{II}$

7.3. Расчет регрессионной прямой

С учетом работы [140] сделан расчет регрессионной прямой

Уравнение регрессионной прямой $\tau_0 = \bar{\tau}_0 + k(x - \bar{x})$,

здесь \bar{X} и $\bar{\tau}_0$ - средние значения τ_{0i} $\lg N_{ii}$.

$$N_{ii} = N_i \cdot 10^{-6}$$

$$k = r \frac{\sigma_{\tau_0}}{\sigma_x}$$

здесь r - коэффициент;

$\sigma_{\tau_0}, \sigma_x$ - среднеквадратичные отклонения.

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(\tau_{0i} - \bar{\tau}_0)}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Расчеты показали, что $\bar{\tau}_0 = 969,8$; $\bar{x} = 0,773$; $k = -82,6$.

Уравнение регрессионной прямой можно в координатах τ - $\lg N$:

$$\bar{\tau}_0 = 969,8 - 82,6(x - 0,773).$$

Для кривой в координатах τ - N параметры точек А и В на прямой АВ:

$$\tau_0 = 1116 \quad N_{ii} = 10^5 \text{ для А}$$

$$\tau_0 = 786 \quad N_{ii} = 10^9 \text{ для В}$$

$$\tau_0 = 969,8 - 82,6(\lg N_1 - 0,773)$$

7.4. Метод испытаний высоконагруженных пружин сжатия с увеличенной высотой и шагом на циклическую долговечность

Для сокращения продолжительности испытаний высоконагруженных пружин сжатия на циклическую долговечность предложен метод проведения испытаний образцов-свидетелей пружин, увеличенных по высоте в свободном состоянии и шагу [83, 107]. Таким образом, при проведении

испытаний увеличиваются касательные напряжения τ_2 при $r=0$. Для определения циклической долговечности образцам-свидетелям изготавливали по той же технологии и из того же материала [107, 189]. Образцы-свидетели обрабатывали совместно с серийной партией. Оснастка для всех технологических операций при этом одинаковая.

Чтобы проверить эффективность решения, были изготовлены и испытаны образцы пружин из следующих проволок (сталь «Отева 60» и сталь «Отева 70») диаметром 3,6 мм.

Кривые усталости материалов, выпускаемых фирмой “Garphyttan”, приведены на рисунке 7.6 [51]. Проволока Oteva 70, обработанная скальпированием, имеет на 5 % выше сопротивление усталости, чем проволока Oteva 60, обработанная скальпированием, что объясняется их разным химическим составом. Результаты испытаний приведены на рисунке 7.7.

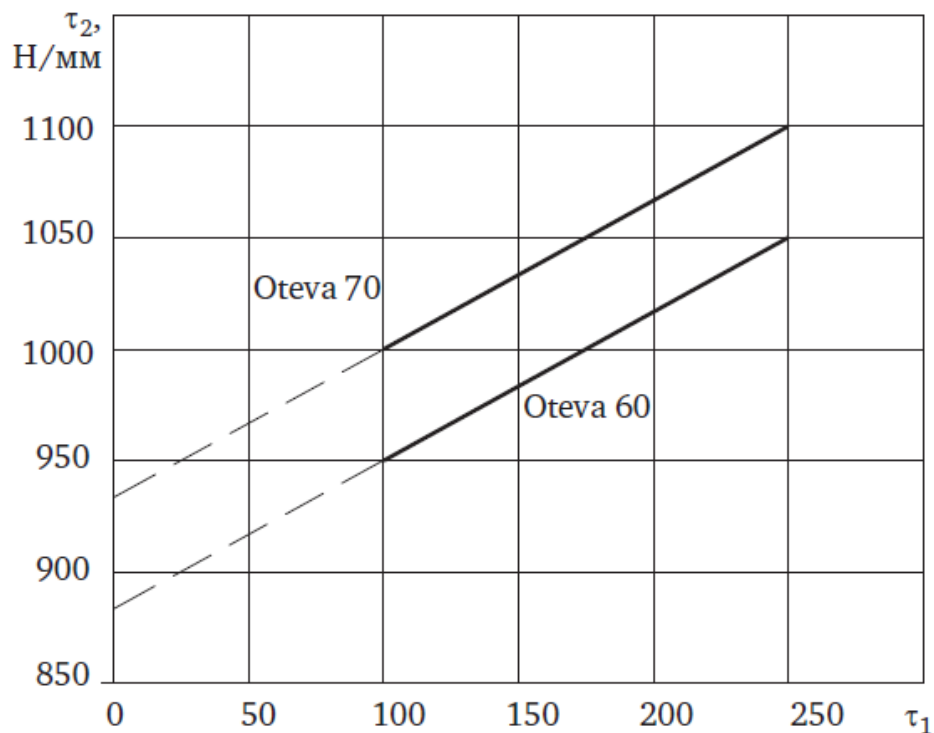


Рисунок 7.6. Кривые усталости проволок [164]

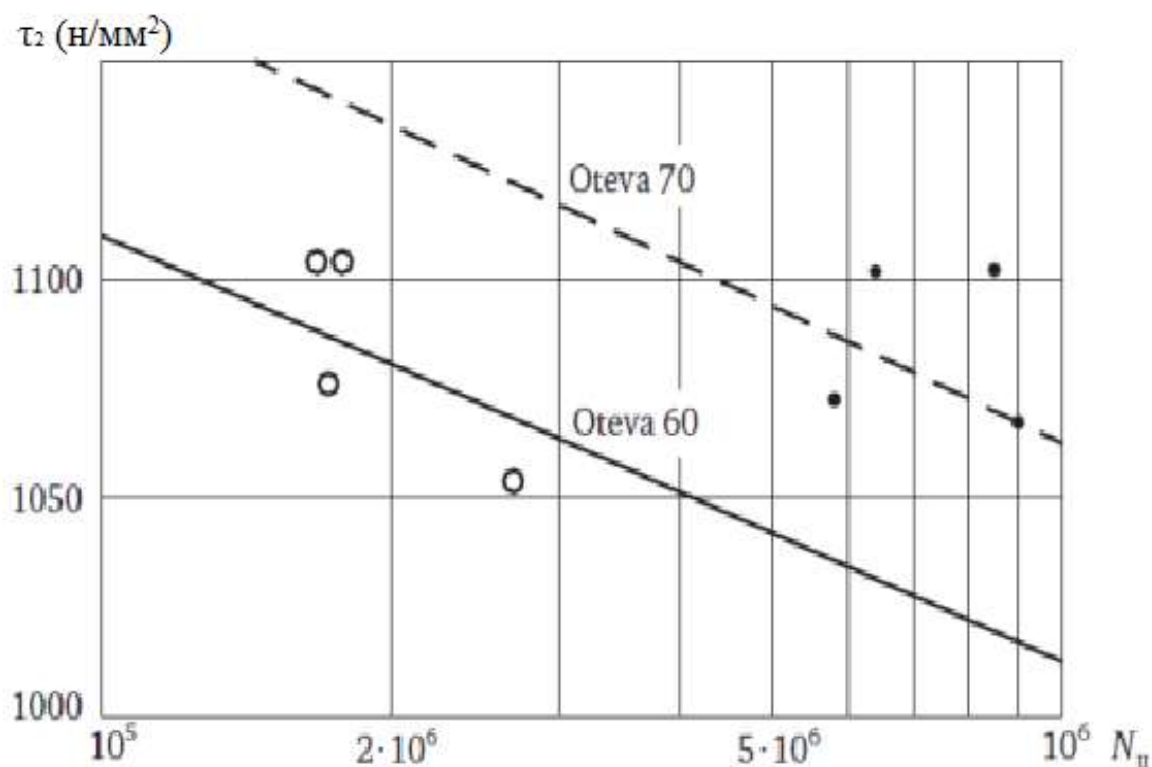


Рисунок 7.7. Кривая Велера в системе координат $\tau - N_{ц}$

Экспериментальная кривая Велера построена на основании испытаний пружин из стали Oteva 60 и 70ХГФА-Ш. Показана усталостная кривая регрессии, построенная по результатам многочисленных вышеприведенных испытаний пружин из проволоки Oteva 60 и 70ХГФА-Ш. Также проведены испытания и построена регрессионная кривая для стали Oteva 70. Установлено, что пружина из стали Oteva 70 имеет циклическую долговечность на 5,5 % больше, чем из стали Oteva 60 что подтверждает данные работы [164]. Таким образом, разработанный автором метод оценки сопротивления усталости пружин обладает удовлетворительной практической точностью и может быть рекомендован для внедрения. За начало разрушения принимают число циклов по кривым Велера на рисунке 7.7.

Если в процессе производства возникают сомнения в качестве партии проволоки и пригодности её для производства пружин, то можно изготовить

пружины с завышенной высотой. За критерий оценки можно принять $N_{ц} \leq 10^6$. Продолжительность испытаний таких образцов составляет меньше суток при работе в три смены.

7.5. Влияние качества поверхности на сопротивление усталости пружин

Разрушенные при испытаниях на стенде пружины в количестве 27 шт. были исследованы в металлографической лаборатории. Микроструктура всех пружин – мартенсит 2-го балла с точечными включениями оксидов 1-го балла. Обезуглероженного слоя не обнаружено. Поверхностных дефектов не обнаружено на 19 пружинах. На остальных пружинах обнаружены раковины и дефекты поверхности типа трещин глубиной от 0,01 до 0,05 мм. Заметной корреляции между наличием таких дефектов и числом циклов до разрушения не обнаружено. Состояние поверхности существенно ухудшает неконтролируемая дробеметная обработка. Некачественная поверхность может получаться при обработке крупной дробью или рубленой, вплоть до стружкообразования).

7.6. Выводы

1. Для построения кривой Велера (усталостной кривой) в малоцикловой зоне нагружения предложен метод с изготовлением образцов пружин с большим шагом и высотой. Показано, что такой метод обладает достаточно высокой точностью. Результаты испытаний приведены к отнулевому циклу нагружения и обработаны методами математической статистики (построена регрессионная прямая).

2. Циклическая долговечность пружин, изготовленной из отечественной проволоки 70ХГФА-Ш соответствует циклической долговечности пружин, изготовленных из проволоки Отева 60.

3. На уменьшение циклической долговечности в наибольшей степени влияют следующие нарушения режимов:

- недостаточная пластическая деформация при горячей осадке, т.е. остаточная осадка $\lambda_{\text{ост.}} \leq 4$ мм;
- риски на поверхности навивочного инструмента;
- сжатие пружины при выполнении операции горячей осадки с недоходом до соприкосновения витков, превышающим $\Delta \leq 1,5$ мм.

Глава 8. ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРУЖИН СЖАТИЯ ОТ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

8.1 Влияние величины производственной партии на глубину и распределение наклепа при дробеметной обработке

Оборудование для создания наклепа на поверхности пружины при помощи обработки дробью позволяет выполнить обработку партии пружин разной массы.

Для оценки равномерности наклепа на разных участках поверхности пружины, выбора рациональной продолжительности процесса обработки и максимальной массе партии пружин была проведена опытная работа [159, 167].

Обработку партий пружин сжатия (клапана) с разной массой 20; 55 и 110 кг выполняли на установке камерного типа дробью ДСЛ-0,5 со скоростью дробы 65 метров в секунду. Оценку интенсивности и равномерности наклепа выполняли косвенным методом по стреле прогиба контрольной пластинки Almen. Влияние продолжительности обработки на стрелу прогиба пластинки Almen при разных массах партий пружин представлено на рисунке 8.1.

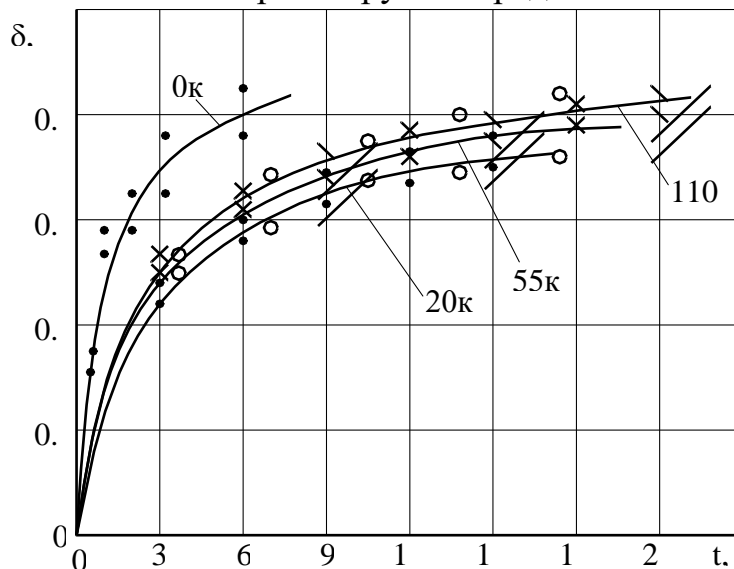


Рисунок 8.1. Влияние продолжительности обработки на стрелу прогиба пластинки Almen при разных массах производственных партий пружин

Установлено, что величина массы производственной партии пружин не влияет на изменение стрелы прогиба пластинки Almen. При этом имеет место неравномерность обработки разных поверхностей пружин [159].

Пунктирная кривая на рисунке 8.2 представляет зависимость продолжительности обработки (до появления 25 отметок дроби на $2,5 \text{ мм}^2$) от величины массы партии пружин, а сплошная кривая представляет зависимость продолжительности обработки от величины массы партии пружин 2108-1007020.

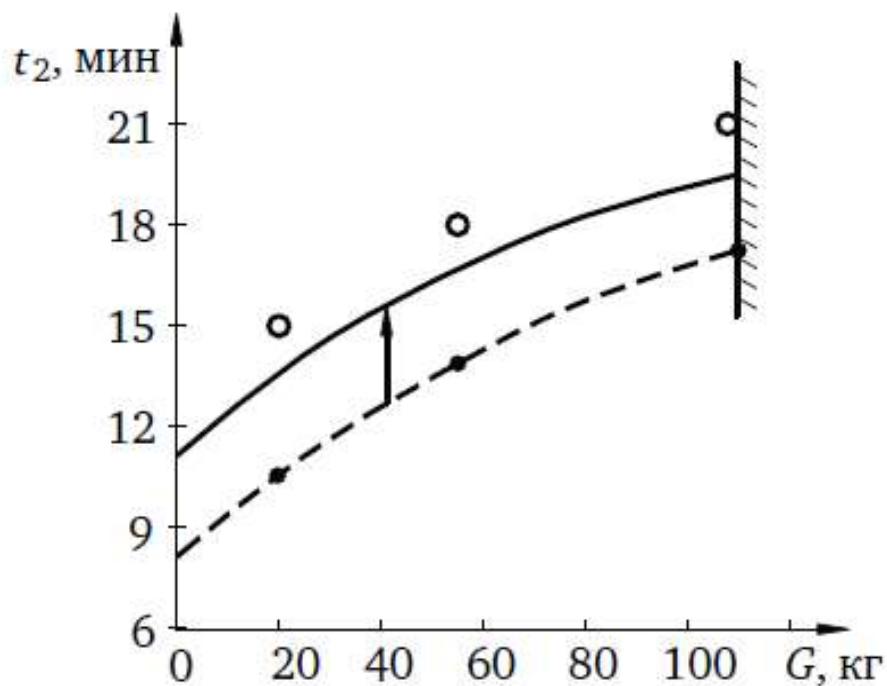


Рисунок 8.2. Влияние массы партии пружин на продолжительность обработки

Из графика видно, что коэффициент использования дробеметного оборудования и производительность можно увеличить при загрузке пружин массой до 110 кг. вместо 45 кг.

8.2. Продолжительность нагрева пружин при горячей осадке

На основании экспериментальной работы определена необходимая продолжительность нагрева пружин в конвейерной печи «ФИАТ», которая составила от 5 до 6 минут (рисунок 8.3) [163].

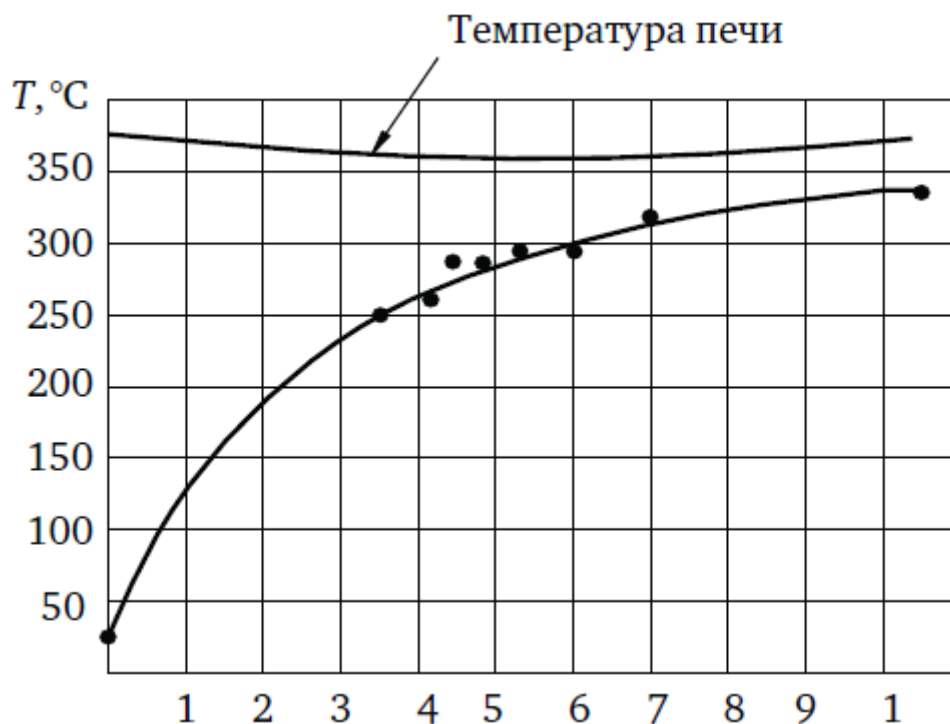


Рисунок 8.3. Продолжительность нагрева пружин

Был разработан и апробован метод контроля температуры нагрева пружин по цветам побежалости пружин при их выходе из зоны нагрева:

- Коричневый – 255°C
- Красно-коричневый – 265°C
- Тёмно-синий - 295°C
- Синий – 320°C
- Серый – 330°C

8.3. Изменение механических свойств проволоки при отпуске после навивки

Согласно общепринятого технологического процесса изготовления высоконагруженных пружин сжатия (клапана) после навивки выполняют термическую операцию отпуск. При этом у проволоки повышается условный предел текучести. [168, 188].

Была проведена опытная работа по изучению влияния температуры отпуска на силу начала пластической деформации при осадке пружины из стали 70ХГФА-Ш. Отпуск проводили в отпускной печи при температуре 400 °С в течение 30 мин.

Измерены силы P_s пружины без отпуска, и P_s° - с отпуском. Здесь P_s - сила, соответствующая началу пластической деформации пружины. Силы P_s и P_s° определили при осадке пружины сжатия двигателя ВАЗ (рисунок 8.4 и таблица 21).

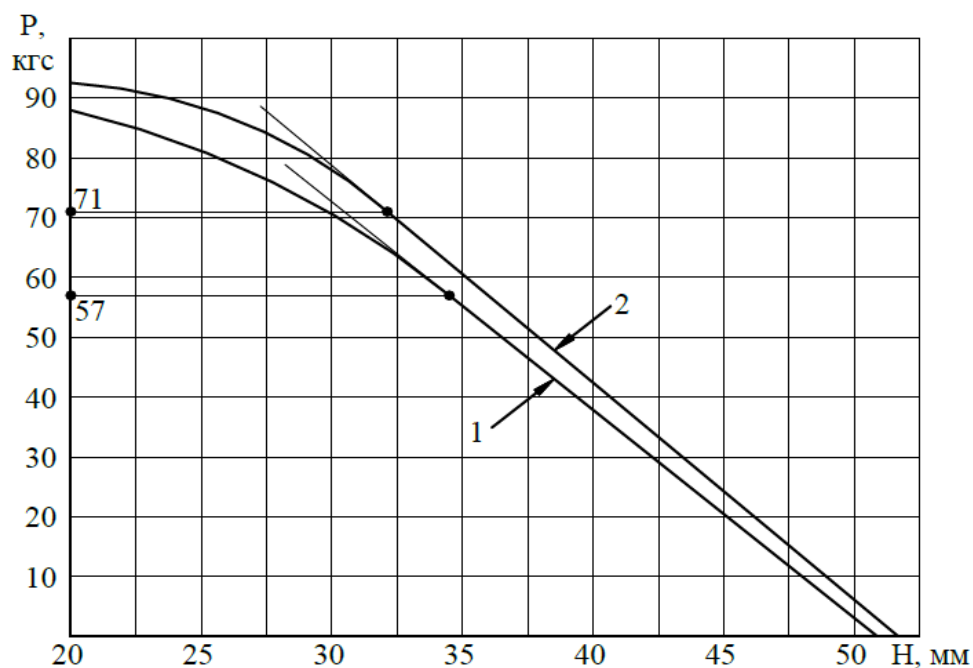


Рисунок 8.4. Экспериментальная кривая деформирования:

1 – без отпуска; 2 - с отпуском (400 °С, 30 мин.)

Параметры кривой деформирования пружин без отпуска и после проведения отпуска

Без отпуска			После проведения отпуска		
Н	Р	$\lambda_{\text{ост}}$	Н	Р	$\lambda_{\text{ост}}$
51,7	0	0	51,8	0	0
45	23,5	0	45	24,4	0
40	41,7	0	40	43,1	0
35	57,7	0,7	35	61	0
32	64,0	1,3	32	71,3	0,2
30	70,8	1,7	30	77	0,6
28	74,6	2,6	28	82,5	1,2
25	81,5	3,7	25	89	2,4
22	89	4,2	22,5	94,5	4,0
20	89	6,5	20,5	91,5	5,6

В результате проведенных экспериментов было установлено, что сила деформирования, соответствующая началу пластических деформаций после проведения термической операции – отпуск, повышается на 25%. Однако, при этом значительного повышения несущей способности R^* не происходит. Это говорит о том, что при сложном нагружении вследствие эффекта Баушингера предел текучести уменьшается. Сложность нагружения состоит в том, что повторные деформации происходят в другом направлении, т.е. при изгибе – это деформации растяжения и сжатия продольных волокон проволоки, а при осадке пружины – сдвиговые деформации. При этом в процессе сдвиговых деформаций происходит частичная переориентация плоскостей скольжения в различных кристаллах.

8.4. Изменение предела прочности проволоки при нагреве в области температур отпуска пружин

При термической обработке закаленно-отпущенной проволоки по режиму отпуска наблюдается уменьшение её предела прочности (таблица 22 и рисунок 8.5).

Таблица 22

Изменение предела прочности проволоки разных марок сталей при различных температурах отпуска

	Без отпуска		После отпуска при 380 °С		После отпуска при 425 °С		После отпуска при 450 °С	
	Р, кН	R _m , МПа	Р, кН	R _m , МПа	Р, кН	R _m , МПа	Р, кН	R _m , МПа
Отева 60, Ø 3,6 мм	17,0	1670	17,0	1670	16,7	1640	13,2	1300
	17,2	1690	17,0	1670	16,6	1630	13,4	1320
R12, Ø 3,58 мм	17,2	1710	17,0	1690	16,8	1670	14,0	1390
	17,15	1700	17,0	1690	16,7	1660	14,1	1400
70ХГФА-Ш Ø 3,58 мм	17,1	1700	17,2	1710	16,6	1650	13,1	1300
	17,1	1700	17,4	1730	16,6	1650	13,4	1330
Отева 70 Ø 3,6 мм	19,9	1955	19,5	1920	18,0	1770	14,3	1405
	19,6	1925	19,6	1930	18,0	1770	14,3	1405
R15, Ø 3,58 мм	19,2	1905	19,2	1910	17,40	1730	13,3	1320
	19,3	1915	19,0	1890	17,20	1710	13,1	1300

В результате экспериментальных работ установлено, что предел прочности проволоки из сталей Отева 60, Отева 70, R12, R15, 70ХГФА-Ш, 60С2ХА не уменьшается при температуре отпуска до 380 °С. При температуре отпуска свыше 410 °С происходит значительное уменьшение механических свойств проволоки.

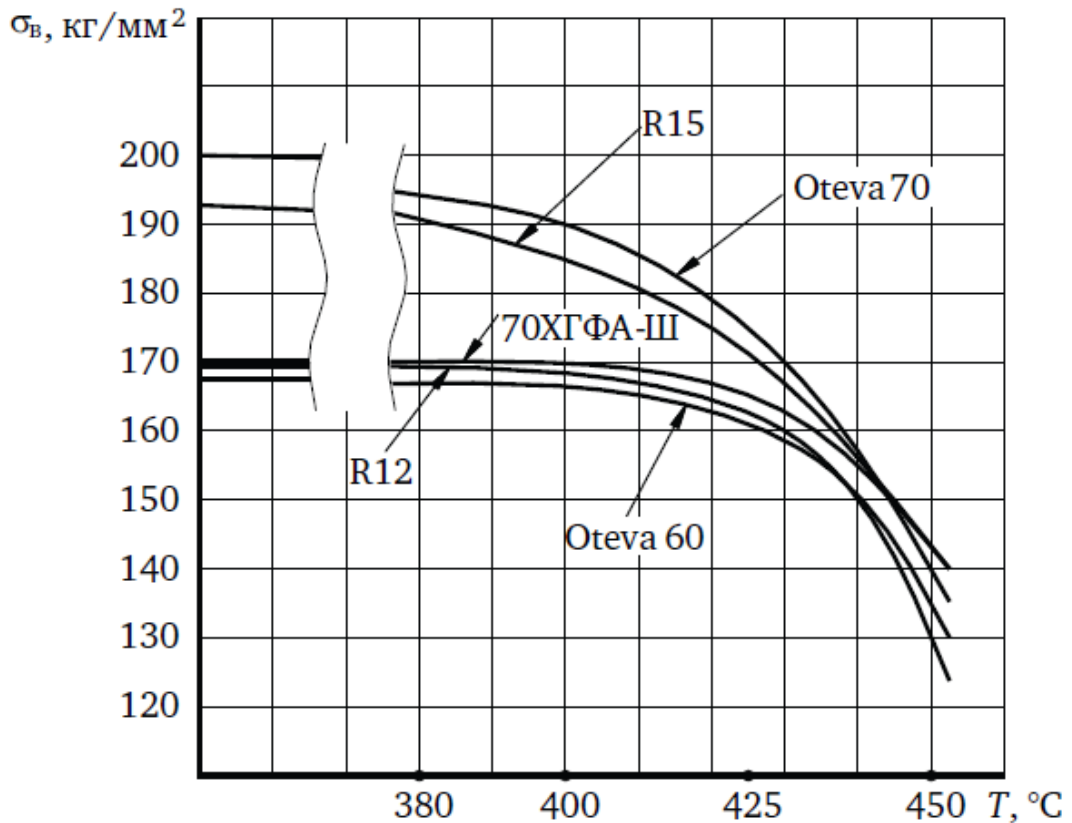


Рисунок 8.5. Графики зависимости предела прочности проволоки от температуры отпуска при выдержке 30 мин

Следует отметить, что режимы термообработки пружин после навивки влияют на циклическую долговечность пружин:

В работе [63] отмечено, что повышение предела прочности материала выше 1700 МПа не приводит к увеличению предела выносливости, т.е. более высокий предел прочности у кремнистых сталей, полученный за счет термообработки, не гарантирует повышение выносливости пружин.

Опыт фирм, изготавливающих проволоку и пружины, а также отдельные эксперименты, проведенные на АО «БЕЛЗАН» показали, что время вылеживания пружин после навивки перед отпуском должно быть минимальным. Например, фирма “Garphyttan” допускает выдержку перед отпуском до 8 часов даже для кремнистых сталей. Рекомендации других фирм следующие: для ванадиевых сталей выдержка не более 6 часов, для

кремнистых сталей – не более 1 часа. Вероятно, за счет более высоких напряжений третьего рода (на уровне кристаллитической решетки) у кремнистых сталей происходит более значительное зарождение микротрещин и других дефектов. Своевременное проведение операции отпуска позволяет реализовать релаксацию этих напряжений.

В результате проведенных экспериментов обнаружена значительная разница в режимах отпуска в конвейерных и шахтных печах. Внутренний диаметр пружины 2112 после конвейерной печи уменьшился с 18,75 до 18,6 мм, т.е., на 0,15 мм за счет температурной релаксации остаточных напряжений от изгиба. В шахтной печи изменение диаметра оказалось на 66% больше и составило 0,25 мм. Т.е. в конвейерной печи пружины оказываются недоотпущенными по сравнению с шахтной печью. Аналогичный эксперимент был проведен и на операции «отпуск после дробеметного наклепа». Пружину, отпущенную в шахтной печи при температуре 230 °С увеличили длину на 2,2 мм, а в конвейерной печи – всего на 1,2...1,5 мм. А показания термометра и время нахождения в зоне этих температур были одинаковыми. Причем, если проводить отпуск в конвейерной печи при 180 °С, то увеличение высоты составит 0,5 - 0,7 мм. Одной из главных причин такого несовпадения режимов отпуска является медленный прогрев пружин, особенно в конвейерной печи после навивки. В конвейерной печи обратная ветка конвейера идет не по нагретой части печи.

8.5. Влияние завышенной температуры отпуска после дробеметной обработки на сопротивление усталости

Если провести термообработку – отпуск с нагревом выше 300 °С, то напряжения от дробеметного наклепа почти полностью релаксируют, что отрицательно сказывается на сопротивлении усталости пружин.

Установлено, что низкотемпературный отпуск после дробеметной обработки должен проводиться при температуре не выше 250°C.

Пружины с цветами побежалости не допускаются, их следует отсортировать.

8.6. Зависимость остаточной осадки от степени нагрева и продолжительности выстоя при горячей осадке пружин

Отдельные изменения высот заготовок пружин при шлифовке, отпуске, горячей осадке, дробеметной обработке, холодной осадке влияют на точность определения высоты заготовки пружины при навивке

При разработке технологии изготовления высоконагруженных пружин сжатия для определения изменения высоты заготовки пружины при горячей осадке можно использовать результаты опытной работы [163] (таблица 23 и рисунок 8.6)

Таблица 23

Зависимость остаточной осадки ΔH от степени нагрева и продолжительности выстоя при горячей осадке пружин

Т°С	Выдержка 1сек.			Выдержка 2сек.			Выдержка 5сек.		
	Н ^{до}	Н ^{после}	ΔH	Н ^{до}	Н ^{после}	ΔH	Н ^{до}	Н ^{после}	ΔH
20	61,5	54,2	7,3	61,4	54,0	7,4	61	53	8
140	61	51	10,	61,2	50,3	10,9	61,5	49,8	11,7
200	60,8	49,6	11,2	61,2	50	11,2	61,7	49,4	12,3
250	60,8	49	11,8	60,9	49	11,9	61,3	48,4	12,9
300	61,1	48,7	12,4	61,1	48,6	12,5	61,1	48,3	12,8
355	61,5	48,7	13	61,1	47,3	13,8	61,1	47	14,1
400	60,8	47,8	13	61,2	46,5	14,7	61,6	45,6	16
425	61,1	46,8	14,7	61,1	45,5	15,6	61,6	44	17,1

Таким образом, можно отметить следующее:

- при изменении степени нагрева от 20 °С до 400 °С остаточная осадка значительно увеличивается;
- при температурах в диапазоне 250 °С ... 350 °С из-за хрупкости стали, остаточная осадка почти не изменяется.
- В диапазоне температур свыше 400 °С наблюдается значительный рост остаточной осадки из-за уменьшения прочности проволоки.

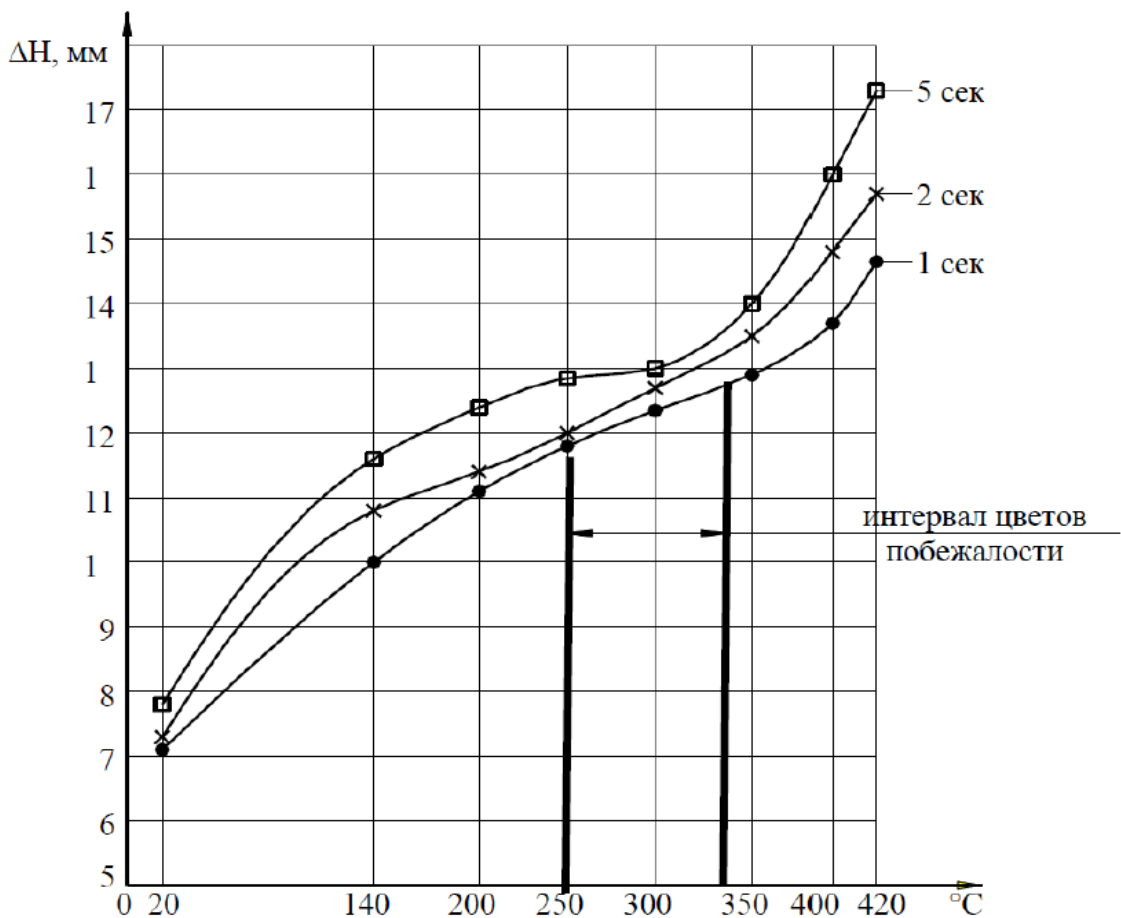


Рисунок 8.6. Влияние степени нагрева и продолжительности выстоя на величину остаточной осадки ΔH

8.7. Выводы

В результате проведенного исследования зависимости качества высоконагруженных пружин сжатия от характеристик технологических процессов их изготовления было установлено, что:

1. При низкотемпературном отпуске пружин после выполнения операции навивки происходит увеличение силы, соответствующей началу пластической деформации при осадке пружины, примерно на 24 %.

2. Измерение температуры с помощью сравнительно простого метода побежалости позволило определить минимальную продолжительность нагрева пружин перед горячей осадкой в конвейерной печи, которая составила примерно 6 мин; Это позволило уменьшить трудоемкость выполнения операции горячей осадки на 35%.

3. Установлено, что при горячей осадке в диапазоне температур от 250 до 350 °С пружины имеют повышенную хрупкость.

При этом низкотемпературный отпуск после дробеметной обработки необходимо проводить при температуре не выше 250 °С.

Также при этом можно увеличить производительность и коэффициент использования дробеметного оборудования путем увеличения массы загружаемых пружин до 110 кг вместо 45 кг.

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, позволит 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 нагружения, 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° , 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°C не уменьшает

величину этих напряжений, а отпуск при температуре 350°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 °С до 240 С, 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. 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.
3. Кривощанов М.В. Разработка, исследование и совершенствование оборудования и технологии изготовления рельсовых скреплений нового поколения: дисс. д.т.н.:05.03.05. Магнитогорск, 1999.
4. Кирсанов Ю.Л. Причины и условия зарождения трещин расслоения на высокопрочной патентированной проволоке после отпуска// Конструирование и технология изготовления пружин/ Межвузовский сборник науч. трудов, Устинов, 1986. С. 146-155.
5. Haldex Garphyttan Wire/ Reklam Center AB, 6335-3, Vasteras, ' Sweden, 5000/ Vastra Aros Tryckeri, 1996-09, 20.
6. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. -М: Metallurgia, 1981. 96 с.
7. Шаврин О.И., Редькин Л.М. Термомеханическое упрочнение пластинчатых пружин// Metallovedenie i termicheskaya obrabotka materialov. 1974.-№7. С.32-50.
8. Шаврин О.И., Редькин Л.М., Потапов. Повышение долговечности жестких пружин высокотемпературной технологической обработки// сб.

научных трудов Конструирование и технология изготовления пружин, Устинов, 1986. С. 83-90

9. Рахштадт А.Г. Пружинные стали и сплавы. М: Metallurgy, 1982. 400с.

10. Грачев Г.С. Термическая обработка и сопротивление сплавов повторному нагружению. М: Metallurgy, 1976. 152с.

11. Шахпазов Х.С., Юхвец И.А. Наука и сталепроволочное производство// метизное производство; Тематический отраслевой сборник №3. М.:Metallurgy, 1947. С. 5-12.

12. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. М.:Машиностроение, 1968. 131 с.

13. Производства метизов / Х.С. Шахпазов, И.Н. Недовизий, В.И. Ориничев и др. М: Metallurgy, 1977. 392с.

14. ГОСТ 13764-68...ГОСТ13766-68. Пружины винтовые цилиндрические сжатия и растяжения из стали круглого сечения. Введен с 01.07. 1969. М: Изд. Стандартов, 1978. 160с.

15. Соколов И.А., Уральский В,И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. М: Metallurgy, 1981. 96с.

16. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Т. Специальные стали. М: Metallurgy, 1985. 408с.

17. Бобылева С.Ф., Соколов Н.В. Свойства холодновытянутой проволоки при повышенных температурах испытаниях // Стальные канаты. Киев: Техника, 1967 Вып.4. С.286-287.

18. Грачев С.В, Шалдыбин В.П. Исследование высокопрочной легированной проволоки, полученной методом закалки и отпуска // Стальные канаты. Киев: Техника, 1967. Вып.4. С.361-365.

19. Козлов В.Т. Высочин В.Д. Остаточные напряжения в канатной проволоке после волочения // Стальные канаты. Киев: Техника, 1967. Вып.4. С.302-310.

20. Давиденков Н.Н., Спиридонова Н.И. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца // Заводская лаборатория, 1945. №6. С.583-593.

21. Повышение качества пружин, торсионов и рессор: Сборник научных трудов 2 Всероссийской научно-технической конференции с международным участием посвященный 60-летию Белорецкого завода тракторных рессор и пружин, и 50-летию Ижевского государственного технического университета / Под ред. Л.М. Редькина и В.М. Колмысова.-Белорецк: Издательство ООО «Оникс», 2001. 160с.

22. Бараз Б.Р. Физические основы хрупкого разрушения пружинных сталей с волокнистой структурой // Повышение качества пружин, торсионов и рессор Белорецк: Издательство ООО «Оникс», 2001. С.23-33.

23. Грешнов В.М., Лавриненко Ю.А., Напалков А.В., Сафин Ф.Ф. инженерные физические модели материала и деформируемость материалов. В сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции «Новые материалы и технологии». М: МАТИ, 1996г.

24. Лавриненко Ю.А. Математическое моделирование многопереходных технологических процессов холодной объемной штамповки изделий из сталей с учетом деформационной анизотропии: Дисс.. к.т.н.: 05.16.05. Уфа, 1998.

25. Андреев А.С., Горбаневский В.Е., Потудин О.В. Долговечность стальной пружинной проволоки при асимметричном циклическом нагружении // Конструирование и технология изготовления пружин / Межвузовский сб. науч. тр., Устинов, 1986. С.91-103.

26. Кирсанов Ю.Л. Причины и условия зарождения трещин расслоение на высокопрочной патентованной проволоке после отпуска // Конструирование и технология изготовления пружин / Межвузовский сб. науч. тр., Устинов, 1986 .С.146-155.

27. Пономарев С.Д и др. Расчеты на прочность в машиностроении / Под общей редакцией Пономарева С.Д. в 3т. Т1. М.: Машгиз. 974с.

28. Ануриев В.Н. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3т. М.:Машиностроение,1980. 559с.

29. Пономарев С.Д. Андреева Л.Е. Расчет упругих машин и приборов. М.:Машиностроение, 1980. 326с.

30. Остроумов В.П. Карпунин В.А. Повышение динамической прочности пружин. – Урало-Сибирское отделение Машгиза, 1961г. 112 с.

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

32. Пономарев С.Д. Литература по витым пружинам //Новые методы расчета пружин / Под общей редакцией Пономарева С.Д. .М. Машгиз, 1946. С.106-142

33. Вопросы проектирования, изготовления и службы пружин // Под ред. Н.Н. Давиденкова. Л: Машгиз, 1955. 267с.

34. Динамика и прочность пружин. - М.-Л.: Изд. АН СССР, 1950. С.356.

35. Малинин Н.Н. Заневоливание цилиндрических и конических пружин// Новые методы расчета пружин // Под ред. С.Д. Пономарева. М: Машгиз, 1946. С.10-25.

36. Новые методы расчета пружин / Под ред. С.Д. Пономарева. М: Машгиз, 1946. С.143.

37. Пасутман Б.В. Графический способ построения диаграммы номинальных касательных напряжений при расчете заневоленных пружин и торсионов // Вестник машиностроения, 1965. №1. С.38-39.

38. С.Д. Пономарев. Упругопластические расчеты в связи с холодной навивкой цилиндрических пружин // Тр. МАИ, 1952.- вып.17. С.10-25.

39. Ефимов В.П., Шапиро Е.А. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность пружин тракторных подвесок // Механизация сельскохозяйственного производства. Омск, 1978. С.48-53.

40. Махмудов А.М. Расчет и проектирование процесса формообразования винтовых пружин и спиралей приборов из проволоки и проводов на цилиндрическую основу: дисс . к.т.н., Казань, 1984.

41. Грачев С.В. Сопоставление некоторых теорий пластичности для случая сложного нагружения канатной проволоки // Прочность и долговечность канатной проволоки. Киев: Техника, 1975.-С.56...59.

42. А.С. 1009737 СССР. Устройство для упрочнения поверхностей изделий / Ефимов В.П., Шапиро Е.А., Бюл. №13 // Открытия, изобретения. 1983. №13.

43. Поляков М.Г. и др. Определение технологических моментов изгиба и кручения проволоки в канатах // Теория практика производства метизов. Свердловск, 1980. С.118-121.

44. Малинин Н.Н. Холодная навивка цилиндрических пружин // Новые методы расчета пружин / Под общей редакцией Пономарева С.Д. М. Машгиз, 1946. С.5-10.

45. Заседателев С.В. О навивке пружин с межвитковым давлением // Расчет упругих элементов машин и приборов: Тр. МВТУ. 1952. №16.С.90-65.

46. Блинник С.И. Расчет пружин в связи с их заневоливанием // Новые методы расчета пружин / Под общей редакцией Пономарева С.Д.- М.:Машгиз, 1946. С.26-46.

47. Шаврин О.И. Усталостная прочность стали 60С2, подвергнутой термомеханической обработке // Прочность и долговечность деталей машин. Ижевск, 1967. С.49-56.

48. Чернышев Н.А. Напряженное состояние и деформация цилиндрических пружин, свитых из круглого прутка // Динамика и прочность пружин. М-Л.: изд. АН СССР, 1950. С.7-78.

49. Быков В.А. О сопротивлении пластически обжатых пружин // Вопросы проектирования, изготовления и службы пружин / Под ред. Н.Н. Давиденкова. Л.,1995. С.122-147.

50. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. М. Машгиз, 1962. 455с.

51.Берман М.Э. О напряженном состоянии кругового витка круглого сечения, нагруженного произвольной системой сил // Расчеты на прочность. М., 1960. Вып.№5. С.155-170.

52. Попов Е.П. Методы проектирования витых пружин с криволинейной характеристикой // Динамика и прочность пружин. М-Л.: изд. АН СССР, 1950. С.149-187.

53. Штода А.В. Динамика и прочность клапанных пружин// Динамика и прочность пружин -М-Л.:изд.АН СССР, 1950. С.270-332.

54. Карпунин В.А., Коновалов А.А. О конструировании пружин минимального веса при заданной долговечности// Вестник машиностроения. 1968. №7. С.30-32.

55. Коновалов А.А. О вынужденных колебаниях цилиндрических пружин // Вестник машиностроения. 1965.№6. С.28-30.

56. Фролов Г.Н. Точность изготовления упругих элементов приборов. М.: Машиностроение, 1966 .176с.
57. Хвингия М.В. Вибрации пружин. М.: Машиностроение, 1969. 287с.
58. Шалин В.Н. Расчет упрочнения изделий при их пластической деформации. Л.: Машиностроение, 1971. 192с.
59. Ушаков Н.Н. Технология изготовления упругих элементов, применяемых в приборах и средствах автоматики. М.: Машиностроение, 1965. 63с.
60. Полищук Д.Ф. О единой трактовке различных видов потери устойчивости винтовых цилиндрических пружин. М.: Машиностроение, 1977. №3. С.60-65.
61. Добровольский В.И. Построение диаграмм деформирования по данным упругопластического кручения и изгиба: Методическое пособие. Ижевск: Ижевский механический ин-т,1974. 32с.
62. Бармин Д.П. Расчёт пружин минимальных параметров на заданную долговечность // Конструирование и технология изготовления пружин/ Межвузовский сборник научных трудов, Устинов, 1986. С.78-83.
63. Редькин Л.М. Разработка научных основ управления качеством производства пружин с применением ВТМО: дисс. д. т.н.:05.02.08.- Ижевск, ИжГТУ, 1999г..
64. Редькин Л.М., Шаврин О.И., Патрохов Н.Н. Повышение прочности жёстких винтовых пружин малого индекса// Динамика, прочность и долговечность деталей машин. Ижевск: ИМИ, 1974.С. 148-151.
65. Щербаков В.И. Исследование работоспособности пружин сжатия из различных материалов // Конструирование и технология изготовления пружин/ Межвузовский сборник науч. трудов, Устинов,1986. С.127-135.

66. Ахмеров А.Ф. О напряжённо-деформированном состоянии проволоки при навивке цилиндрических пружин // Изв.ВУЗов. Авиационная техника. М., 1970, №4 С. 130-136.

67. Ахмеров А.Ф., Махмудов А.М. Проектирование технологических операций навивки винтовых пружин и спиралей на цилиндрическую основу // Конструирование и технология изготовления пружин/ Межвузовский сборник науч. трудов, Устинов, 1986. С.111-119.

68. Давлетшин Э.З., Ахмеров А.Ф. Построение кривой растяжения пружинной проволоки малого диаметра // Заводская лаборатория. 1968. №11. с. 1410-1411.

69. Навроцкий Г.А., Белков Е.Г. Навивка пружин на автоматах. М.: Машиностроение, 1978. 143 с.

70. Белков Е.Г. Новая технология упрочнения высоконагруженных пружин растяжения и сжатия из круглой проволоки // Этап 2 отчёта по НИР. Исследование упругопластических свойств пружинных материалов для горячей навивки. Г.Р.№ 01950005063. Челябинск, ЧГТУ,1995.

71. Белков Е.Г. Основы проектирования технологических процессов и оборудования для безоправочной навивки пружин, пружинных шайб и колец: дисс. ...докт. техн. наук 05.03.05. Челябинск, 1988г.

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

73. Пономарёв С.Д. Упруго-пластические расчёты в связи с холодной навивкой цилиндрических пружин // Тр. МАИ. 1952. Вып. 17. С. 10-25.

74. Раковщик Ю.А. Совместный изгиб и кручение круглого стержня за пределом упругости // Известия АН СССР, ОТН, 1959. № 3. С. 158-160.

75. Заседателев С.М. Расчёт пружин растяжения, навитых с начальным натяжением (межвитковым давлением) // Вопросы проектирования, изготовления и службы пружин / Под ред. Н.Н. Давиденкова. Л.: Машгиз, 1955. С. 59-85.

76. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999 г. 512 с.

77. Белков Е.Г., Соколов К.О., Лавриненко Ю.А. Новая технология упрочнения высоконагруженных пружин растяжения и сжатия из круглой проволоки. Отчет. Челябинск, ЧГТУ. 1996г. № гос. регистр.04.950.005063.

78. А.С. 531608 СССР, МКл. В21f 3/00. Способ изготовления пружин / Белков Е.Г. опубл. 15.01.76 Бюл. №33.с.28.

79. Белков Е.Г. О влиянии скорости подачи проволоки на точность навиваемых пружин. // Изв. ВУЗов. Машиностроение, 1986. №10. С. 136-139.

80. Белков Е.Г. Исследование процесса навивки пружин с пластической осадкой // Автомобильная промышленность. 1981. №2 С.18..19

81. Белков Е.Г. Исследование процесса навивки пружин с межвитковым давлением на автоматах // Кузнечно-штамповочное производство. 1974. №9. С.18-20.

82. Белков Е.Г. Точность изготовления пружин, упрочняемых пластической осадкой // Конструирование и технология изготовления пружин: - Межвузовский сб. научных трудов. Устинов, 1966. С.64-68.

83. Лавриненко Ю.А. Метод форсированных испытаний пружин клапана на выносливость // Автомобильная промышленность. 2010. № 7. С. 26-27.

84. А.С. 1009737 СССР. Устройство для упрочнения поверхностей изделий / Ефимов В.П., Шапиро Е.А., Бюл. №13 // Открытия, изобретения. 1983.- №13.

85. Бойцов В.Б., Скрипкин Д.Э., Чернявский А.О. Расчетный анализ образования остаточных напряжений при виброупрочнении. Электронный журнал «Динамика, прочность и износостойкость машин». 1998. №10. С.69-72.

86. Мазеин П.Г. Моделирование формирования остаточных напряжений и деформаций при поверхностном пластическом деформировании стальных деталей: 05.02.08. Технология машиностроения: Автореф. докт. техн. наук/ЧГТУ. -Челябинск, 1994.

87. Мазеин П.Г. Методика проектирования операций поверхностного пластического деформирования: Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования. Челябинск, ЧГТУ, 1996. 79с.

88. Мазеин П.Г. Вероятная модель остаточных напряжений при гидробейструйном упрочнении // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. - Челябинск: ЧГТУ.1993г. С. 75-89.

89. Мазеин П.Г. Идентификация технологических параметров при гидробейструйном упрочнении// Деп. в ВИНТИ № 322-В94. 1994. 50с.

90. Лавриненко Ю.А., Белков Е.Г., Фадеев В.В. // Упрочнение пружин. Издательский дом «Бизнес-Партнёр», 2002. 124 с.

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

92. Коновалов А.А. К расчету прицепов пружин растяжения // Вестник машиностроения. 1966.-№3. С.14-18

93. Олесин И.В. Конструкция и расчет пружин с постоянными и изменяющимися в заданных пределах силовыми характеристиками при переменных температурах // Вестник машиностроения. 1969. №4. С.26-28.

94. Унифицированные пружины сжатия: Справочник / И.Ф. Прохоренко, Н.Г. Гавриленко, А.Д. Ильин, Л.А. Томашев. .М: Металлургия, 1982. 646с.

95. Лавриненко Ю.А. Разработка технологии изготовления пружины клапана двигателя легкового автомобиля // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Том15. № 12. С.547-554.
96. Чернышев Н.А. Напряженное состояние и деформация цилиндрических пружин, свитых из круглого прутка // Динамика и прочность пружин. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1950. С.7-78.
97. Веселин И.В.,Ценов и др. Пружины и рессоры. София, 1963. 343с.
98. Yshii Yukio and Mizuna Masao. Stress correction factor for helical springs. Vokonama, 1977. 191p.
99. Sprey R. Avoiding destructive Hysteresis in elastomere // Maschine Design. Berlin-NevYork, Ferruce, 1983. P.87-90.
100. Angst w. elastomerfererkerper – line Tinfuhrung // tehnik.-Suisse, 1984.-№20. P. 39-47.
101. Loper B. Nicht – zylindrische Schraubennfereru im Automobilbou und deren Berechnung // ATZ 76, 1974. 365 p.
102. Wanke K. Beitrag zur Berechnung von Kegendruckfedrh fus Draht und Band // Droct – Fochzeitschrift. - Berlin 1972.-№8,- P. 479-483/
103. Изготовление пружин методом холодной навивки. Технологические расчеты. РТМ 37.002.0362-81 / КТИАвтометиз (Горький), 1982. 49с.
104. Полищук Д.Ф. Комплексный анализ проектирования, изготовления и эксплуатации пружин // Повышение качества пружин, торсионов и рессор Белорецк: Издательство ООО «Оникс», 2001. С.46-51.
105. Редькин Л.М. Принцип управления пространством качества при изготовлении пружин подвесок автомобилей // Сб.науч.трудов "Моделирование технических систем Ижевск: ИжГТУ, 1966. С.89-91.
106. Белков Е.Г., Лавриненко Ю.А., Шеркунов Г.В. Результаты испытаний на выносливость пружин клапана двигателя ВАЗ 2112 //

Абразивный инструмент и металлообработка: Сб. науч. тр. Челябинск: ЦНТИ, 2001. С.122-125.

107. 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.

108. Ефимов В.П., Шапиро Е.А. Технологические резервы повышения усталостной прочности пружин тракторных подвесок // Конструирование и технология изготовления пружин / Межвузовский сб. науч. тр., Устинов, 1986. С.104.

109. Y.A. Swansson. "ANSYS – Engineering analysis system". Swansson Analysis Ing.1983.

110..75. Шаврин О.И., Редькин Л.М., Потрохов Н.Н. Повышение прочности жестких винтовых пружин малого индекса // «Динамика, прочность и долговечность деталей машин». Ижевск.:ИМИ. 1974 Вып.3. С.148-151.

111..76. Шаврин О.И., Редькин Л.М., Исмагилов М.М., Шурмин Н.В. Остаточные напряжения первого рода в пружинах малого индекса после ВТМО // сб. научных трудов. «Динамика, прочность и долговечность деталей машин».-Ижевск.: ИМИ:1975. С.128-131.

112. Горбаневский В.Е. математическая модель и программа для ЭВМ определения долговечности витых цилиндрических пружин сжатия в вероятном аспекте // Конструирование и технология изготовления пружин / Межвузовский сб. науч. тр., Устинов. 1986. С.54-63.

113. Шаврин О.И., Редькин Л.М., Коньшев В.Н. Технология повышения надежности пружин дизелей // Двигателестроение 1987. С.38-41.

114. Redkin L.M., Shavrin O.I. The unity of desing and technical solutions is the basis of the guality range control at the spring manufachture // Сб. МАТЛ “Motauto-97”. – Болгария, Russe.-1997-Vol.1.-YISBN 954-90272-I-X-P.202-206.

115. Redkin L.M., Shavrin O.I., Kulik N.I. The peculiarities of provision of spring produktion with thermomechanical strengthening //Proceeding “Motauto-98”. Bolgaria. Sopfia. 1998. Vol.3. P.99-102.

116. Патент № 8826687 Р.Ф. МКИБ21F3/03. Способ изготовления пружин /ШавринО.И., РедькинЛ.М.идр.(СССР) 2782490/25-12; Заяв.19.06.79; Оpubл. 32.11.81. Бюл.№43.

117. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М: Металлургия, 1984. 144с.

118. Заседателев С.М. Расчет пружин растяжения, навитых с начальным натяжением (межвитковым давлением) // Вопросы проектирования, изготовления и службы пружин // Под ред. Н.Н. Давиденкова. Л: Mashgiz, 1955. С.59-85.

119. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний. Справочник М: Металлургия, 1978г. 304 с.

120. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420с.

121. Бидерман В.Л. Поперечные колебания пружин // Расчеты на прочность. М., 1962. Вып.8. С.256-270.

122. Фадеев В.В. Совершенствование технологии изготовления клапанных пружин для обеспечения энергосбережения и повышения качества: дисс. к.т.н.: 05.03.05. – Белебей, БелЗАН, 2003.

123. Блинник С.И, Действие длительной нагрузки на заневоленные цилиндрические и спиральные пружины // Динамика и прочность пружин. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1950. С.188-213.

124. Лузгин Н.П. Изготовление пружин. М: Высшая школа, 1980. 144с.

125. Навроцкий Г.А. , Белков Е.Г. Особенности навивки на автоматах и контроль пружин с межвитковым давлением // Кузнечно-штамповочное производство. 1974. №4. С.14-16.

126. Остроумов В.П. Производство винтовых цилиндрических пружин. М: Машиностроение, 1970. 136с.

127. Соломатов М.Г. Совершенствование процесса безопрессовочной навивки ответственных пружин сжатия: дисс. к.т.н.: 05.03.05. – Челябинск, ЮУГУ, 2003.

128. 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.

129. Пономарев С.Д. Расчет заневоленных пружин с учетом кривизны витков // Расчеты на прочность. . М: Машгиз. 1960. Вып. 8. С.161-185.

131. Седов Л.И. О понятиях простого нагружения и возможных путях деформирования // ПММ, 1959. Т.XXII. Вып.2. С. 400-420.

132. Голев Р.В. К вопросу об устойчивости винтовых цилиндрических пружин с предварительным межвитковым давлением // «Динамика, прочность и долговечность деталей машин»: Тр. Ижевского механического ин-та.-1975 Вып.4. С.23-30.

133. Коновалов А.А. О вынужденных колебаниях цилиндрических пружин // Вестник машиностроения. 1965. №6. С.28-30.

134. Blanko I.A., Costelo G.A. Cylindrical constraint of Applied Mechanics.- Trans. ASME, 1974, -E41, №4,-S.1138-1140.

135. Астафьев В.Д., Справочник по расчету цилиндрических винтовых пружин сжатия – растяжения М.: Машгиз, 1960. 125с.

136. Полищук Д.Ф. Критерий устойчивости пружин сжатия при ударном их нагружении с учетом соударения витков // Вестник машиностроения. 1977. №5. С.34-35.

137. Смирнов В.Н. релаксация напряжений и ее значение в эксплуатации пружин // Динамика и прочность пружин. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1950. с.333-354.

138. Хвингия М.В. Малые продольные колебания конических и фасонных пружин // Вопросы проектирования, изготовления и службы пружин. Л.: Машгиз, 1956. С. 86-112.

139.MeissnerM. Долговечность цилиндрических винтовых пружин // Экспресс – информация. Детали машин.М.: ВИНТИ, 1967. №33. С. 4-15.

140. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. 9-е изд., стер. М.: Высш. шк. , 2003. 479 с

141. Казачек Н.Е. Математическая модель усталостной долговечности рессор автомобиля с учетом «Фреттинг-износа» // Повышение качества пружин, торсионов и рессор Белорецк: Издательство ООО «Оникс», 2001. С.122-127.

142. 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.

143. 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. АНРФ, 2003. С.137-142.

145. Щербаков В.И. Исследование работоспособности пружин из различных материалов // Конструирование и технология изготовления пружин / Межвузовский сб. науч. тр., Устинов, 1986. С.127-135.

146. Рогожина А.Е., Романов В.И. Прочность железнодорожных пружин// Конструирование и технология изготовления пружин / Межвузовский сб. науч. тр., Устинов, 1986 С.156-170.

147. Ивлев Д.Д. К теории простого деформирования пластических тел // ПММ, 1955. Т.ХІХ. Вып. 6. С.734-735.

148. Вахтель В.Ю. Построение поля характеристик винтовой пружины сжатия // Вестник машиностроения 1968. №7. С.30-32.

149. Зотьев А.И. Об остаточных деформациях стельных пружин в зависимости от термической обработки проволоки // Вопросы проектирования, изготовления и службы пружин / Под ред. Н.Н. Давиденкова. Л: Машгиз, 1955. С.183-208.

150. Повышение надежности пружин /Под ред.Е.А. Наумова. Л: 1965. 48с.

151. Средства контроля винтовых пружин сжатия / Н.М.Бабин, Голованов Е.Д., Гогха Ш.И. и др. М.: Машиностроение, 1983. 70с.

152. Райхельсон Е.Р. Влияние отклонений геометрии винтовых цилиндрических пружин на их изготовление и испытание. Л., 1964. 18с.

153. Федыкин В.П., Дорошев Ю.П., Фомичев А.В. Устройство модели УКР-1 для контроля и разбраковки пружин // Кузнечно-штамповочное производство. 1980. №7. С.33-34

155. Астафьев В.Л. Номограммы и таблицы для расчета пружин и пружинных механизмов .М.: ИГД, 1965. 59с.

156. Ильюшин А.А. Пластичность. М. – Л.: ГТИ, 1948. 346 с.

157. Пономарев С.Д. Расчеты на прочность в машиностроении // Под общей редакцией Пономарева С.Д. .М. Машгиз.-1958.-Т2. 974 с.

158. 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.

159. Лавриненко Ю.А. Изучение зависимости качества наклёпа от объёма загрузки пружин в дробемётную камеру. / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2002. С. 42-45.

160. Шухгалтер Л.Я. Управление качеством машин. М.:Машиностроение, 1977. 96 с.

161. Левковский Е.Н. О долговечности винтовых пружин // Вестник машиностроения. 1966. №3. С.9-14.

162. 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 Белков.- Г.Р.№. 012001.08424 инв.№012001.04766. - Челябинск, ЮрГУ. С. 64-92.

163. 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.

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

165. Заседателев С.М. Навивка пружин с начальным натяжением // Расчеты на прочность элементов машиностроительных конструкций: Тр.МВТУ. 1955. № 31. С.109-119.

166. Белков Е.Г., Кривощанов В.В., Вершигора С.М., Кривощанов М.В. Несущая способность стержня под воздействием крутящего, изгибающего моментов и перерезывающей силы // Машины и технология обработки материалов давлением: Сб. научн. трудов. Челябинск: Изд. ЮУрГУ. 1999. С.218-223.

167. 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.

168. 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.

169..54. Дробеструйная обработка, определения, характеристики, оценки, назначения. // ТУ ФИАТ - ВАЗ 50150, АвтоВАЗ, 1965г. 11 с.

171. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для ВУЗов. Изд. 4-е, М.: Машиностроение, 1977,423 с.

172. Лысов М.Н. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. М: Машиностроение, 1966. 23 с.

173. Белков Е.Г., Кривошапов В.В., Вершигора С.М., Кривошапов М.В. Диаграмма деформирования нетрадиционной пружинной стали 40С2А // Машины и технология обработки материалов давлением: Сб. научн.трудов. - Челябинск: Изд. ЮУрГУ. 1999. С. 223-225.

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

175. Патент RU 2208056 С2 7 С21Д9/02. Способ изготовления высоконагруженных пружин сжатия / Ю.А. Лавриненко и др. Опубл. 10.07.2003. Бюл. № 19.

176. 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.

177. 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.

178. Лавриненко Ю.А. Уменьшение силы шагообразования при безоправочной навивке ответственных пружин сжатия // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2009. №10. С.11-15.

179. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах. Под общей редакцией д. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. Том 1. М.: Машиностроение, 1988. 831 с.

180. 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.

181. 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.

182. 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.

183. Лавриненко Ю.А. Анализ возможных вариантов технологий упрочнения пружин клапана двигателя внутреннего сгорания. / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2002. №3. С.39-41.

184. 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.

185. 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.

186. 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.

187. Саверин М.М. Дробеструйный наклёп. М.:Машгиз, 1955. 136 с.

188. Лавриненко Ю.А. Назначение отпуска после навивки пружин. // Прогрессивные технологии в машиностроении : Сб. науч. тр. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. 2002. С. 136-139.

189. 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. 2001. 46 с.

190. Белков Е.Г., Лавриненко Ю.А., Фадеев В.В. Результаты испытаний на выносливость пружин клапана двигателя ВАЗ-2112 // Абразивный инструмент и металлообработка: сборник научных трудов Челябинск, 2001 г. С.78-82.

191. Лавриненко Ю.А. Напряженно-деформированное состояние при навивке пружин под воздействием комбинированного нагружения // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Том 15. № 9. С. 399-404.

192. Ржаницын А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов. Стройиздат. Москва. 1954. 288 с.

193. Шнейдерович Р.М. Прочность при статическом и повторно-статическом нагружениях. М.: Машиностроение, 1968. 343 с.

194. Математическое моделирование процесса упрочнения пружин клапана двигателей автомобилей // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. Том 15. №7. С. 302-310.

195. Патент RU 2210486 С2 7 В 24 С 7/00. Устройство для крепления пластинки при контроле интенсивности дробеметного наклёпа при обработке пружин / Лавриненко Ю.А. и др. Опубл. 20.08.2003. Бюл. № 23.

Дубль			
Взам.			
Подл.	4452	06.06.2001	

Изм.	Лист	№ докум	Классиф.
нов	-	13.031.200	8.3.006.0201

02100.57630 36

ОАО - Автоном 2112-1007020

Пружина клапана

Согласовано

Исполнитель № 13
А.С. Булаев
 22.03.2001

Утверждено

ЦО. Технического директора
Ю.А. Павлинов
 6.06.2001

КОМПЛЕКТ ДОКУМЕНТОВ

на единичный технологический процесс

13

Главный метролог

А.А. Тихонов
 22.05.2001

Главный технолог

Ф.А. Хасанов
 05.06.2001

СТП 4.05.067.0201

2112-1007020 06.06.2001

02100.57630 2

2112-1007020

10100.57560

К/М	Мет. Изв.	РМ	Опер.	Код	наименование операции	Объемные документы						
						КН	ОП	Кшт	Тпа	Тшт		
Б	Код наименования оборудования				Г	Р	УГ	ОНП	ЗВ	ЕН	КМ	Н. раск
К/М	Наименование детали, сб. единицы, или материала											
А 01	13	УККцБ	025	0331	Контроль							60103.30783
Б 02												
А 03	13	411	030	4130	Шлифовальная							60100.57995
Б 04	0011033130	Торцешлифовальный станок FSA-6										0,19274
05												
А 06	13	УККцБ	035	0200	Контроль							60103.30777
07												
А 08	13	611	040	0125	Промывка							02201.00083
Б 09	0604010130	Моечная машина 141-021										0,0020
10												
А 11	13	411	045	0378	Контроль магнитно-люминисцентный							60303.00001
12					Дефектоскоп 505-022							0,08
13					Допустимый брак 3%							
А 14	13	УККцБ	050	0390	Контроль							60103.30784
15												
А 16	13	611	055	0125	Промывка							02201.00083
Б 17	0604010130	Моечная машина 141-021										0,0020

13

02100 57630 3

2112-1007020

10100 57560

Код документа
Код функционала оборудования

Область документа

Пр	Р	УТ	КР	КТ	КН	ОП	Кат	Тех	Док
Обозначение под					ОГН	ВВ	НН	КН	Н расх

13 611 080 0134 ; Дробеметная

01300 27024

0601006130 "Установка Рапдбогп"

001148

Загрузка бункера не более 45кг. Скорость дробемета 65м/с.
 Время обработки 16 мин - справочное, зависит от твердости дробы,
 изношенности дробы и др. Стрела прогиба пластины А 0,40... 0,45мм.
 Дробь ДСП 0,5 545 ГОСТ 11964-81

13 ЧРКВВ 065 0390 ; Контроль

60103 30785

13 411 070 5154 ; Термо-механическая

60100 57996

0606024130 Печь Fiat №5

012234

13

13 ЧРКВВ 075 0390 ; Контроль

60103 30785

13 611 080 0125 ; Промывка

02201 00083

0604010130 Моечная машина 141-021

000203

Дубл. _____
 Взам. _____
 Подл. 4452 *Р. М. К.* 06.06.2001

02100.57530 9

2112-1007020 10100.57560

А	Цех Уч. ФМ Спер.				Код, наименование, обозначение	Обозначение документа										
	Код, наименование, обозначение					СМ	У	Р	УТ	КР	КОИД	КН	ОБ	Кл	Т	Т
К/М	Наименование детали, сб, единицы				Обозначение, код	К	О	О	О	О	О	О	О	О	О	О
A 01	13	411	085	0315	Контроль	60100.57997										
B 02	0011248130	Установка АЕ 3.1000				0048669										
03	Допустимый брак 7%															
04																
05																
A 06	13	УКК, 13	090	0200	Контроль	60103.30787										
07																
A 08	13	411	095	4130	Шлифовальная специальная	60100.58003										
B 09	0003620130	Установка Н914-06				038390										
10																
A 11	13	УКК, 13	100	0200	Контроль	60103.30788										
12																
A 13	17		105	7137	Фосфатирование	02371.00024										
14																
A 15	17	УКК, 17	110	0390	Контроль	60303.70057										
16																
17																

13

Дубл.
Взам.
Подл. 4452 06.06.2001

02100.57530

2112 - 1007020

10100.57560

A	Цех Уч. РМ Опер.				Код, наименование	Обозначение документа									
	Код, наименование					СМ	Р	УТ	КР	КСИД	КН	ОП	Кш	Тш	Еш
К/М	Наименование детали, сб. единицы, пла.					Обозначение код					ОП	ЕВ	ЕН	Кш	Еш
A-01	41	115	0850	Упаковывание		02308	00027								
B-02															
03		120	0401	Транспортирование											
04				После каждой производственной операции следует											
05				транспортирование: внутрицеховое: тара Н904-113											
06				межцеховое по техпроцессу 01204.00018.											
07				Допустимые технологические отходы 10%											
08				Производственный контроль по СТП 4.10.028.1502.											
09															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															

13

2452 ШПД № 06.06.2001

02100.57630 1 2

Яковлева	В.Сед	19.04.01
Абдрахманов	А.Хай	24.04.01
Радичев	А.Иван	30.05.2001
Целиханова	И.Иван	10.05.01
Бикчиева	И.Иван	31.05.2001

ОАО «АВТОНОРМАЛЬ»

2112-1007020

60100.57994

Пружина клапана

13 411 010



- 1 Направление навивки - правое.
- 2 Полное число витков $n = 5,95 \pm 0,05$
- 3 Рабочее число витков $n = 3,9$
- 4 Опорные витки должны быть плотно поджатты

Наименование операции				Материал	
Навивка				Проволока	
Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры, мм	МВ	КОИД
		0,02479	$\phi 3,6 \pm 0,025 \times 415$	0,03314	
Оборудование, устройство ЧПУ				Обозначение программы	
пружинонавивочный автомат FS-5				6829-6068-32	
Тс	Тв	Тп.а	Тшт.	СОЖ	
0,0385	0,00266	0,00575	0,0469	—	

4 09.0285.0201

13

- 1 Навить деталь согласно эскизу, выдерживая размеры ①, ②
 - 2 Перед навивкой серийной партии пружин изготовить технологические образцы 10...20 шт для определения величины изменения размеров ①, ② после термической обработки и других технологических операций. К навивке серийной партии приступать при соответствии технологических образцов прошедших весь технологический цикл согласно маршрутной карте 10100.57560, карте эскизов 20100.57694
 - 3 Окрашенные пружины с дефектами отобрать и предъявить контролеру УККц №13
 - 4 Проверить размеры: ① ②
- ① $\phi 18,9 \pm 0,15$ 8390-7008-34 1 Калибр

4452 Директ. 06.06.2001

2412-1001020

01	② 478 ± 0,2	8390-7008-34	1	Калибр
02	Число витков полное	$n_1 = 5,95 \pm 0,05$	1	Калибр
03	Поджатие витка	8390-6427	1	Калибр
04	5 Периодичность контроля размеров	каждые 30 минут	по 10 шт.	
05	6 В сопроводительной документации партии деталей указать длину и время начала набивки			
06	7 После окончания набивки партии пружин, проверить контролеру ВК калибр			
07	6802-6145-01	Направляющая левая		
08	6802-6007-29	Направляющая средняя		
09	6802-6008-24	Направляющая правая		
10	6802-6006-02	Планка средняя		
11	6802-6005-37	Планка правая		
12	6801-6001-05	Оправка		
13	6800-6041-03	Ролик набивки		
14	6804-6009-18	Нож		
15	6805-6052	Лапка шага правая		
16	6800-6007-29	Ролик подающий		
17	6800-6067	Ролик направляющий		
18	8 После смены инструмента пружины набить пружины на дефектоскопе 505 ДРП			

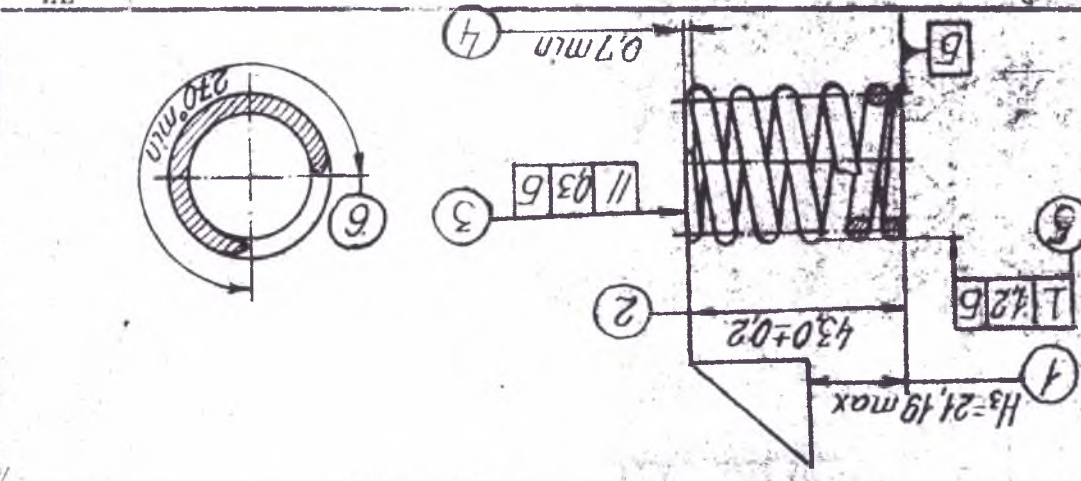


наличие рисок

№ 64	№ 12	4452
№ 64	№ 12	4452

Исполн.	Яковлева	15.03.2001
Провер.	Гадрахманов	15.03.2001
Исполн.	Ришар	15.03.2001
Исполн.	Литманова	15.03.2001
И. Ростр.	Яковлева	15.03.2001

Наименование операции	Шлифовальная
Профиль и размеры	ММ, КТ
Обозначение, условное ЧПУ	0,025±0,025 φ3,6±0,025 x 4,15
Торцевшлифовальный станок	FSH-6
Росчерк	1280-8020-69
Лист	0,1666 0,001 0,025 0,19224



U 10040 891-97

1 Шлифоваль оба торца одновременно, выдерживая размеры и параметры (1) (2) (3) (4) (5) (6)

2 Перед шлифовкой сериной парши пружин изготовить технологические образцы 10-20 шт

3 Не допускается появление голубого налета на торцах пружины при размерах и параметрах (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10)

4 Шлифоваль при пражке шлифовальных кругов не более 0,1 мм за один проход

4452 06.06.2001

02100.57630 2

2112-1007020

60100.57995

030

- 4 Проверить размеры и параметры: ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥
- 5 После окончания шлифовки партии детали предъявить на проверку контролеру ЧКК. №13
- ① $H_3 = 21,19 \text{ max}$ - высота пружины сжатой до соприкосновения витков
8292-4302 Ручной пресс, концевые меры 3-НЗ ГОСТ 9038-90
 - ② $43,0 \pm 0,2$ 8390-4313-01 Регулируемый калибр для контроля высоты пружины
 - ③ $\frac{1}{10} 0,3 5$ 8532-6007 Приспособление для замера параллельности торцев
Индикатор ЦЧ10 кл1 ГОСТ 577-68
 - ④ $0,7 \text{ min}$ 8113-6020-16 Калибр-скоба
 - ⑤ $\frac{1}{1} 1,2 5$ 8590-6061-10 Калибр для контроля перпендикулярности
Щуп набор №3 ТУ2-034-225-87
 - ⑥ 270° min 8390-6284-25 Калибр для контроля числа витков

Установить пружину на калибре. Смотреть сверху. Угол шлифовки должен быть не меньше 0,75 части окружности.

8280-8020-69 1 Кассета

4(ЛП) 600x80x305 14А(24А) 80 СТ1-СТ2Б 35 м/с ГОСТ 2424-83 2 Круг шлифовальный

2103-6061 2 Планшайба

2495-6015 2 Шарошка

1280-6053/001 1 Сегмент подвижный

13

4452 06.06.2001

02100.57630

3

2112-1007020

60100.57995

030

7280-6053/002	1	Сегмент стола
7280-6053/003	1	Сегмент подвижный
7280-6053/004	1	Сегмент стола
7280-6053/005	1	Сегмент подвижный

13

02100.57630

2

2112 - 1007020

60100.57996

070

6 Прижимы с цветными побежалостями, начиная с бледно-красного (253°C), фиолетового (295°C), являются недопустимым браком.

7 Вероятность контроля размеров каждые 30 минут по 10 штук.

8 После окончания осадки партии, детали предъявить контролеру УККЧБ

7892 - 6037 Пуансон

7892 - 6031-03 8 Втулка

7892 - 4302

1 Ручной пресс

FN=230,4...249,6 Н (23,52...25,48 кгс)

Весы "Робат" SF 25-2

Калибр для контроля перпендикулярности
щупнабор № 7У2-034-225-87

8532 - 6007

Приспособление для замера параллельности
индикатор 104105 кат. 1002571-87

9 Согласно Уогою.0767-96, с целью избежания брака, останавливать печь только после полной выгрузки деталей из печи.

13

02100.57630 | 1 | 2

2112-1007020

60100.57997

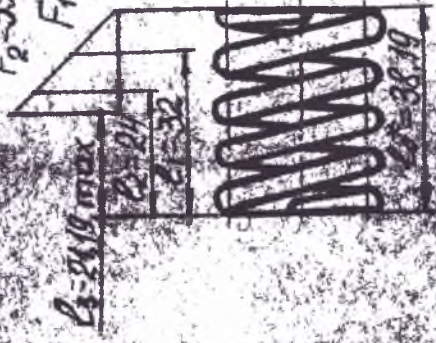
Пружина клапана

13 | 44 | 085

ОАО
АВТОНОРМАЛЬ

14.04.81
3.05.80
18.05.81
31.05.80

$F_2 = 550,0 \pm 27,5 \text{ Н} (56,1 \pm 2,8 \text{ кгс})$
 $F_1 = 240,0 \pm 9,6 \text{ Н} (24,50 \pm 0,98 \text{ кгс})$



Контроль по нагрузке

0,02479 $\phi 3,6 \pm 0,025 \times 415$

Сортировочный автомат
АЕ-3 1000

7892 - 6034-07

004 00000 000609 004669

Ц 4 09 0285 0201

1 Осадить пружину три раза до прикосновения витков

Сортировать по нагрузке три раза до прикосновения витков
Завешенные и заниженные по нагрузке пружины - брак, отсортировать -
вать в брак пружины красные, синие, фиолетовые.

7892 - 6034/1001 - 06 24 Пята в сборе

7892 - 6034/1004 1 Пружин

Допустимый брак не более 7%

13

01
02
03
04
05
06
07
08
09
10

Настройка автомата АЕ-3-1000 для контроля F_1 и F_2 , H_3
 Таблица 1

№	Контролируемые параметры	Обозначение	Установившееся значение	Примечание
1	Высота реадки пружины, мм	* *	—	
2	Высота подъема пуансона, мм	A	~ 43 мм	
3	Нижняя точка измерения, мм	Ц	23,8 мм	
4	Высота первой нагрузки, H_1 , мм	L1	32 мм	
5	Высота второй нагрузки, H_2 , мм	L2	24 мм	** Устанавливается на осадочных пуансонах
6	Минимальное значение нагрузки F_{1min} , Н	G1	230,4 Н (23,52 кгс)	Фактическое значение определяется путем измерения минимальной высоты сжатой пружины на позиции измерения.
7	Максимальное значение первой нагрузки F_{1max} , Н	G2	249,6 Н (25,48 кгс)	
8	Минимальное значение второй нагрузки F_{2min} , Н	G3	522,5 Н (53,3 кгс)	
9	Максимальное значение второй нагрузки F_{2max} , Н	G4	577,5 Н (58,9 кгс)	Величина показаний манометра ~ 10 ба,
10	Минимально допустимое значение сжатой пружины H_{3min} , мм	G5*	20,3 мм	
11	Максимальное значение сжатой пружины	G6	21,19 мм	

13

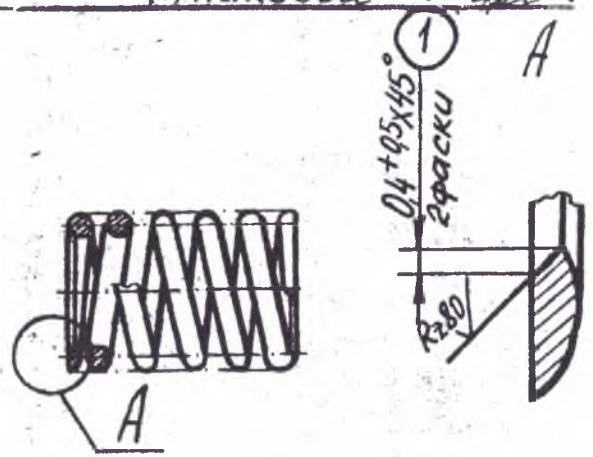
Дубл.									
Взам.									
Подл.	4452	06.06.2001							

02100.57630

Разраб.	Яковлева	Е.Умар		2112-1007020	60100.58003
Провер.	Габдрахманов	Умар	2112		
Нормпр.	Ртищев	Умар	2112		
МЭ	Лышманова	Умар	10.05.01		
Н. контр.	Аникиева	Умар	31.05.2001		

Пружина клапана

13 | 411 | 095



Наименование операции			Материал	
Шлифовальная специальная			Проволока 3,6. Уст 60С20	
Твердость	ЕВ	МД	Профиль и размеры	МЭ
			ф3,6 ± 0,025 x 4,15	0,0330
Оборудование, устройство ЧПУ			Обозначение программы	
Установка Н914-06				
Го	Тв	Тп.з.	Тшт.	СЗЖ
0,0333	0,0006	0,05009	0,38829	

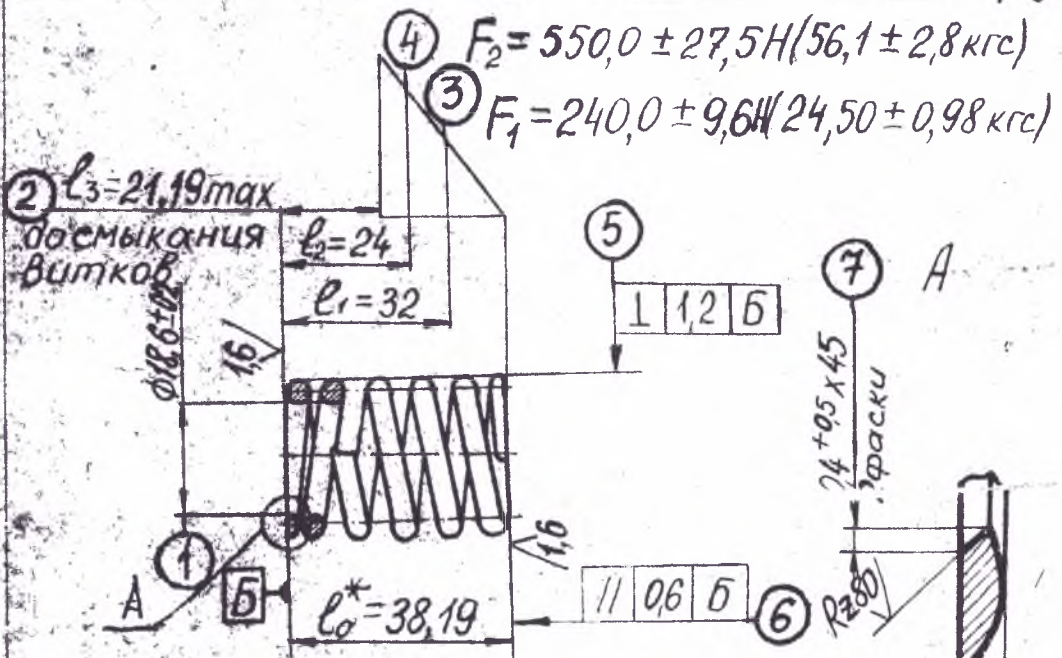
Р	Ц 10040.891-97	ЦН	Цили В
01			
02	1 Шлифовать фраску с двух сторон поочередно, выдерживая размер ①		
03	2 Проверить размер ①:		
04	① 0,4 +0,5 x 45° Штангенциркуль ШЦ1-125-01 ГОСТ 166-89 угломер типа 2 со значением отсчета по нониусу 2' ГОСТ 5378-88		
05	Периодичность контроля размеров каждые 30 мин по 10 деталей		
06	Следы от абразивного инструмента на поверхности пружины не допустимы.		
Т 07	2703 - 6045	1	Головка шлифовальная
08			
09			
10			

13

карта 02100.57630

Дубль									
Взам.									
Подл.	4452	06.06.2001						02100.57630	
Разработал	Яковлева	Е.Яков		ОАО	212-1007020			20100.51694	
Проверил	Габдрахманов	2001	2.004.01	Автомобиль					
Изм.	М.Э.	Лишманова	15.05.01						
И.контр.	Аникиева		31.05.2001						

Пружина клапана



Материал			
Наименование и марка			
Проболока 36 Олева 60SCRD40S Т1М145-020а-46			
Допускается Проболока 36 Олева 70SCRD40S			
Зернистость			
Профиль и размеры		Характер	
φ3,6 ± 0,025 x 415		0024	
Направление намотки		правое	
Расчет пружины			
d, мм	n, витков	n1, витков	Dcp, мм
3,6 ± 0,025	3,885	5,885 ± 0,250	φ22,2 ± 0,2
Нам. расчетной нагрузки от мин. температурных деформаций			
Δd = 0,01 мм	ΔD = 0,1 мм	Δn = 0,2 витков	ΔF = 0,5 Н
ΔP1 = 2,66 Н (0,272 кгс)	ΔP2 = 3,24 Н (0,331 кгс)	ΔF1 = 15,4 Н (1,57 кгс)	ΔF2 = 19,3 Н (1,97 кгс)
ΔP2 = 6,1 Н (0,623 кгс)	ΔP = 7,43 Н (0,758 кгс)	ΔF2 = 35,50 Н (3,61 кгс)	ΔF = 44,3 Н (4,51 кгс)

- 1 Число рабочих витков n=3,885
- 2 Полное число витков n1=5,885 ± 0,250
- 3 Размер для справок
- 4 Опорные витки должны быть плотно поджаты.
- 5 Опорные поверхности должны быть обработаны на участке 270° мин.
- 6 Покрытие фосфатирование (Fost) по ТУ 5.00432

13

ЦАО
 Автономная 2112-1007020 | 42100.57624

Пружина клапана

A

С	НПП			Обозначение ДСЕ			Наименование ДСЕ			КП
	Цех	Уч.	ГМ	Опер.	Код.	наименование	операции	Кол.	Наименование	

С₀₁ 2112-1007020 Пружина клапана

В₀₂ 13 411 010 2134; Навивка

Д₀₃ 0416136130 Пружинонавивочный автомат FS-5

6829 - 6068 - 32 Схема расположения инструме

Т 6802 - 6145 - 01 1 Направляющая левая

6802 - 6007 - 29 2 Направляющая средняя

6802 - 6008 - 24 1 Направляющая правая

6802 - 6006 - 02 2 Планка средняя

6802 - 6005 - 37 1 Планка правая

6801 - 6001 - 05 1 Оправка

6800 - 6041 - 03 2 Ролик навивки

6804 - 6009 - 18 1 Нож

13 6805 - 6052 1 Лапка шага правая

11 6800 - 6007 - 29 6 Ролик подающий

15 6800 - 6067 2 Ролик направляющий

16 8390 - 7008 - 34 1 Калибр (навивочный)

17 8390 - 6284 - 25 1 Калибр для контроля числа витков

18 8390 - 6427 1 Калибр для контроля поджатия витков

13

20

В₂₁ 13 411 030 4130; Шлифовальная

Д₂₂ 00Н033130 Торцешлифовальный станок FSA-6 B/S

Т₂₃ 7280 - 8020 - 69 1 Кассета

24 1(ПП) 600x80x805 14А(24А) ГОСТ 1-СТ2 635м/с

25 ГОСТ 2424-83 2 Круг шлифовальный

Проверил	Э.Коблева	Б.И.Иванов
М.З.	И.И.Иванов	И.И.Иванов

14.52 06.06.2011

Дубл.
Ваян.
Похи.

02100.57630

2

3

С 40

Автономная

2112-1007020

42100.57624

С	ИПП	Обозначение ДСЕ		Наименование ДСЕ		КН
В	Цех	РМ	Уч. Р. Опер.	Код, наименование операции		
1	Опер.	Обозначение ТО		Код	Наименование ТО	
ИПП		Код, наименование оборудования				

2703 - 6061 2 Планшайба
 2795 - 6015 2 Шарошка
 7280 - 6053 / 001 1 Сегмент подвижный
 7280 - 6053 / 002 1 Сегмент стола
 7280 - 6053 / 003 1 Сегмент подвижный
 7280 - 6053 / 004 1 Сегмент стола
 7280 - 6053 / 005 1 Сегмент подвижный
 8390 - 4313 - 01 1 Калибр
 8532 - 6007 1 Приспособление для
 замера параллельности торцев
 8113 - 6020 - 16 1 Калибр-скоба
 8390 - 6284 - 25 1 Калибр для контроля числа витков
 8590 - 6061 - 10 1 Калибр для контроля перпендикулярно.
 Щуп набор №3 ТУ 2-034-22-87
 Индикатор ИЧ 10 кл. Г. СТ 577-68

В 17 13 611 060 0134; Дробемётная
 Д 18 0601006130 Дробемётная установка "Рапдвогп"
 Т 19 8540 - 4302 / 2 1 Пластина-эталон
 20 8540 - 4302 1 Приспособление для наклеивания
 дробей эталонных пластин
 21 8540 - 4301 1 Приспособление-индикатор

13

В 24 13 411 070 6154; Термо-механическая

0606024130 Речка 1201 №5

4892 - 6031 - 03 8 Шарошка

4892 - 6031 - 03 8 Шарошка

В 03	43	441	085	0815	Контроль по нагрузке
Д 03		0011248130			Сортировочный автомат АЕ-3.1000
Т 05		7892	6034-07		Схема расположения инструментов
06		7892	6034/001-16	24	Пята в сборе
06		7892	6034/004	1	Пружин
07					
08					
В 09	13	411	095	4130	Шлифовальная специальная
Д 10		0003620130			Установка Н914-06
Т 11		2703	6045	1	Головка шлифовальная
12					
13					
В 15	13	УКК.В	0100	0200	Контроль
Т 16		8390	6251-08	1	Калибр
17		7892	4302	1	Ручной пресс
18		8597	6061-10	1	Калибр для контроля перпендикулярности
19		8532	6007	1	Пристенное для замера параллельности
20		8113	6020-16	1	Калибр-скоба
21		8390	6284-25	1	Калибр для контроля числа витков
22					Концевые меры 3-НЗ ГОСТ 9038-90
23					Щуп набор №3 ТУ2-034-225-87
24					Индикатор ИЧ10 кл1 ГОСТ 577-68
25					Образец шероховатости 1,6 ШТ ГОСТ 9378-93
26					
27					
28					

13

4452
 05.01.2001

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2210486

Российским агентством по патентам и товарным знакам на основании Патентного закона Российской Федерации, введенного в действие 14 октября 1992 года, выдан настоящий патент на изобретение

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ КРЕПЛЕНИЯ ПЛАСТИНКИ
ПРИ КОНТРОЛЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ДРОБЕМЕТНОГО НАКЛЕПА
ПРИ ОБРАБОТКЕ ПРУЖИН**

Патентообладатель(ли):

*Открытое акционерное общество
"Белевевский завод "Автономаль"*

по заявке № 2001107951, дата поступления: 26.03.2001

Приоритет от 26.03.2001

Автор(ы) изобретения:

см. на обороте

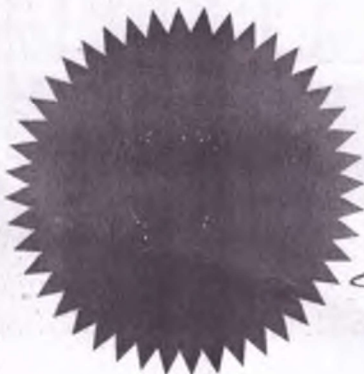
Патент действует на всей территории Российской Федерации в течение 20 лет с **26 марта 2001 г.** при условии своевременной уплаты пошлины за поддержание патента в силе

Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации

г. Москва, 20 августа 2003 г.

Генеральный директор

А.Д. Корсакин



Автор(ы) изобретения:

*Закиров Дильфат Минтияхметович,
Лавриченко Юрий Андреевич, Белков Евгений Григорьевич, Фадеев
Виктор Владимирович, Хайруллин Айрат Асгатович*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2208056

Российским агентством по патентам и товарным знакам на основании Патентного закона Российской Федерации, введенного в действие 14 октября 1992 года, выдан настоящий патент на изобретение

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПРУЖИН СЖАТИЯ

Патентообладатель(ли):

*Открытое акционерное общество
"Белевевский завод "Автоформаль"*

по заявке № 2001103765, дата поступления: 08.02.2001

Приоритет от 08.02.2001

Автор(ы) изобретения:

*Лавринько Юрий Андреевич, Белков Евгений Григорьевич,
Фадеев Виктор Владимирович, Хайруллин Айрат Асгатович*

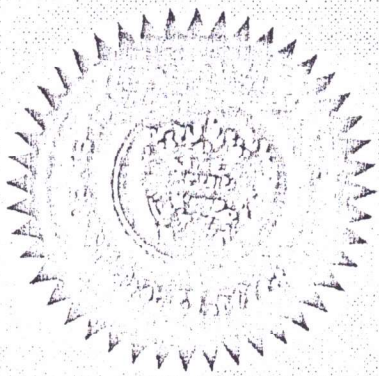
Патент действует на всей территории Российской Федерации в течение 20 лет с 8 февраля 2001 г. при условии своевременной уплаты пошлины за поддержание патента в силе

Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации

г. Москва, 10 июля 2003 г.

Генеральный директор

А.Д. Корсагин
А.Д. Корсагин





ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
"ВОЛГОГРАДСКИЙ МЕТИЗНЫЙ ЗАВОД"

ООО "Волгоградский метизный завод"

Адрес юридический: 400005, г. Волгоград, проспект имени В.И.Ленина, 59

Адрес фактический: 400005, г. Волгоград, проспект имени В.И.Ленина, 59

Расчетный счет 40702810922080007949

Филиал № 2351 Банка ВТБ (ПАО) г. Краснодар

К/с № 30101810703490000758 БИК 040349758

ИНН 3444202195, КПП 344401001 ОГРН 1153443010522 ОКПО 22481052

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

Петров Андрей Викторович

« 10 » января 2018 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

о применении результатов диссертации Лавриненко Юрия Андреевича «Разработка технологии изготовления высоконагруженных пружин сжатия» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением на ООО «Волгоградский метизный завод»

Результаты диссертационной работы Лавриненко Ю.А., заключающиеся в разработанной методике проектирования технологических процессов изготовления высоконагруженных пружин сжатия (патенты на изобретение РФ № 2210486 и 2208056) и новой технологии изготовления пружин клапана трактора МТЗ 245-1007045, 240-1007046 используются в пружинном цехе ООО «ВМЗ».

Использование указанных результатов работы Лавриненко Ю.А. на ООО «ВМЗ» позволило обеспечить высокое качество изготавливаемых пружин клапана трактора МТЗ 245-1007045, 240-1007046 и исключить технологический брак при контроле нагрузки, а также снизить энергозатраты и трудоемкость производства.

Основные результаты диссертации были доложены Лавриненко Ю.А. и обсуждены на совещании технической службы предприятия.

Главный инженер

ООО «Волгоградский метизный завод»

Адрес: г. Волгоград, проспект имени В.И.Ленина, 59

Тел.: 8-905-396-42-95

Е-майл: marestov@vlgmz.ru



Фалькин Сергей Александрович



Сертифицировано
Русским Регистром



Оценка технико-экономической эффективности научно-исследовательских работ.

С 1996 по 2001 годы на ОАО «Автономаль» проведены три научно-исследовательские работы при участии ученых Южно-Уральского государственного университета: 96169 «Исследование причин разрушения и отработка методики усталостных испытаний клапанных пружин», 99015 «Разработка новых технологий производства клапанных пружин, в том числе с применением новых материалов», и 2000222 «Совершенствование технологии изготовления клапанных пружин и модернизация технологического и испытательного оборудования».

Главным итогом проведения НИР является (укрупненно):

- Создание математической модели трехфакторного упрочнения и изучение на ее базе влияния технологических параметров на напряженно-деформированное состояние пружин и их долговечность;
- Выявление и устранение неоптимальных технологических режимов при изготовлении, упрочнении и испытаниях пружин, что позволило повысить их качественные показатели, снизить потери от брака внутри производства, а также резко снизить диаграмму поломок пружин в двигателе;
- Разработка и внедрение новой технологии изготовления всех клапанных пружин с уменьшением трудоемкости и энергозатрат;
- Разработка технологии изготовления наиболее проблемной высоконагруженной и ответственной пружины 2112 – 1007020;
- Разработка рекомендаций по модернизации и настройке технологического и испытательного оборудования с целью предотвращения случаев выпуска некачественной продукции или необоснованного ее бракования.

Большинство приведенных пунктов технико-экономической эффективности трудно поддается расчету. Но по некоторым из них можно привести оценочный расчет.

1. Снижение поломок пружин в двигателе.

Основываясь на диаграмме поломок пружин 2108 – 1007020, приведенной на рис. 1 (данные АвтоВАЗа), определим экономическую эффективность по формуле:

$$\mathcal{E}_1 = c \cdot m \cdot d[d] \cdot k, \quad \text{где}$$

$c \approx 99,5$ рублей – стоимость ремонта двигателя.

$m \approx 780000$ – количество выпущенных двигателей в год.

$k \approx 0,5$ – коэффициент, учитывающий дополнительное влияние качества металла и др.

$[d] = 0,01$ – предельный уровень дефектности (1%).

$d_{cp} = 0,2$ – коэффициент изменения среднегодового уровня дефективности до и после совершенствования технологии.

$$\mathcal{E}_1 = 99,5 \cdot 780000 \cdot 0,2 \cdot 0,01 \cdot 0,5 \approx 77610 \text{ руб/год}$$

2. Снижение трудоемкости при переходе на новую технологию.

$$\mathcal{E}_2 = T \cdot m \cdot \Gamma / \phi \cdot k = L \cdot \Gamma, \quad \text{где}$$

$T \approx 0,002$ – снижение трудоемкости изготовления одной пружины.

$m = 13500000$ – количество выпускаемых пружин в год.

$\phi = 2070$ – годовой фонд времени работы, часов.

$k = 0,8$ – коэффициент занятости рабочих.

L = уменьшение численности работающих.

$\Gamma = 30000$ рублей, средняя годовая зарплата одного работающего.

$$\mathcal{E}_2 = 0,002 \cdot 13500000 \cdot 30000 / 2070 \cdot 0,8 = 16,3 \text{ чел} \cdot 30000 \text{ руб} = 489000 \text{ руб/год}$$

3. Снижение расхода электроэнергии.

При снижении температуры термоосадки с 380°C до 240°C потребляемая мощность уменьшается более чем в 2 раза. Экономический эффект можно посчитать по формулам:

$$\Delta E_{\text{год}} = N_y \cdot m \cdot k_c \cdot k \cdot \phi \cdot \lambda,$$

$$\mathcal{E}_3 = \Delta E_{\text{год}} \cdot C, \quad \text{где}$$

$\Delta E_{\text{год}}$ - изменение годового потребления электроэнергии, квт·час.

$N_y = 24$ квт – установленная мощность одной печи термоосадки.

m – количество одновременно работающих печей.

$k_c = 0,5$ – коэффициент спроса.

$k = 0,5$ – коэффициент уменьшения потребляемой мощности.

$\phi = 4140$ час – годовой фонд времени работы оборудования.

$\lambda = 0,8$ – коэффициент загрузки оборудования.

$C = 0,3$ руб. – стоимость одного квт·часа.

$$\Delta E_{\text{год}} = 24 \cdot 10 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 4140 \cdot 0,8 = 198720 \text{ квт·час}$$

$$\mathcal{E}_3 = 198720 \cdot 0,3 = 59616 \text{ руб.}$$

4. Снижение внутривозвратских потерь от брака на 2%.

Точных цифр по снижению брака нет из-за трудностей при его учете. Поэтому расчет условный:

$$\mathcal{E}_4 = c \cdot m \cdot k_1, \quad \text{где}$$

$c = 3,9$ руб. = стоимость одной пружины.

$m = 13500000$ штук – годовая программа.

$k_1 = 0,02$ – коэффициент снижения брака.

$$\mathcal{E}_4 = 3,9 \cdot 13500000 \cdot 0,02 = 1053000 \text{ руб.}$$

Таким образом, оценочный расчет экономии по пунктам 1, 2, 3 составит

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 = 1679,2 \text{ тыс руб/год}$$

И условный оценочный расчет экономии от снижения брака на 2% (например, с 5% до 3%) составит

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \mathcal{E}_4 = 1053 \text{ тыс руб/год}$$

И.о. Технического директора
ОАО «Автономаль»

Зам. Гл. технолога
по пружинному производству

Начальник бюро пружин отдела
перспективных технологий

Ведущий инженер-плановик
отдела перспективных технологий



Хасанов Ф.А.

Фадеев Д.И.

Фадеев В.В.

Теплякова С.В.

Результаты расчета по главе 2

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
43.091	48.076	0.000	0.801	0.005	0.624	-0.000
43.091	30.394	0.000	0.900	0.003	0.459	-0.000
9.606	20.279	0.000	0.600	0.023	0.821	-0.000
0.719	13.729	0.000	0.100	0.058	0.993	-0.000
13.729	9.606	0.000	0.901	0.009	0.457	-0.000
0.919	8.137	0.000	0.201	0.094	0.979	-0.000
0.364	6.946	0.000	0.099	0.114	0.990	-0.000
0.152	2.675	0.000	0.099	0.285	0.963	-0.000
1.865	1.166	0.000	0.901	0.071	0.438	-0.000
1.312	0.719	0.000	0.899	0.106	0.420	-0.000
0.814	0.485	0.000	0.799	0.287	0.489	-0.000
0.422	0.485	0.000	0.499	0.631	0.605	-0.000
0.814	0.073	0.000	0.900	0.220	0.166	0.000

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
43.091	48.076	0.200	0.801	0.005	0.624	0.002
43.091	30.394	0.200	0.900	0.003	0.459	0.003
1.312	24.847	0.200	0.101	0.032	0.994	0.006
9.606	20.279	0.200	0.600	0.023	0.821	0.007
0.719	13.729	0.200	0.100	0.058	0.993	0.011
13.729	9.606	0.200	0.901	0.009	0.456	0.009
0.919	8.137	0.200	0.201	0.094	0.979	0.019
0.364	6.946	0.200	0.099	0.114	0.989	0.022
1.865	5.163	0.200	0.501	0.110	0.875	0.027
0.364	3.030	0.200	0.201	0.245	0.956	0.049
3.922	2.675	0.200	0.901	0.033	0.451	0.032
0.919	2.368	0.200	0.501	0.230	0.850	0.059
0.919	1.658	0.200	0.600	0.258	0.771	0.079
0.364	1.658	0.200	0.301	0.389	0.886	0.087
0.096	1.312	0.200	0.100	0.510	0.875	0.110
0.719	0.633	0.200	0.700	0.365	0.573	0.160
0.633	0.266	0.200	0.700	0.468	0.373	0.256
0.919	0.223	0.200	0.901	0.158	0.268	0.192
0.633	0.096	0.200	0.700	0.507	0.161	0.327

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
43.091	48.076	0.400	0.801	0.005	0.624	0.005
43.091	30.394	0.400	0.900	0.003	0.459	0.006
1.312	24.847	0.400	0.101	0.032	0.994	0.012
9.606	20.279	0.400	0.600	0.023	0.821	0.013
0.719	13.729	0.400	0.100	0.058	0.993	0.022
13.729	9.606	0.400	0.900	0.009	0.456	0.018
1.475	8.137	0.400	0.301	0.089	0.956	0.036
0.919	8.137	0.400	0.201	0.094	0.978	0.037
1.865	5.163	0.400	0.500	0.110	0.873	0.055

0.364	3.030	0.400	0.200	0.245	0.950	0.098
3.922	2.675	0.400	0.899	0.033	0.450	0.063
1.475	2.100	0.400	0.699	0.157	0.704	0.117
0.485	1.475	0.400	0.400	0.386	0.823	0.188
0.185	1.036	0.400	0.201	0.568	0.773	0.267
1.658	0.919	0.400	0.901	0.076	0.395	0.161
0.266	0.633	0.400	0.300	0.669	0.581	0.386
0.364	0.556	0.400	0.399	0.636	0.524	0.405
0.266	0.556	0.400	0.300	0.696	0.523	0.420
1.166	0.422	0.400	0.900	0.102	0.298	0.256
0.485	0.266	0.400	0.500	0.629	0.273	0.503
0.096	0.266	0.400	0.101	0.846	0.225	0.573
1.036	0.223	0.400	0.901	0.108	0.206	0.314
0.096	0.223	0.400	0.099	0.853	0.188	0.583

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
43.091	48.076	0.800	0.801	0.005	0.624	0.009
43.091	30.394	0.800	0.899	0.003	0.459	0.011
1.312	24.847	0.800	0.101	0.032	0.994	0.025
9.606	20.279	0.800	0.600	0.023	0.821	0.027
1.865	16.624	0.800	0.201	0.046	0.980	0.036
0.719	13.729	0.800	0.100	0.058	0.992	0.045
13.729	9.606	0.800	0.900	0.009	0.456	0.036
1.475	8.137	0.800	0.300	0.089	0.953	0.073
0.919	8.137	0.800	0.200	0.094	0.974	0.074
4.489	6.946	0.800	0.700	0.050	0.731	0.073
1.865	2.675	0.800	0.701	0.122	0.691	0.183
0.485	2.368	0.800	0.301	0.284	0.874	0.245
3.030	1.865	0.800	0.901	0.040	0.408	0.168
0.122	1.865	0.800	0.100	0.382	0.852	0.312
0.919	1.475	0.800	0.600	0.260	0.666	0.334
2.368	1.312	0.800	0.901	0.049	0.372	0.219
0.633	1.166	0.800	0.501	0.367	0.632	0.426
1.312	0.919	0.800	0.801	0.143	0.427	0.362
0.223	0.633	0.800	0.200	0.630	0.369	0.662
0.485	0.312	0.800	0.399	0.576	0.202	0.690
0.364	0.312	0.800	0.301	0.638	0.192	0.711
0.122	0.312	0.800	0.101	0.710	0.179	0.733
0.122	0.266	0.800	0.100	0.716	0.152	0.739
0.122	0.223	0.800	0.099	0.720	0.128	0.743
1.036	0.053	0.800	0.799	0.144	0.044	0.550
1.036	0.037	0.800	0.800	0.142	0.031	0.551
1.036	0.024	0.800	0.801	0.141	0.020	0.552
1.036	0.013	0.800	0.801	0.140	0.012	0.552

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
---	---	---	---	----	----	---

43.091	48.076	1.600	0.801	0.005	0.624	0.019
43.091	30.394	1.600	0.899	0.003	0.459	0.023
1.312	24.847	1.600	0.101	0.032	0.992	0.049
9.606	20.279	1.600	0.599	0.023	0.819	0.054
1.865	16.624	1.600	0.200	0.046	0.977	0.072
0.719	13.729	1.600	0.099	0.058	0.987	0.088
3.441	9.606	1.600	0.500	0.060	0.868	0.118
3.922	8.137	1.600	0.599	0.057	0.803	0.133
0.919	8.137	1.600	0.199	0.094	0.961	0.147
0.223	3.922	1.600	0.100	0.196	0.903	0.303
3.441	3.441	1.600	0.800	0.056	0.554	0.242
1.658	3.030	1.600	0.601	0.138	0.700	0.338
3.922	2.100	1.600	0.900	0.027	0.346	0.262
0.312	2.100	1.600	0.200	0.315	0.691	0.538
0.485	1.865	1.600	0.300	0.315	0.622	0.577
0.919	1.658	1.600	0.501	0.248	0.543	0.568
0.312	1.312	1.600	0.200	0.404	0.450	0.719
0.152	1.312	1.600	0.099	0.425	0.445	0.732
0.485	1.166	1.600	0.300	0.384	0.410	0.725
1.865	0.814	1.600	0.801	0.077	0.244	0.510
2.675	0.364	1.600	0.900	0.023	0.088	0.405
2.675	0.312	1.600	0.901	0.023	0.075	0.406
1.312	0.223	1.600	0.700	0.132	0.088	0.667
1.312	0.185	1.600	0.701	0.130	0.074	0.669

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
43.091	48.076	3.200	0.800	0.005	0.623	0.037
1.312	24.847	3.200	0.100	0.032	0.986	0.097
1.865	16.624	3.200	0.199	0.046	0.964	0.144
3.030	11.434	3.200	0.401	0.057	0.891	0.203
2.100	11.434	3.200	0.301	0.063	0.923	0.206
3.030	8.137	3.200	0.500	0.068	0.814	0.274
1.166	5.970	3.200	0.299	0.115	0.826	0.389
2.100	5.163	3.200	0.500	0.100	0.720	0.417
6.946	3.441	3.200	0.900	0.014	0.314	0.295
3.922	2.675	3.200	0.799	0.040	0.360	0.453
2.100	2.675	3.200	0.599	0.108	0.451	0.600
0.814	1.475	3.200	0.300	0.245	0.303	0.829
3.441	1.312	3.200	0.799	0.037	0.199	0.537
0.814	1.312	3.200	0.301	0.250	0.276	0.841
0.266	1.312	3.200	0.101	0.309	0.277	0.874
0.266	1.166	3.200	0.101	0.318	0.251	0.885
0.266	1.036	3.200	0.101	0.327	0.227	0.893
1.865	0.919	3.200	0.600	0.109	0.182	0.737
0.266	0.919	3.200	0.100	0.334	0.205	0.901
0.266	0.814	3.200	0.100	0.341	0.185	0.907

0.266	0.719	3.200	0.100	0.347	0.165	0.912
0.266	0.633	3.200	0.099	0.352	0.147	0.916
0.266	0.556	3.200	0.099	0.357	0.131	0.920
5.163	0.422	3.200	0.899	0.011	0.051	0.413
5.163	0.364	3.200	0.900	0.011	0.044	0.413
5.163	0.312	3.200	0.900	0.011	0.038	0.414
5.163	0.266	3.200	0.900	0.011	0.032	0.414
5.163	0.223	3.200	0.900	0.011	0.027	0.414
5.163	0.185	3.200	0.900	0.011	0.022	0.414
5.163	0.152	3.200	0.900	0.011	0.018	0.414
5.163	0.122	3.200	0.900	0.011	0.015	0.414
5.163	0.096	3.200	0.900	0.011	0.012	0.414
5.163	0.073	3.200	0.900	0.011	0.009	0.414
5.163	0.053	3.200	0.900	0.011	0.006	0.414
5.163	0.037	3.200	0.900	0.011	0.004	0.414
0.814	0.037	3.200	0.301	0.289	0.010	0.908
5.163	0.024	3.200	0.900	0.011	0.003	0.414
0.814	0.024	3.200	0.301	0.289	0.007	0.908
5.163	0.013	3.200	0.900	0.011	0.002	0.414
0.814	0.013	3.200	0.301	0.289	0.004	0.908
5.163	0.006	3.200	0.900	0.011	0.001	0.414
0.814	0.006	3.200	0.301	0.289	0.002	0.908
5.163	0.002	3.200	0.900	0.011	0.000	0.414
0.814	0.002	3.200	0.301	0.289	0.001	0.908
5.163	0.000	3.200	0.900	0.011	0.000	0.414
0.814	0.000	3.200	0.301	0.289	0.000	0.908

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
3.441	30.394	6.400	0.201	0.025	0.961	0.157
36.720	24.847	6.400	0.901	0.003	0.439	0.108
1.312	24.847	6.400	0.099	0.032	0.963	0.193
30.394	20.279	6.400	0.900	0.004	0.432	0.130
16.624	9.606	6.400	0.899	0.007	0.368	0.243
3.922	9.606	6.400	0.499	0.053	0.702	0.446
0.556	9.606	6.400	0.099	0.079	0.791	0.489
0.485	5.970	6.400	0.101	0.113	0.544	0.722
11.434	3.922	6.400	0.899	0.007	0.213	0.365
5.163	3.922	6.400	0.701	0.037	0.324	0.596
0.485	3.922	6.400	0.100	0.142	0.394	0.832
0.485	3.441	6.400	0.100	0.150	0.358	0.855
2.675	1.312	6.400	0.499	0.078	0.142	0.820
2.675	1.166	6.400	0.501	0.077	0.127	0.822
0.919	1.166	6.400	0.199	0.178	0.152	0.932
0.919	1.036	6.400	0.200	0.180	0.137	0.936
0.919	0.919	6.400	0.201	0.181	0.124	0.940

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
1.658	30.394	12.800	0.100	0.026	0.912	0.314
24.847	24.847	12.800	0.800	0.008	0.544	0.266
8.137	20.279	12.800	0.500	0.026	0.719	0.426
1.166	20.279	12.800	0.100	0.038	0.813	0.465
30.394	16.624	12.800	0.899	0.003	0.347	0.267
5.163	16.624	12.800	0.400	0.035	0.684	0.526
13.729	5.970	12.800	0.799	0.009	0.222	0.530
1.865	5.163	12.800	0.199	0.078	0.290	0.884
0.919	5.163	12.800	0.100	0.086	0.295	0.897
9.606	4.489	12.800	0.699	0.017	0.197	0.653
3.922	3.030	12.800	0.400	0.054	0.173	0.865
6.946	1.658	12.800	0.599	0.026	0.083	0.765
6.946	1.475	12.800	0.600	0.025	0.074	0.766
2.675	1.475	12.800	0.300	0.071	0.097	0.925
6.946	1.312	12.800	0.600	0.025	0.066	0.767
2.675	1.312	12.800	0.301	0.071	0.087	0.926
6.946	1.166	12.800	0.600	0.025	0.059	0.767
0.814	1.166	12.800	0.099	0.118	0.090	0.974
6.946	1.036	12.800	0.601	0.025	0.052	0.768
0.814	1.036	12.800	0.099	0.119	0.081	0.976
6.946	0.919	12.800	0.601	0.025	0.046	0.768
0.814	0.919	12.800	0.099	0.120	0.073	0.977
6.946	0.814	12.800	0.601	0.025	0.041	0.768
0.814	0.814	12.800	0.100	0.120	0.065	0.978
5.163	0.719	12.800	0.499	0.037	0.040	0.837
1.658	0.719	12.800	0.199	0.094	0.054	0.962
0.814	0.719	12.800	0.100	0.121	0.058	0.979
5.163	0.633	12.800	0.499	0.037	0.035	0.838
1.658	0.633	12.800	0.199	0.094	0.048	0.963
0.814	0.633	12.800	0.100	0.122	0.052	0.980
5.163	0.556	12.800	0.499	0.037	0.031	0.838
1.658	0.556	12.800	0.200	0.093	0.042	0.963
0.814	0.556	12.800	0.100	0.122	0.046	0.981
5.163	0.485	12.800	0.499	0.037	0.027	0.838
1.658	0.485	12.800	0.200	0.093	0.037	0.964
0.814	0.485	12.800	0.100	0.123	0.040	0.982
5.163	0.422	12.800	0.499	0.037	0.023	0.838
1.658	0.422	12.800	0.200	0.093	0.032	0.964
0.814	0.422	12.800	0.100	0.123	0.035	0.982
5.163	0.364	12.800	0.500	0.037	0.020	0.838
1.658	0.364	12.800	0.200	0.093	0.028	0.964
0.814	0.364	12.800	0.100	0.123	0.031	0.982
5.163	0.312	12.800	0.500	0.037	0.017	0.838
1.658	0.312	12.800	0.200	0.093	0.024	0.965
0.814	0.312	12.800	0.100	0.124	0.027	0.983

5.163	0.266	12.800	0.500	0.037	0.015	0.838
1.658	0.266	12.800	0.201	0.093	0.021	0.965
0.814	0.266	12.800	0.100	0.124	0.023	0.983
5.163	0.223	12.800	0.500	0.037	0.012	0.838
1.658	0.223	12.800	0.201	0.093	0.017	0.965
0.814	0.223	12.800	0.100	0.124	0.019	0.983
5.163	0.185	12.800	0.500	0.037	0.010	0.838
1.658	0.185	12.800	0.201	0.093	0.014	0.965
0.814	0.185	12.800	0.100	0.124	0.016	0.984
5.163	0.152	12.800	0.500	0.037	0.008	0.838
1.658	0.152	12.800	0.201	0.092	0.012	0.965
0.814	0.152	12.800	0.100	0.124	0.013	0.984
5.163	0.122	12.800	0.500	0.037	0.007	0.838
1.658	0.122	12.800	0.201	0.092	0.009	0.965
0.814	0.122	12.800	0.100	0.124	0.011	0.984
5.163	0.096	12.800	0.500	0.037	0.005	0.838
1.658	0.096	12.800	0.201	0.092	0.007	0.965
0.814	0.096	12.800	0.100	0.125	0.008	0.984
5.163	0.073	12.800	0.500	0.037	0.004	0.838
1.658	0.073	12.800	0.201	0.092	0.006	0.965
0.814	0.073	12.800	0.100	0.125	0.006	0.984
5.163	0.053	12.800	0.500	0.037	0.003	0.838
1.658	0.053	12.800	0.201	0.092	0.004	0.965
0.814	0.053	12.800	0.100	0.125	0.005	0.984
5.163	0.037	12.800	0.500	0.037	0.002	0.838
1.658	0.037	12.800	0.201	0.092	0.003	0.965
0.814	0.037	12.800	0.100	0.125	0.003	0.984
5.163	0.024	12.800	0.500	0.037	0.001	0.838
1.658	0.024	12.800	0.201	0.092	0.002	0.965
0.814	0.024	12.800	0.100	0.125	0.002	0.984
5.163	0.013	12.800	0.500	0.037	0.001	0.838
1.658	0.013	12.800	0.201	0.092	0.001	0.965
0.814	0.013	12.800	0.100	0.125	0.001	0.984
5.163	0.006	12.800	0.500	0.037	0.000	0.838
1.658	0.006	12.800	0.201	0.092	0.000	0.965
0.814	0.006	12.800	0.100	0.125	0.001	0.984
5.163	0.002	12.800	0.500	0.037	0.000	0.838
1.658	0.002	12.800	0.201	0.092	0.000	0.965
0.814	0.002	12.800	0.100	0.125	0.000	0.984
5.163	0.000	12.800	0.500	0.037	0.000	0.838
1.658	0.000	12.800	0.201	0.092	0.000	0.965
0.814	0.000	12.800	0.100	0.125	0.000	0.984

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
2.675	48.076	25.600	0.100	0.016	0.864	0.395
30.394	20.279	25.600	0.799	0.005	0.346	0.465

3.922	16.624	25.600	0.201	0.033	0.414	0.811
5.970	13.729	25.600	0.300	0.031	0.353	0.824
1.865	13.729	25.600	0.099	0.038	0.363	0.860
43.091	9.606	25.600	0.901	0.002	0.138	0.392
3.441	5.163	25.600	0.199	0.045	0.170	0.937
1.658	4.489	25.600	0.100	0.055	0.158	0.959

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
1.475	0.000	24.847	0.100	0.063	-0.000	0.988
5.970	0.000	20.279	0.401	0.032	-0.000	0.892
0.556	0.000	8.137	0.100	0.187	-0.000	0.975
1.475	0.000	6.946	0.299	0.130	-0.000	0.932
9.606	0.000	5.970	0.901	0.006	-0.000	0.414
1.658	0.000	3.922	0.499	0.122	-0.000	0.835
0.719	0.000	2.675	0.300	0.337	-0.000	0.895
0.223	0.000	2.368	0.100	0.449	-0.000	0.907
3.030	0.000	1.865	0.899	0.019	-0.000	0.416
1.475	0.000	1.865	0.701	0.108	-0.000	0.677
0.266	0.000	0.919	0.201	0.670	-0.000	0.771
1.312	0.000	0.719	0.900	0.050	-0.000	0.408
0.266	0.000	0.223	0.300	0.874	0.000	0.455
0.422	0.000	0.122	0.499	0.770	0.000	0.301

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
1.475	0.200	24.847	0.100	0.063	0.009	0.988
5.970	0.200	20.279	0.401	0.032	0.008	0.892
2.368	0.200	11.434	0.301	0.078	0.015	0.933
0.633	0.200	9.606	0.099	0.162	0.022	0.979
0.556	0.200	8.137	0.100	0.186	0.025	0.975
2.100	0.200	6.946	0.401	0.095	0.023	0.890
0.485	0.200	6.946	0.099	0.212	0.028	0.970
9.606	0.200	5.970	0.901	0.006	0.013	0.413
0.312	0.200	3.922	0.099	0.325	0.042	0.944
1.036	0.200	3.030	0.400	0.228	0.056	0.873
0.223	0.200	2.368	0.101	0.445	0.060	0.905
3.441	0.200	2.100	0.901	0.017	0.037	0.411
0.814	0.200	2.100	0.400	0.328	0.075	0.847
1.475	0.200	1.865	0.699	0.111	0.067	0.674

1.166	0.200	1.865	0.600	0.183	0.077	0.750
0.312	0.200	1.312	0.201	0.572	0.089	0.824
1.475	0.200	0.814	0.900	0.048	0.100	0.397
0.223	0.200	0.633	0.199	0.747	0.135	0.688
0.266	0.200	0.266	0.300	0.836	0.228	0.459
0.719	0.200	0.096	0.800	0.361	0.327	0.126

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
1.475	0.600	24.847	0.100	0.064	0.027	0.987
5.970	0.600	20.279	0.400	0.032	0.023	0.892
1.036	0.600	16.624	0.101	0.095	0.039	0.984
2.368	0.600	11.434	0.300	0.078	0.046	0.932
0.633	0.600	9.606	0.099	0.157	0.062	0.975
0.556	0.600	8.137	0.100	0.181	0.071	0.970
0.485	0.600	6.946	0.100	0.205	0.080	0.964
9.606	0.600	5.970	0.900	0.006	0.039	0.413
1.312	0.600	5.970	0.300	0.154	0.086	0.921
1.166	0.600	5.163	0.301	0.177	0.098	0.916
0.312	0.600	3.922	0.101	0.311	0.122	0.934
3.922	0.600	2.368	0.900	0.016	0.096	0.404
1.036	0.600	2.100	0.501	0.240	0.193	0.780
0.556	0.600	1.865	0.300	0.404	0.208	0.829
0.185	0.600	1.865	0.100	0.478	0.200	0.856
0.719	0.600	1.166	0.501	0.376	0.297	0.688
1.036	0.600	1.036	0.699	0.217	0.309	0.562
0.633	0.600	0.919	0.500	0.428	0.348	0.633
0.122	0.600	0.919	0.100	0.636	0.312	0.719
0.719	0.600	0.266	0.700	0.366	0.545	0.218
0.556	0.600	0.096	0.599	0.492	0.622	0.088
0.556	0.600	0.073	0.600	0.492	0.624	0.067
0.556	0.600	0.053	0.601	0.492	0.626	0.049

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
3.441	1.800	16.624	0.299	0.055	0.091	0.927
3.441	1.800	11.434	0.399	0.060	0.119	0.879
4.489	1.800	8.137	0.599	0.042	0.140	0.754
11.434	1.800	6.946	0.901	0.005	0.097	0.403
5.163	1.800	6.946	0.700	0.031	0.148	0.666
4.489	1.800	5.970	0.701	0.036	0.171	0.659
3.922	1.800	5.163	0.700	0.043	0.196	0.651
0.312	1.800	3.922	0.101	0.251	0.310	0.869
3.441	1.800	3.030	0.800	0.041	0.275	0.502
1.312	1.800	2.675	0.500	0.178	0.395	0.695
3.922	1.800	1.865	0.900	0.024	0.294	0.309
0.633	1.800	1.312	0.400	0.301	0.671	0.487
1.475	1.800	1.166	0.699	0.153	0.581	0.361
0.266	1.800	1.166	0.200	0.368	0.742	0.460

0.122	1.800	1.036	0.099	0.387	0.786	0.415
3.030	1.800	0.919	0.901	0.039	0.393	0.194
0.122	1.800	0.919	0.101	0.390	0.816	0.370
1.036	1.800	0.814	0.600	0.227	0.707	0.287
1.865	1.800	0.719	0.801	0.106	0.559	0.206
0.556	1.800	0.485	0.400	0.329	0.844	0.190
1.312	1.800	0.422	0.701	0.178	0.689	0.142

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
2.675	5.400	43.091	0.100	0.034	0.121	0.971
2.368	5.400	16.624	0.200	0.064	0.247	0.906
0.719	5.400	9.606	0.100	0.099	0.373	0.850
3.922	5.400	5.970	0.601	0.057	0.480	0.583
3.922	5.400	3.030	0.699	0.056	0.626	0.330
0.312	5.400	3.030	0.101	0.141	0.843	0.414
1.036	5.400	2.368	0.300	0.129	0.866	0.320
1.475	5.400	2.100	0.399	0.118	0.855	0.279
0.633	5.400	2.100	0.199	0.139	0.905	0.288
0.633	5.400	1.865	0.200	0.139	0.920	0.256
8.137	5.400	1.658	0.901	0.015	0.432	0.127
2.675	5.400	1.658	0.599	0.084	0.778	0.205

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
20.279	16.200	48.076	0.500	0.011	0.222	0.797
9.606	16.200	43.091	0.299	0.020	0.269	0.870
3.030	16.200	43.091	0.100	0.026	0.282	0.907
1.865	16.200	24.847	0.100	0.036	0.417	0.823
5.970	16.200	16.624	0.400	0.032	0.556	0.645
1.036	16.200	13.729	0.101	0.045	0.678	0.610
0.919	16.200	9.606	0.100	0.047	0.833	0.438
11.434	16.200	8.137	0.701	0.019	0.646	0.300
4.489	16.200	8.137	0.400	0.039	0.816	0.358
3.030	16.200	6.946	0.299	0.044	0.876	0.314
5.970	16.200	5.970	0.500	0.034	0.823	0.258
1.865	16.200	5.970	0.200	0.047	0.919	0.274

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
0.100	1.475	0.096	0.099	0.469	0.902	0.048
0.100	1.475	0.073	0.099	0.469	0.902	0.036
0.100	1.475	0.053	0.100	0.470	0.903	0.027
0.100	1.475	0.037	0.100	0.470	0.903	0.019
0.100	1.475	0.024	0.100	0.470	0.903	0.012
0.100	1.475	0.013	0.100	0.470	0.904	0.007
0.100	1.475	0.006	0.100	0.470	0.904	0.003
0.100	1.475	0.002	0.100	0.470	0.904	0.001
0.100	1.475	0.000	0.100	0.470	0.904	0.000
0.100	1.312	0.633	0.100	0.499	0.787	0.343
0.100	1.166	0.814	0.100	0.525	0.671	0.482
0.100	1.036	0.814	0.101	0.558	0.607	0.530
0.100	0.919	0.814	0.100	0.588	0.536	0.578
0.100	0.719	0.719	0.100	0.654	0.448	0.608
0.100	0.556	0.633	0.099	0.713	0.369	0.622
0.100	0.422	0.556	0.099	0.764	0.301	0.623
0.100	0.312	0.485	0.101	0.807	0.239	0.613
0.100	0.266	0.485	0.099	0.815	0.202	0.624
0.100	0.122	0.422	0.101	0.856	0.099	0.611
0.100	0.096	0.422	0.100	0.858	0.078	0.613
0.100	0.073	0.422	0.100	0.859	0.059	0.615
0.100	0.053	0.422	0.100	0.860	0.043	0.616
0.100	0.037	0.422	0.100	0.860	0.030	0.617
0.100	0.024	0.422	0.100	0.861	0.019	0.617
0.100	0.013	0.422	0.100	0.861	0.011	0.617
0.100	0.006	0.422	0.100	0.861	0.005	0.617
0.100	0.002	0.422	0.100	0.861	0.002	0.617
0.100	0.000	0.422	0.100	0.861	0.000	0.617

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
0.300	5.163	3.030	0.100	0.147	0.829	0.432
0.300	4.489	3.922	0.100	0.159	0.654	0.623
0.300	3.922	3.922	0.100	0.174	0.574	0.690
0.300	2.368	0.719	0.199	0.304	0.903	0.223
0.300	2.368	0.633	0.200	0.304	0.912	0.197
0.300	2.368	0.556	0.201	0.305	0.919	0.173
0.300	1.166	0.312	0.299	0.501	0.813	0.186
0.300	1.166	0.266	0.300	0.502	0.821	0.159
0.300	1.036	0.556	0.300	0.525	0.711	0.361
0.300	0.919	0.633	0.300	0.549	0.629	0.448
0.300	0.556	1.312	0.200	0.538	0.237	0.793
0.300	0.312	0.485	0.300	0.736	0.257	0.590
0.300	0.122	0.422	0.300	0.786	0.107	0.592
0.300	0.096	0.422	0.299	0.788	0.084	0.595

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
---	---	---	---	----	----	---

0.900	16.624	6.946	0.099	0.047	0.913	0.312
0.900	16.624	5.970	0.100	0.047	0.934	0.269
0.900	16.624	5.163	0.101	0.048	0.949	0.233
0.900	3.441	3.441	0.301	0.172	0.570	0.656
0.900	3.030	1.658	0.399	0.199	0.781	0.384
0.900	2.675	2.100	0.401	0.208	0.660	0.527
0.900	2.368	13.729	0.100	0.101	0.154	0.958
0.900	2.368	5.970	0.199	0.164	0.282	0.881
0.900	2.100	13.729	0.100	0.103	0.140	0.962
0.900	1.865	2.368	0.400	0.235	0.455	0.696
0.900	1.166	1.658	0.501	0.270	0.400	0.668
0.900	1.166	1.036	0.600	0.271	0.531	0.485
0.900	1.036	0.312	0.700	0.272	0.638	0.171
0.900	0.633	0.122	0.800	0.248	0.519	0.087
0.900	0.633	0.096	0.801	0.248	0.521	0.069
0.900	0.556	0.312	0.799	0.244	0.460	0.232
0.900	0.422	0.814	0.699	0.268	0.279	0.552
0.900	0.266	0.053	0.899	0.176	0.322	0.052
0.900	0.266	0.037	0.900	0.175	0.322	0.036
0.900	0.266	0.024	0.900	0.175	0.323	0.023
0.900	0.266	0.013	0.900	0.175	0.323	0.013
0.900	0.266	0.006	0.900	0.175	0.323	0.006
0.900	0.266	0.002	0.900	0.175	0.323	0.002
0.900	0.266	0.000	0.900	0.175	0.323	0.000
0.900	0.223	0.152	0.900	0.169	0.281	0.151
0.900	0.073	0.266	0.901	0.154	0.116	0.291

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
2.700	36.720	36.720	0.100	0.019	0.583	0.695
2.700	20.279	36.720	0.100	0.026	0.371	0.855
2.700	13.729	8.137	0.300	0.050	0.803	0.428
2.700	9.606	5.163	0.400	0.065	0.800	0.382
2.700	5.970	43.091	0.100	0.034	0.131	0.968
2.700	5.163	43.091	0.101	0.035	0.116	0.972
2.700	4.489	8.137	0.399	0.080	0.352	0.786
2.700	3.922	1.475	0.699	0.084	0.680	0.229
2.700	3.441	20.279	0.199	0.058	0.147	0.944
2.700	3.441	5.970	0.500	0.084	0.352	0.734
2.700	3.441	2.368	0.700	0.081	0.577	0.387
2.700	3.030	20.279	0.201	0.058	0.132	0.948
2.700	1.658	0.719	0.899	0.045	0.409	0.170
2.700	1.475	3.441	0.701	0.066	0.238	0.634
2.700	1.312	1.166	0.901	0.038	0.319	0.282

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
8.100	36.720	30.394	0.301	0.018	0.673	0.577

8.100	16.624	4.489	0.601	0.028	0.790	0.181
8.100	11.434	5.970	0.699	0.027	0.641	0.311

a	b	d	N	Mi	Mk	Q
24.300	43.091	30.394	0.600	0.009	0.638	0.439
24.300	36.720	11.434	0.700	0.009	0.701	0.193
24.300	24.847	11.434	0.800	0.008	0.559	0.242
24.300	16.624	43.091	0.599	0.008	0.235	0.726
24.300	16.624	3.922	0.900	0.005	0.444	0.100
24.300	16.624	3.441	0.901	0.005	0.445	0.087
24.300	13.729	9.606	0.900	0.004	0.360	0.250

Программа расчета кривой четвертого порядка в пакете символьных вычислений MAPLE.

```
> restart:
> a:=0.35:
> b:=0.45:
> d:=0.2:
> eu:=4:
> uravn:=(a+x)^2+(b*y+d*(1-x^2))^2+b^2*x^2=1/(eu^2):
> yy:=solve(uravn,y):
> y1:=yy[1]:y2:=x->y1:
> y3:=yy[2]:y4:=x->y3:
> y5(x):=sqrt(1-x*x):y6(x):= - sqrt(1-x*x):
> P:=plot([y2(x),y4(x),y5(x),y6(x)],x= - 1..1,color=black,thickness=2,title=a)
  a=0.35 b=0.45 d=0.2 eu=4):
> with (stats[statplots]):xyexchange(P);
a) a=0.35 b=0.45 d=0.2 eu=4
```


Расчет напряженно-деформированного состояния пружины при термоосадке и дробе метной обработке (Текст программы)

Описание диаграммы деформирования материала при сдвиге

ORIGIN = 1

N = 9 i = 1..N

$$k_{\tau} = (0 \ 1 \ 1.06 \ 1.08 \ 1.115 \ 1.12 \ 1.126 \ 1.13 \ 1.17)^T$$

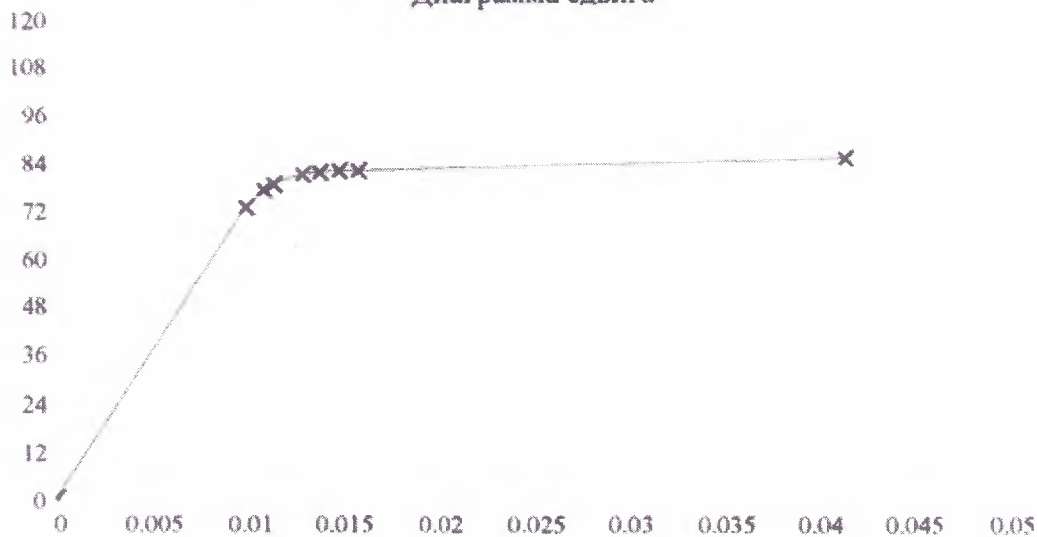
$$k_{\gamma} = (0 \ 1 \ 1.1 \ 1.15 \ 1.3 \ 1.4 \ 1.5 \ 1.6 \ 4.2)^T$$

$$\tau_t = 89 \cdot 0.814 \quad \tau_t = 72.446 \quad G_0 = 8.07 \cdot 10^3 \quad G_{400} = 0.909 \cdot G_0$$

$$\gamma_t = \frac{\tau_t}{G_{400}} \quad \gamma_t = 9.876 \cdot 10^{-3}$$

$$\tau_{0_i} = \tau_t \cdot k_{\tau_i} \quad \gamma_{0_i} = \gamma_t \cdot k_{\gamma_i}$$

Диаграмма сдвига



Уточненный расчет (с учетом кривизны)

Радиус проволоки $r_p = 1.8$ $R = 11.1$ $vit = 3.885$

$$K\theta\lambda = 2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot vit \quad K\theta\lambda = 3007.58 \quad L = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot vit$$

горячая осадка $\lambda = 26$

$$\theta = \frac{\lambda}{K\theta\lambda} \quad \theta = 8.645 \cdot 10^{-3}$$

Число точек по радиусу и углу $n = 60$ $m = 40$

$$dr = \frac{r_p}{n} \quad i = 2..n \quad r_1 = dr \quad r_i = dr \cdot i$$

$$r_{cp1} = \frac{r_1}{2} \quad r_{cp_i} = \frac{r_i + r_{i-1}}{2} \quad \Delta s_1 = \pi \cdot (r_1)^2 \quad \Delta s_i = \pi \cdot [(r_i)^2 - (r_{i-1})^2]$$

$$j = 1..m \quad d\alpha = \frac{2 \cdot \pi}{m} \quad \alpha_j = d\alpha \cdot j$$

$$i = 1..n$$

Деформации и напряжения:

$$\gamma_{\text{наг}_{i,j}} = \frac{R \cdot \theta \cdot r_i}{R + r_i \cdot \cos(\alpha_j)} \quad \text{-деформация сдвига после нагружения}$$

$$\tau_{\text{наг}_{i,j}} = \text{linterp}(\gamma_0, \tau_0, \gamma_{\text{наг}_{i,j}}) \quad \text{-касательные напряжения после нагружения}$$

$$\gamma_{\text{пл}_{i,j}} = \gamma_{\text{наг}_{i,j}} - \frac{\tau_{\text{наг}_{i,j}}}{G_{4000}} \quad \text{-пластическая деформация сдвига после нагружения}$$

$$\text{Ang} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \gamma_{\text{пл}_{i,j}} \cdot r_{\text{ср}_i} \cdot \Delta s_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{R \cdot r_i}{R + r_i \cdot \cos(\alpha_j)} \cdot r_{\text{ср}_i} \cdot \Delta s_i}$$

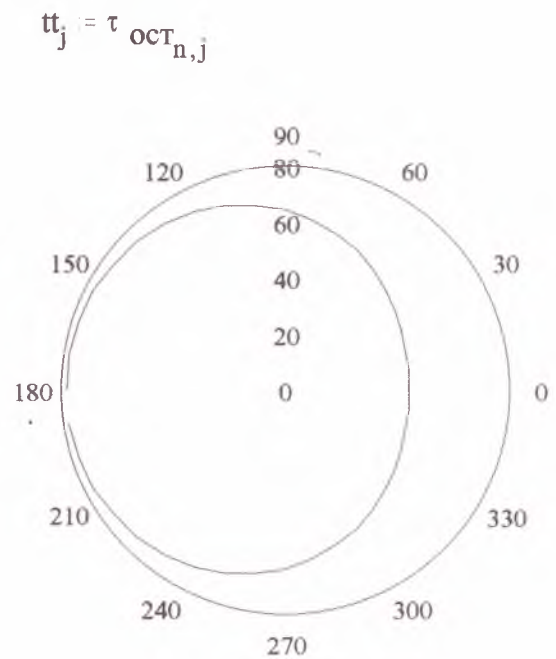
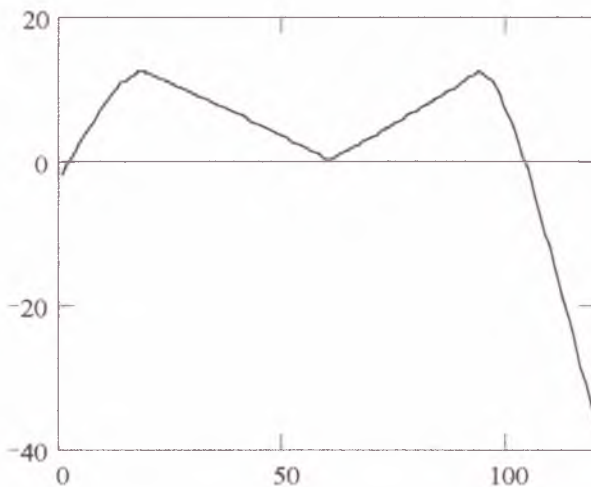
$$K\theta\lambda \cdot \text{Ang} = 4.108$$

$$\tau_{\text{ост}_{i,j}} = G_0 \cdot \left(\text{Ang} \cdot \frac{R \cdot r_i}{R + r_i \cdot \cos(\alpha_i)} - \gamma_{\text{пл}_{i,j}} \right)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \tau_{\text{ост}_{i,j}} \cdot r_{\text{ср}_i} \cdot \Delta s_i = 2.274 \cdot 10^{-12}$$

$$ii = 1..2 \cdot n$$

$$ttt_i = \tau_{\text{ост}_{n+1-i,m}} \quad ttt_{i+n} = \tau_{\text{ост}_{i,\frac{m}{2}}} \quad \min(ttt) = -35.797 \quad \min(\tau_{\text{ост}}) = -35.797$$



$$tt_j = \tau_{\text{ост}_{n,j}}$$

Распределение пластических деформаций по толщине:

Задача о пластинке, подвергнутой дробеструйной обработке

Плоская узкая пластинка длиной L, толщиной t, шириной b обработана дробью. В результате чего она искривилась. Высота полученной дуги - h. Требуется рассчитать поле пластической деформации при заданной глубине наклепа d

$$\text{ORIGIN} := 1 \quad E := 2 \cdot 10^4$$

$$H(x) := \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{-функция Хевисайда}$$

Расчет кривой по h1:

$$\text{len} = 13$$

$$k = 1..13$$

0.84	0
0.88	0.003
0.92	0.013
0.96	0.026
1	0.042
1.04	0.064
1.08	0.1
1.12	0.138
1.16	0.176
1.2	0.21
1.24	0.24
1.28	0.262
1.32	0.274

$$tt = 0, 0.01..1.32 \quad h1(tt) = \text{interp}(\text{pspline}(tp1, hp1), tp1, hp1, tt) \cdot H(tt - tp1_1)$$

Кривизну кара найдем из уравнения:

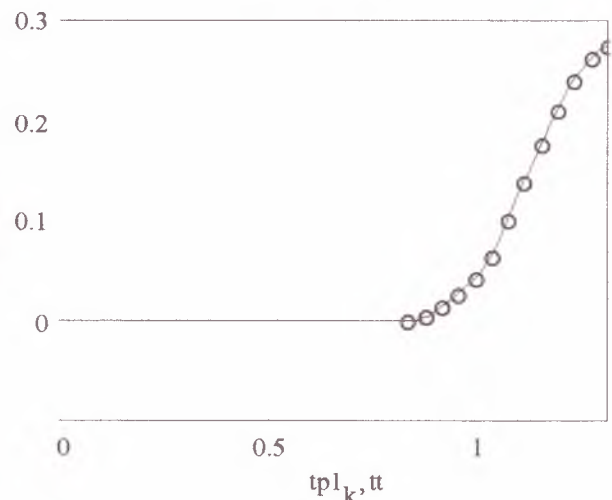
$$L = 2\rho \sin(\arccos[(\rho-h)/\rho])$$

Число точек разбиения $nn = 50$

Длина пластинки, мм $Lpl = 32$

Толщина пластинки, мм $tp1 := tp1_{len}$

Ширина пластинки, мм $bpl = 19$



$$i := 3..nn \quad t_i := tp1_1 + \frac{tp1_{len} - tp1_1}{nn} \cdot i \quad h_i := h1(t_i)$$

$$k = 10^{-10}$$

$$\text{кара}_i := \text{root} \left[\left[2 \cdot \frac{1}{k} \cdot \sin \left[\arccos \left[\left(\frac{1}{k} - h_i \right) \cdot k \right] \right] - \sqrt{Lpl^2 + bpl^2}, k \right] \right] \quad i := 1..nn$$

Матричная модель узкой пластинки

Толщина элем.слоя:

$$\delta 1 := \frac{tp1_{len} - tp1_1}{2 \cdot nn} \quad \delta 1 = 4.8 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta 2 := \frac{tp1_1}{2 \cdot nn} \quad \delta 2 = 8.4 \cdot 10^{-3}$$

Координаты расчетн. точек:

$$y_1 = -\frac{tpl}{2}$$

$$y_{1+i} = y_1 + \delta 1 \cdot i$$

$$y_{1+i+nn} = y_{1+nn} + \delta 2 \cdot i$$

$$y_{1+i+2 \cdot nn} = y_{1+2 \cdot nn} + \delta 2 \cdot i$$

$$y_{1+i+3 \cdot nn} = y_{1+3 \cdot nn} + \delta 1 \cdot i$$

$$i = 1..4 \cdot nn$$

$$A_{i,1} = \frac{y_i + y_{i+1}}{2} \quad A_{i,2} = \frac{1}{Lpl}$$

$$V1_{кэ} = bpl \cdot Lpl \cdot \delta 1$$

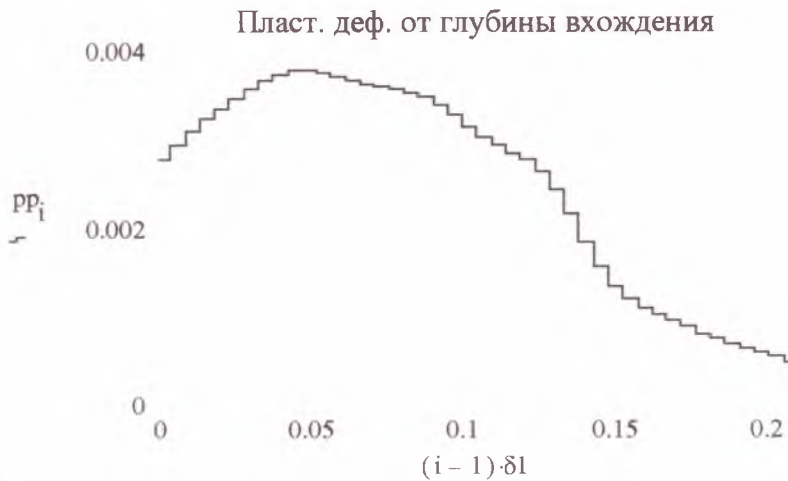
$$V2_{кэ} = bpl \cdot Lpl \cdot \delta 2$$

Вычисление пластической деформации:

```
p ← p'_{2 \cdot nn} ← 0
for k ∈ 1..nn
  for j ∈ 1..2
    for i ∈ 1..2 \cdot (k + nn)
      Ah_{i,j} ← A_{nn+i-k,j}
      Φh_{i,i} ← V1_{кэ} if i ≤ k
      Φh_{i,i} ← V1_{кэ} if i > 2 \cdot (nn + k) - k
      Φh_{i,i} ← V2_{кэ} if (i > k) \cdot (i ≤ 2 \cdot (nn + k) - k)
    B ← Ah^T \cdot Φh
    C ← E \cdot identity(2 \cdot (k + nn))
    K ← B \cdot C \cdot Ah
    Dh ← K^{-1} \cdot B \cdot C
    ph_1 ← 0
    p' ← stack(ph, p')
    кара_k ← \sum_{m=1}^{2 \cdot (k + nn) - 1} Dh_{1,m} \cdot p'_m
    ph_1 ← \frac{\text{кара}_k}{Dh_{1,2 \cdot (k + nn)}}
    p' ← stack(p', ph)
  p'
```

$i = 1..nn$

$$pp_i = P_{4 \cdot nn + 1 - i} \quad \delta r_{пл_i} = \frac{tpl}{2} + A_{i,1}$$



$i = 1..nn$

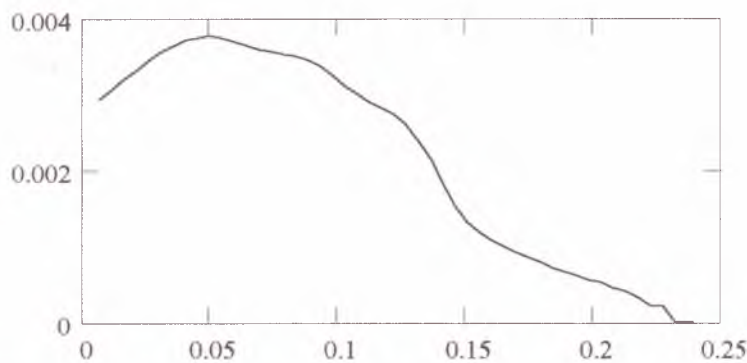
$$ppp_i = pp_{nn+1-i} \quad \delta r_{пл_i} = \delta r_{пл_{nn+1-i}}$$

$$pv_1 = 0 \quad rv_1 = \frac{tpl_{len} - tpl_1}{2} \quad rv_1 = 0.24$$

$$p = \text{stack}(pv, ppp) \quad \delta r_{пл} = \text{stack}(rv, \delta r_{пл})$$

$$r_{вхожд} = \max(\delta r_{пл}) \quad r_{вхожд} = 0.24$$

$k := 1..nn$



Построение вспомогательной функции:

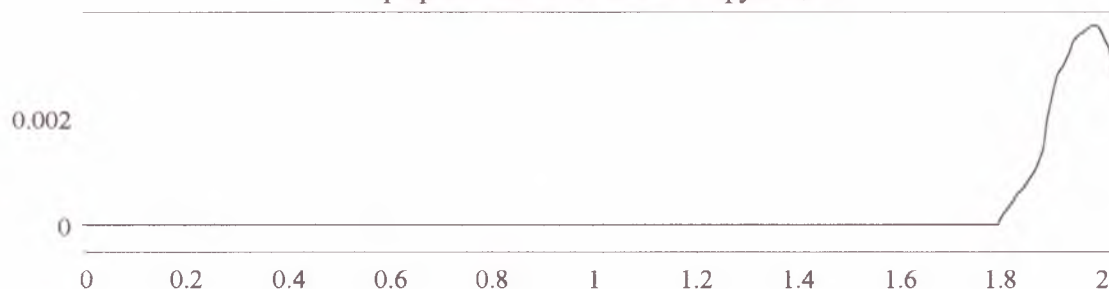
$$P_{help_1} = 0 \quad \delta r_{пл_help_1} = 0 \quad gr = 1.8$$

$k = 1..nn$

$$P_{help_{k+1}} = P_k \quad \delta r_{пл_help_{k+1}} = gr + r_{вхожд} - \delta r_{пл_k}$$

$$\text{plast}(x) = \text{linterp}(\delta r_{пл_help}, P_{help}, x) \quad y = 0, 0.01.. 2.08$$

График вспомогательной функции



Распределение пластических деформаций по толщине:

$$N = 3 \quad k = 1..N$$

$$kl_{\tau} = (0 \ 1.12266 \ 1.17)^T$$

$$kl_{\gamma} = (0 \ 1.12266 \ 4.2)^T$$

$$\tau_t = 89$$

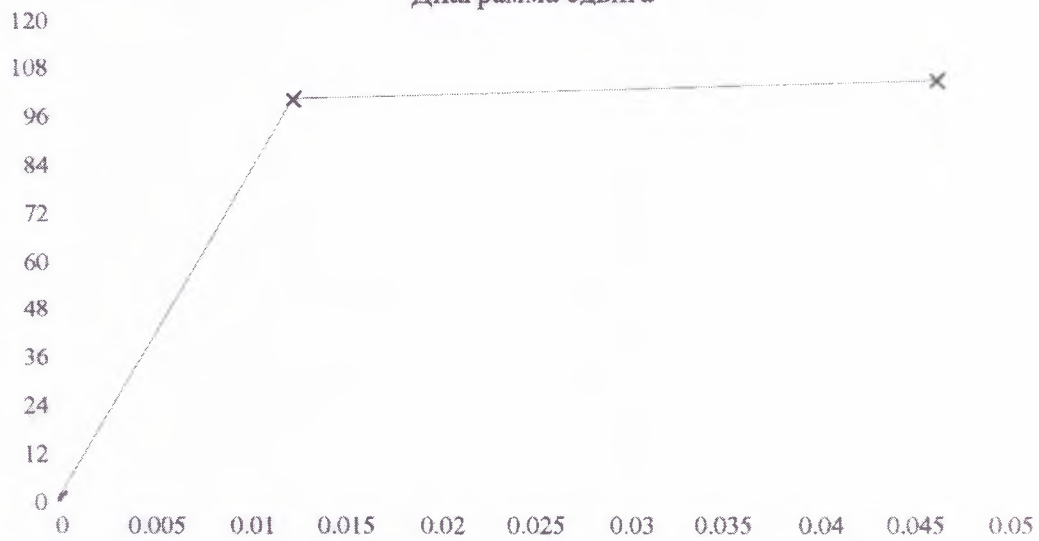
$$G_0 = 8.07 \cdot 10^3$$

$$\gamma_t = \frac{\tau_t}{G_0} \quad \gamma_t = 11.029 \cdot 10^{-3}$$

$$\tau l_k = \tau_t \cdot kl_{\tau_k}$$

$$\gamma l_k = \gamma_t \cdot kl_{\gamma_k}$$

Диаграмма сдвига



$$\tau_t = 89 \cdot 1.12266 \quad \tau_t = 99.917$$

$$\gamma_t = \frac{\tau_t}{G_0} \quad \gamma_t = 0.012$$

$$\tau l^T = [0 \ 99.917 \ 104.13]$$

$$\gamma l^T = [0 \ 0.012 \ 0.046] \quad G_0 = 8.07 \cdot 10^3$$

$$G' = \frac{\tau l_3 - \tau l_2}{\gamma l_3 - \gamma l_2} \quad G' = 124.144$$

$$\text{koef} = \frac{G'}{G_0 - G'} \quad \text{dob}(x) = x \cdot \text{koef} \quad \text{koef} = 0.016$$

$$i = 1..n$$

$$\text{Ang} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \gamma_{\text{пл}_{i,j}} \cdot r_{\text{сп}_i} \cdot \Delta s_i}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{R \cdot r_i}{R + r_i \cdot \cos(\alpha_j)} \cdot r_{\text{сп}_i} \cdot \Delta s_i}$$

$$K_{\theta \lambda} \cdot \text{Ang} = 4.108$$

$$\gamma_{i,j} = \frac{R \cdot \text{Ang} \cdot r_i}{R + r_i \cdot \cos(\alpha_j)} - \gamma_{\text{пл},i,j}$$

Res = for $i \in 1..n$

for $j \in 1..m$

$$\gamma_{i,j} \leftarrow \gamma_{\text{пл},i,j}$$

$$\gamma_{i,j+m} \leftarrow \gamma_{i,j}$$

for $k \in 1..K$

for $i \in 1..n$

$$p_{\text{граф},i,k} \leftarrow \text{plast} \left(\frac{r_{\text{вхожд}}}{K} \cdot k + r_{\text{ср}i} \right) - \text{plast} \left[\frac{r_{\text{вхожд}}}{K} \cdot (k-1) + r_{\text{ср}i} \right]$$

for $j \in 1..m$

$$\gamma_{\text{поправ},i,j} \leftarrow 2 \cdot \sqrt{3} \cdot p_{\text{граф},i,k} \cdot \frac{\gamma_{i+(k-1)n,j+m} - \text{dob}[\gamma_{i+(k-1)n,j}]}{\sqrt{\gamma_t^2 - [\text{dob}[\gamma_{i+(k-1)n,j}] - \gamma_{i+(k-1)n,j+m}]^2}}$$

$$\gamma_{i+k \cdot n,j} \leftarrow \gamma_{i+(k-1)n,j} + \gamma_{\text{поправ},i,j}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \gamma_{i+k \cdot n,j} \cdot r_{\text{ср}i} \cdot \Delta s_i$$

$\theta \leftarrow$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{R \cdot r_i}{R + r_i \cdot \cos(\alpha_j)} \cdot r_{\text{ср}i} \cdot \Delta s_i$$

for $i \in 1..n$

for $j \in 1..m$

$$\gamma_{i+k \cdot n,i+m} \leftarrow \theta \cdot \frac{R \cdot r_i}{\cos(\alpha_j)} - \gamma_{i+k \cdot n,j}$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \text{Res}_{i,j} \cdot r_{\text{ср}i} \cdot \Delta s_i$$

$\theta =$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{R \cdot r_i}{R + r_i \cdot \cos(\alpha_j)} \cdot r_{\text{ср}i} \cdot \Delta s_i$$

$$K\theta \cdot \theta = 4.108$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \text{Res}_{i+k \cdot n,j} \cdot r_{\text{ср}i} \cdot \Delta s_i$$

$\theta d =$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{R \cdot r_i}{R + r_i \cdot \cos(\alpha_j)} \cdot r_{\text{ср}i} \cdot \Delta s_i$$

$$K\theta \cdot \theta d = 3.435$$

$$\text{Osad} = K\theta \cdot \theta d$$

$$K\theta \cdot \theta - K\theta \cdot \theta d = 0.673$$

*уменьшение
наш объем.*

лучше.

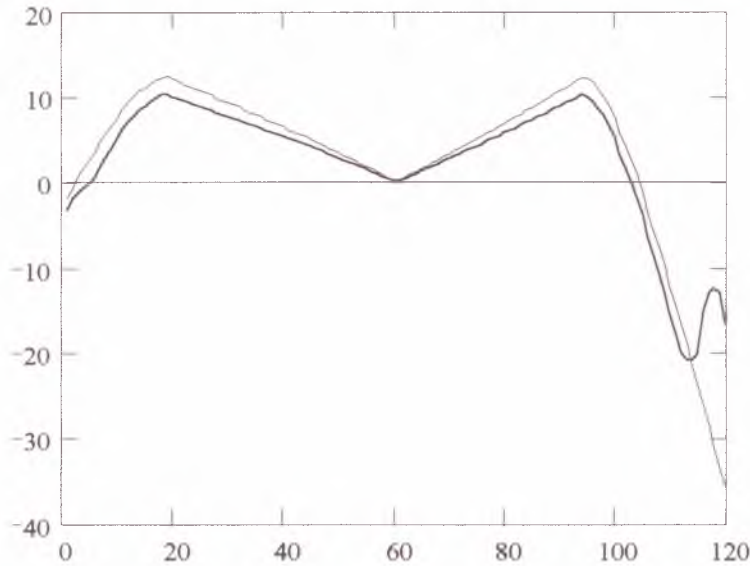
$$k := 1..K + 1 \quad i := 1..n$$

$$K=20$$

$$tt_j := \tau_{\text{ост}_{n,j}} \quad tt2_j := \text{Res}_{n+(K) \cdot n, j+m} \cdot G \cdot 0$$

$$ii := 1..2 \cdot n$$

$$ttt_i := \text{Res}_{n+(K) \cdot n + 1 - i, 2 \cdot m} \cdot G \cdot 0 \quad ttt_{i+n} := \text{Res}_{K \cdot n + i, m + \frac{m}{2}} \cdot G \cdot 0$$



Модель для расчета нормальных напряжений и деформаций

Построение матрицы A:

$\begin{bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_\phi \\ \varepsilon_r \end{bmatrix}$ Будем располагать подряд деформации для одного элементарного объема, столбец деформаций состоит из таких подстлбцов (его длина=3*N).
 ε_ϕ Радиус пробегает от 1 до N. Столбец обобщенных координат выглядит следующим образом: сначала перемещения радиусов (N-штук), затем D-прудлинение пружины.
 ε_r

Связь для ε_z :

$$i := 1..n$$

$$A_{N3 \cdot i - 2, n+1} := \frac{1}{L}$$

Связь для ε_ϕ :

$$A_{N2, 1} := \frac{1}{2 \cdot r_{\text{cp}1}}$$

$$i := 2..n$$

$$A_{N3 \cdot i - 1, i} := \frac{1}{2 \cdot r_{\text{cp}i}}$$

$$A_{N3 \cdot i - 1, i-1} := \frac{1}{2 \cdot r_{\text{cp}i}}$$

Связь для ε_r :

$$A_{N3, 1} := \frac{1}{dr}$$

$$A_{H_{3,i,i}} = \frac{1}{dr}$$

$$A_{H_{3,i,i-1}} = \frac{-1}{dr}$$

Построение матрицы В:

$$i = 1..n \quad k = 1..3$$

$$\Phi_{H_{(i-1) \cdot 3 + k, (i-1) \cdot 3 + k}} = \Delta s_i \cdot L$$

$$B_H := A_H^T \cdot \Phi_H^T$$

Построение матрицы С:

$\mu = 0.25$ - коэффициент Пуассона

$$E1 := \frac{E}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}$$

$$C_{H_{3,i-2,3,i-2}} = (1 - \mu) \cdot E1$$

$$C_{H_{3,i-2,3,i-1}} = \mu \cdot E1$$

$$C_{H_{3,i-2,3,i}} = \mu \cdot E1$$

$$C_{H_{3,i-1,3,i-2}} = \mu \cdot E1$$

$$C_{H_{3,i-1,3,i-1}} = (1 - \mu) \cdot E1$$

$$C_{H_{3,i-1,3,i}} = \mu \cdot E1$$

$$C_{H_{3,i,3,i-2}} = \mu \cdot E1$$

$$C_{H_{3,i,3,i-1}} = \mu \cdot E1$$

$$C_{H_{3,i,3,i}} = (1 - \mu) \cdot E1$$

Построение матрицы К:

$$K_H = B_H \cdot C_H \cdot A_H$$

$$Cp_H = 2 \cdot G_0 \cdot \text{identity}(3 \cdot n)$$

$$Dp_H = K_H^{-1} \cdot B_H \cdot Cp_H$$

Расчет нормальных напряжений и деформаций после дробемета

$$i = 1..n$$

$$p_{H_{3,i-2}} = \text{plast} \left(r_{\text{вход}} + r_{\text{сп}_i} \right)$$

$$p_{H_{3,i-1}} = \text{plast} \left(r_{\text{вход}} - r_{\text{сп}_i} \right)$$

$$p_{H_{3,i}} = -2 \cdot \text{plast} \left(r_{\text{вход}} + r_{\text{сп}_i} \right)$$

$$q_H = Dp_H \cdot p_H$$

$$\varepsilon_H = A_H \cdot q_H$$

$$\sigma_H = C_H \cdot \varepsilon_H - Cp_H \cdot p_H$$

$$i = 1..3 \cdot n$$

$$a_i = \left| (\sigma_H)_i \right| \quad \max(a) = 100.477 \quad \min(a) = 0.728$$

$$\sum_{i=1}^n (\sigma_H)_{3,i-2} \cdot \Delta s_i = 0$$

-проверка нормальной силы

$$\frac{(q_H)_{n+1}}{L} = 5.638 \cdot 10^{-4}$$

-относительное удлинение пружины

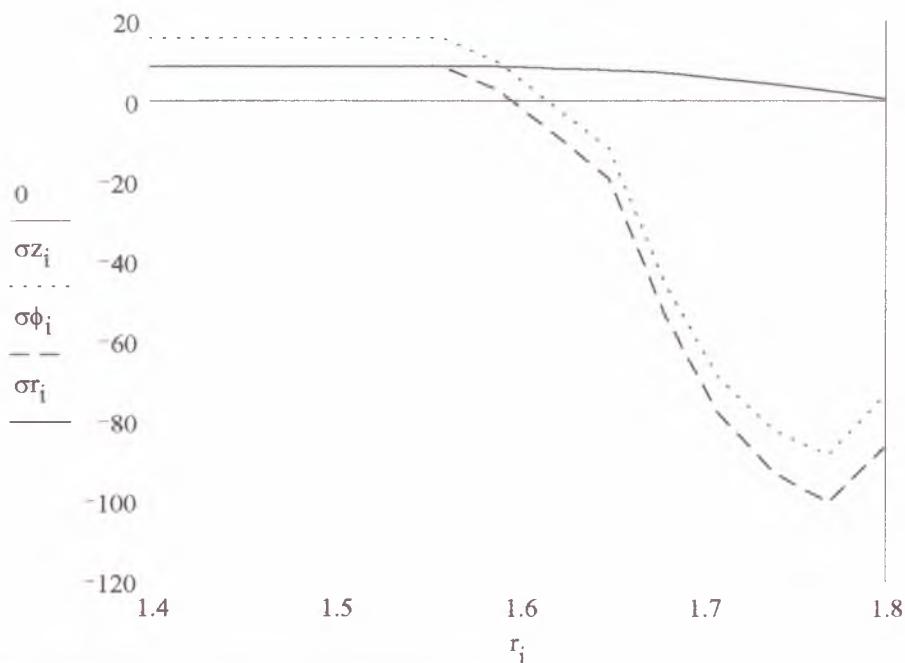
$$i = 1..n$$

$$\sigma_{z_i} = (\sigma_H)_{3 \cdot i - 2}$$

$$\sigma_{\phi_i} = (\sigma_H)_{3 \cdot i - 1}$$

$$\sigma_{r_i} = (\sigma_H)_{3 \cdot i}$$

Нормальные напряжения после дробемета



Расчет второго заневоливания

$$\beta = 1 + \frac{\text{koef}}{G_0} \quad \beta = 1$$

$$\tau_t = 99.917 \quad G_0 = 8.07 \cdot 10^3$$

$$\gamma_{\text{ЭК}_t} = \frac{\tau_t}{2 \cdot G_0} \quad \gamma_{\text{ЭК}_t} = 6.191 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Osad} = 3.435$$

$$\text{Zan2} = \lambda - \text{Osad} \quad \text{Zan2} = 22.565$$

$$\theta_2 = \frac{\text{Zan2}}{3017.67} \quad \theta_2 = 7.478 \cdot 10^{-3}$$

$$\theta_{2_0} = \frac{\text{Osad}}{3017.67} \quad \theta_{2_0} = 1.138 \cdot 10^{-3}$$

Найдем момент начала текучести

$$i = 1..n$$

$$\varepsilon_{0_{H_i}} = \frac{\varepsilon_{H_{3 \cdot i - 2}} + \varepsilon_{H_{3 \cdot i - 1}} + \varepsilon_{H_{3 \cdot i}}}{3}$$

$$e1_i = \varepsilon_{H_{3 \cdot i - 2}} - \varepsilon_{0_{H_i}} - p_{H_{3 \cdot i - 2}}$$

Программа расчета к главе 2

```

unit pruzina;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
  StdCtrls;

type
  TForm1 = class(TForm)
    ComboBox1: TComboBox;
    Memo1: TMemo;
    Button1: TButton;
    Button2: TButton;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
    procedure ComboBox1Change(Sender: TObject);

  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  Form1: TForm1;

implementation
  uses vars, main;
  {$R *.DFM}
  var abd:char;

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var g1,g2,g3,g4,g5,g6,g7,g8,g9,
    g11,g12,g13,g14,g15,g16,g17,g18,g19,
    g21,g22,g23,g24,g25,g26,g27,g28,g29:file;
begin
  AssignFile(g1,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr1.txt');
  reset(g1); seek(g1,0);truncate(g1);closefile(g1);
  AssignFile(g2,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr2.txt');
  reset(g2);seek(g2,0);truncate(g2);closefile(g2);
  AssignFile(g3,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr3.txt');
  reset(g3);seek(g3,0);truncate(g3);closefile(g3);
  AssignFile(g4,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr4.txt');
  reset(g4);seek(g4,0);truncate(g4);closefile(g4);
  AssignFile(g5,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr5.txt');
  reset(g5);seek(g5,0);truncate(g5);closefile(g5);
  AssignFile(g6,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr6.txt');
  reset(g6);seek(g6,0);truncate(g6);closefile(g6);
  AssignFile(g7,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr7.txt');
  reset(g7);seek(g7,0);truncate(g7);closefile(g7);
  AssignFile(g8,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr8.txt');

```

```
reset(g8);seek(g8,0);truncate(g8);closefile(g8);
AssignFile(g9,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr9.txt');
reset(g9);seek(g9,0);truncate(g9);closefile(g9);
AssignFile(g11,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr11.txt');
reset(g11);seek(g11,0);truncate(g11);closefile(g11);
AssignFile(g12,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr12.txt');
reset(g12);seek(g12,0);truncate(g12);closefile(g12);
AssignFile(g13,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr13.txt');
reset(g13);seek(g13,0);truncate(g13);closefile(g13);
AssignFile(g14,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr14.txt');
reset(g14);seek(g14,0);truncate(g14);closefile(g14);
AssignFile(g15,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr15.txt');
reset(g15);seek(g15,0);truncate(g15);closefile(g15);
AssignFile(g16,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr16.txt');
reset(g16);seek(g16,0);truncate(g16);closefile(g16);
AssignFile(g17,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr17.txt');
reset(g17);seek(g17,0);truncate(g17);closefile(g17);
AssignFile(g18,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr18.txt');
reset(g18);seek(g18,0);truncate(g18);closefile(g18);
AssignFile(g19,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr19.txt');
reset(g19);seek(g19,0);truncate(g19);closefile(g19);
AssignFile(g21,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr21.txt');
reset(g21);seek(g21,0);truncate(g21);closefile(g21);
AssignFile(g22,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr22.txt');
reset(g22);seek(g22,0);truncate(g22);closefile(g22);
AssignFile(g23,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr23.txt');
reset(g23);seek(g23,0);truncate(g23);closefile(g23);
AssignFile(g24,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr24.txt');
reset(g24);seek(g24,0);truncate(g24);closefile(g24);
AssignFile(g25,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr25.txt');
reset(g25);seek(g25,0);truncate(g25);closefile(g25);
AssignFile(g26,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr26.txt');
reset(g26);seek(g26,0);truncate(g26);closefile(g26);
AssignFile(g27,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr27.txt');
reset(g27);seek(g27,0);truncate(g27);closefile(g27);
AssignFile(g28,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr28.txt');
reset(g28);seek(g28,0);truncate(g28);closefile(g28);
AssignFile(g29,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr29.txt');
reset(g29);seek(g29,0);truncate(g29); closefile(g29);
Copen;
case abd of
'a':Main_a;
'b':Main_b;
'd':Main_d;
'e':Main_eu;
end;
str(izap[1,1],s1);
str(izap[1,2],s2);
str(izap[1,3],s3);
Memo1.Lines[1]:=s1+s1;
Memo1.Lines[2]:=s2+s2;
Memo1.Lines[3]:=s3+s3;
```

```

Memo1.Lines[4]:='konec rasheta';
end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
close;
end;

procedure TForm1.ComboBox1Change(Sender: TObject);
begin
if ComboBox1.text='a=0' then abd:='a';
if ComboBox1.text='b=0' then abd:='b';
if ComboBox1.text='d=0' then abd:='d';
if ComboBox1.text='e=0' then abd:='e';
end;

end.

```

```

unit main;
interface
uses Vars,dopoln,napryaz;{naprFl;napr_st;}
    Procedure main_eu;
    Procedure main_a;
    Procedure main_b;
    Procedure main_d;
{-----}
implementation
uses pruzina;
{-----}
Procedure main_eu;
const ao=30; dao=30; NaN=30; eps2=0.01;
var jj,ii,i,ind1,ijk:integer;
    Nx,Ny,Nz : extended;
begin
for ijk:=1 to NaN do
begin
a:=ao+(ijk-1)*dao;
Str(a:5:3,s1); Form1.Memo1.Lines[0]:='a='+s1;
for jj:=1 to NaN do
begin
b:=ao+(jj-1)*dao;
Str(b:5:3,srez); Form1.Memo1.Lines[1]:='b='+srez;
for ii:=1 to NaN do
begin
d:=ao+(ii-1)*dao;
Nx:=Mk;Ny:=Q;Nz:=N;
if Mi<eps2 then
begin

```

```

for ind1:=1 to cind do
begin
if abs(Nx-ci[ind1])<eps0 then
begin
inc(izap[ind1,3]);
i:=izap[ind1,3];
CM^[ind1,i,1]:=ci[ind1];
CM^[ind1,i,2]:=Ny;
CM^[ind1,i,3]:=Nz;
end;
if abs(Ny-ci[ind1])<eps0 then
begin
inc(izap[ind1,2]);
i:=izap[ind1,2];
BM^[ind1,i,1]:=Nx;
BM^[ind1,i,2]:=ci[ind1];
BM^[ind1,i,3]:=Nz;
end;
if abs(Nz-ci[ind1])<eps0 then
begin
inc(izap[ind1,1]);
i:=izap[ind1,1];
AM^[ind1,i,1]:=Nx;
AM^[ind1,i,2]:=Ny;
AM^[ind1,i,3]:=ci[ind1];
end;
end;
end;
end;
end;
end;
Pro_Files;
end;
{-----}
Procedure main_a;
var jj,ii,i,ind1:integer;
    Nx,Ny,Nz:real;
begin
a:=0;
for jj:=1 to Na do
begin
d:=sin(arctan(a1-a0)*sin(Pi/2-sin(du*jj)))/
cos(arctan(a1-a0)*sin(Pi/2-sin(du*jj)))+a0;
Str(d:5:3,srez); Form1.Memo1.Lines[0]:='d='+srez;
for ii:=1 to Na do
begin
b:=sin(arctan(a1-a0)*sin(Pi/2-sin(du*ii)))/
cos(arctan(a1-a0)*sin(Pi/2-sin(du*ii)))+a0;
Nx:=Mk;Ny:=Mi;Nz:=Q;
for ind1:=1 to cind do
begin
if abs(Nx-ci[ind1])<eps0 then

```



```

begin
  inc(izap[ind1,3]);
  i:=izap[ind1,3];
  CM^[ind1,i,1]:=ci[ind1];
  CM^[ind1,i,2]:=Ny;
  CM^[ind1,i,3]:=Nz;
end;
if abs(Ny-ci[ind1])<eps0 then
begin
  inc(izap[ind1,2]);
  i:=izap[ind1,2];
  BM^[ind1,i,1]:=Nx;
  BM^[ind1,i,2]:=ci[ind1];
  BM^[ind1,i,3]:=Nz;
end;
if abs(Nz-ci[ind1])<eps0 then
begin
  inc(izap[ind1,1]);
  i:=izap[ind1,1];
  AM^[ind1,i,1]:=Nx;
  AM^[ind1,i,2]:=Ny;
  AM^[ind1,i,3]:=ci[ind1];
end;
end;
end;
end;
Pro_Files;
end;
{-----}
Procedure main_b;
var jj,ii,i,ind1:integer;
    Nx,Ny,Nz:real;
begin
  b:=0;
  for jj:=1 to Na do
  begin
    d:=sin(arctan(a1-a0)*sin(Pi/2-sin(du*jj)))/
      cos(arctan(a1-a0)*sin(Pi/2-sin(du*jj)))+a0;
    Str(d:5:3,srez); Form1.Memo1.Lines[0]:='d='+srez;
    for ii:=1 to Na do
    begin
      a:=sin(arctan(a1-a0)*sin(Pi/2-sin(du*ii)))/
        cos(arctan(a1-a0)*sin(Pi/2-sin(du*ii)))+a0;
      Nx:=Q;Ny:=Mi;Nz:=N;
      for ind1:=1 to cind do
      begin
        if abs(Nx-ci[ind1])<eps0 then
        begin
          inc(izap[ind1,3]);
          i:=izap[ind1,3];
          CM^[ind1,i,1]:=ci[ind1];
          CM^[ind1,i,2]:=Ny;

```

```

    CM^[ind1,i,3]:=Nz;
end;
if abs(Ny-ci[ind1])<eps0 then
begin
    inc(izap[ind1,2]);
    i:=izap[ind1,2];
    BM^[ind1,i,1]:=Nx;
    BM^[ind1,i,2]:=ci[ind1];
    BM^[ind1,i,3]:=Nz;
end;
if abs(Nz-ci[ind1])<eps0 then
begin
    inc(izap[ind1,1]);
    i:=izap[ind1,1];
    AM^[ind1,i,1]:=Nx;
    AM^[ind1,i,2]:=Ny;
    AM^[ind1,i,3]:=ci[ind1];
end;
end;
end;
end;
Pro_Files;
end;
{-----}
Procedure main_d;
var jj,ii,i,ind1:integer;
    Nx,Ny,Nz : real;
begin
    d:=0;
    for jj:=1 to Na do
    begin
        b:=sin(arctan(a1-a0)*sin(Pi/2-sin(du*jj)))/
            cos(arctan(a1-a0)*sin(Pi/2-sin(du*jj)))+a0;
        Str(b:5:3,srez); Form1.Memo1.Lines[0]:='b='+srez;
        for ii:=1 to Na do
        begin
            a:=sin(arctan(a1-a0)*sin(Pi/2-sin(du*ii)))/
                cos(arctan(a1-a0)*sin(Pi/2-sin(du*ii)))+a0;
            Nx:=Mk;Ny:=Mi;Nz:=N;
            for ind1:=1 to cind do
            begin
                if abs(Nx-ci[ind1])<eps0 then
                begin
                    izap[ind1,3]:=izap[ind1,3]+1;
                    i:=izap[ind1,3];
                    CM^[ind1,i,1]:=ci[ind1];
                    CM^[ind1,i,2]:=Ny;
                    CM^[ind1,i,3]:=Nz;
                end;
                if abs(Ny-ci[ind1])<eps0 then
                begin
                    izap[ind1,2]:=izap[ind1,2]+1;

```

```
i:=izap[ind1,2];
BM^[ind1,i,1]:=Nx;
BM^[ind1,i,2]:=ci[ind1];
BM^[ind1,i,3]:=Nz;
end;
if abs(Nz-ci[ind1])<eps0 then
begin
izap[ind1,1]:=izap[ind1,1]+1;
i:=izap[ind1,1];
AM^[ind1,i,1]:=Nx;
AM^[ind1,i,2]:=Ny;
AM^[ind1,i,3]:=ci[ind1];
end;
end;
end;
end;
Pro_Files;
end;
{-----}
END.
```

```

=====
unit napryaz;
=====
interface
uses Vars;
Function N:extended;
Function Mi:extended;
Function Mk:extended;
Function Q:extended;
{-----}
implementation
{-----}
Function Mi:extended;
var kk,fk:integer;
    si,co,p,s,SSS,aa,mo,no,ko:extended;
begin
SSS:=0;
for kk:=1 to pendd do
begin
p:=pind[kk];
for fk:=1 to Nfii do
begin
si:=sinus[fk];
co:=cosinus[fk];
mo:=a+p*si;
no:=b*p*si;
ko:=b*p*co;
aa:=sqrt(sqr(mo)+sqr(no)+sqr(ko+d*(1-p*p*si*si)));
s:=mo/aa;
SSS:=SSS+s*si*dfii*p*p;
end;
end;
Mi:=dp*SSS*3/4;
end;
{-----}
Function Mk:extended;
var kk,fk:integer;
    si,co,p,s,SSS,aa,mo,no,ko,tx,ty:extended;
begin
SSS:=0;
for kk:=1 to pendd do
begin
p:=pind[kk];
for fk:=1 to Nfii do
begin
si:=sinus[fk];
co:=cosinus[fk];
mo:=a+p*si;
no:=b*p*si;
ko:=b*p*co;
aa:=sqrt(sqr(mo)+sqr(no)+sqr(ko+d*(1-p*p*si*si)));
tx:=no/aa;

```

```

    ty:=(ko+d*(1-p*p*si*si))/aa;
    SSS:=SSS+(ty*co+tx*si)*p*p*dfii;
end;
end;
Mk:=dp*SSS*3/Pi/2;
end;
{-----}
Function Q:extended;
var kk,fk:integer;
    si,co,p,s,SSS,aa,mo,no,ko,ty:extended;
begin
    SSS:=0;
    for kk:=1 to pendd do
        begin
            p:=pind[kk];
            for fk:=1 to Nfii do
                begin
                    si:=sinus[fk];
                    co:=cosinus[fk];
                    mo:=a+p*si;
                    no:=b*p*si;
                    ko:=b*p*co;
                    aa:=sqrt(sqrt(mo)+sqrt(no)+sqrt(ko+d*(1-p*p*si*si)));
                    ty:=(ko+d*(1-p*p*si*si))/aa;
                    SSS:=SSS+ty*p*dfii;
                end;
            end;
            Q:=dp*SSS/Pi;
        end;
    {-----}
Function N:extended;
var kk,fk:integer;
    si,co,p,s,SSS,aa,mo,no,ko:extended;
begin
    SSS:=0;
    for kk:=1 to pendd do
        begin
            p:=pind[kk];
            for fk:=1 to Nfii do
                begin
                    si:=sinus[fk];
                    co:=cosinus[fk];
                    mo:=a+p*si;
                    no:=b*p*si;
                    ko:=b*p*co;
                    aa:=sqrt(sqrt(mo)+sqrt(no)+sqrt(ko+d*(1-p*p*si*si)));
                    SSS:=SSS+p*dfii*mo/aa;
                end;
            end;
            N:=dp*SSS/Pi;
        end;
    {-----}

```

End.

```
{-----}
unit dopoln;
{-----}
interface
  uses Vars;
  Procedure Pro_Files;
  Procedure MinFiles(var ff:textfile);
  Procedure Open_Files;
  Procedure Close_Files;
implementation
{-----}
Procedure MinFiles(var ff:textfile);
const eps=0.003;
var j,j1,jo,iper,ka:integer;
    c1,c2,c3,ca : extended;
begin
if i3=1 then
begin
for j:=1 to izap[i9,1]-1 do
begin
c1:=AM^[i9,j,1];
c2:=AM^[i9,j,2];
c3:=AM^[i9,j,3];
jo:=j;
for j1:=j+1 to izap[i9,1] do
begin
if AM^[i9,j1,1]<c1-eps then
begin
c1:=AM^[i9,j1,1];
c2:=AM^[i9,j1,2];
c3:=AM^[i9,j1,3];
jo:=j1;
end;
end;
AM^[i9,jo,1]:=AM^[i9,j,1];
AM^[i9,jo,2]:=AM^[i9,j,2];
AM^[i9,jo,3]:=AM^[i9,j,3];
str(c1:7:3,s1);
str(c2:7:3,s2);
str(c3:7:3,s3);
srez:=s1+' '+s2+' '+s3;
writeln(ff,srez);
end;
end;
if i3=2 then
begin
ka:=3; {1 or 3}
for j:=1 to izap[i9,2]-1 do
begin
```

```

c1:=BM^[i9,j,1];
c2:=BM^[i9,j,2];
c3:=BM^[i9,j,3];
jo:=j;
if ka=1 then ca:=c1 else ca:=c3;
for j1:=j+1 to izap[i9,2] do
begin
if BM^[i9,j1,ka]<ca-eps then
begin
c1:=BM^[i9,j1,1];
c2:=BM^[i9,j1,2];
c3:=BM^[i9,j1,3];
jo:=j1;
end;
if ka=1 then ca:=c1 else ca:=c3;
end;
BM^[i9,jo,1]:=BM^[i9,j,1];
BM^[i9,jo,2]:=BM^[i9,j,2];
BM^[i9,jo,3]:=BM^[i9,j,3];
str(c1:7:3,s1);
str(c2:7:3,s2);
str(c3:7:3,s3);
srez:=s1+' '+s2+' '+s3;
writeln(ff,srez);
end;
end;
if i3=3 then
begin
for j:=1 to izap[i9,3]-1 do
begin
c1:=CM^[i9,j,1];
c2:=CM^[i9,j,2];
c3:=CM^[i9,j,3];
jo:=j;
for j1:=j+1 to izap[i9,3] do
begin
if CM^[i9,j1,3]<c3-eps then
begin
c1:=CM^[i9,j1,1];
c2:=CM^[i9,j1,2];
c3:=CM^[i9,j1,3];
jo:=j1;
end;
end;
CM^[i9,jo,1]:=CM^[i9,j,1];
CM^[i9,jo,2]:=CM^[i9,j,2];
CM^[i9,jo,3]:=CM^[i9,j,3];
str(c1:7:3,s1);
str(c2:7:3,s2);
str(c3:7:3,s3);
srez:=s1+' '+s2+' '+s3;
writeln(ff,srez);

```



```
end;
end;
end;
{-----}
Procedure Pro_Files;
begin
  Open_Files;
  i3:=1;
  i9:=1;
  MinFiles(g1);
  i9:=2;
  MinFiles(g2);
  i9:=3;
  MinFiles(g3);
  i9:=4;
  MinFiles(g4);
  i9:=5;
  MinFiles(g5);
  i9:=6;
  MinFiles(g6);
  i9:=7;
  MinFiles(g7);
  i9:=8;
  MinFiles(g8);
  i9:=9;
  MinFiles(g9);

  i3:=2;
  i9:=1;
  MinFiles(g11);
  i9:=2;
  MinFiles(g12);
  i9:=3;
  MinFiles(g13);
  i9:=4;
  MinFiles(g14);
  i9:=5;
  MinFiles(g15);
  i9:=6;
  MinFiles(g16);
  i9:=7;
  MinFiles(g17);
  i9:=8;
  MinFiles(g18);
  i9:=9;
  MinFiles(g19);

  i3:=3;
  i9:=1;
  MinFiles(g21);
  i9:=2;
  MinFiles(g22);
```

```

i9:=3;
MinFiles(g23);
i9:=4;
MinFiles(g24);
i9:=5;
MinFiles(g25);
i9:=6;
MinFiles(g26);
i9:=7;
MinFiles(g27);
i9:=8;
MinFiles(g28);
i9:=9;
MinFiles(g29);
Close_Files;
Dispose(AM);
Dispose(BM);
Dispose(CM);
end;
{-----}
Procedure Open_Files;
begin
  AssignFile(g1,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr1.txt');
  append(g1);
  AssignFile(g2,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr2.txt');
  append(g2);
  AssignFile(g3,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr3.txt');
  append(g3);
  AssignFile(g4,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr4.txt');
  append(g4);
  AssignFile(g5,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr5.txt');
  append(g5);
  AssignFile(g6,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr6.txt');
  append(g6);
  AssignFile(g7,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr7.txt');
  append(g7);
  AssignFile(g8,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr8.txt');
  append(g8);
  AssignFile(g9,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr9.txt');
  append(g9);
  AssignFile(g11,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr11.txt');
  append(g11);
  AssignFile(g12,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr12.txt');
  append(g12);
  AssignFile(g13,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr13.txt');
  append(g13);
  AssignFile(g14,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr14.txt');
  append(g14);
  AssignFile(g15,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr15.txt');
  append(g15);
  AssignFile(g16,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr16.txt');
  append(g16);

```

```

AssignFile(g17,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr17.txt');
append(g17);
AssignFile(g18,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr18.txt');
append(g18);
AssignFile(g19,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr19.txt');
append(g19);
AssignFile(g21,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr21.txt');
append(g21);
AssignFile(g22,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr22.txt');
append(g22);
AssignFile(g23,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr23.txt');
append(g23);
AssignFile(g24,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr24.txt');
append(g24);
AssignFile(g25,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr25.txt');
append(g25);
AssignFile(g26,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr26.txt');
append(g26);
AssignFile(g27,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr27.txt');
append(g27);
AssignFile(g28,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr28.txt');
append(g28);
AssignFile(g29,'d:\users\hiroboko\PRUZIN\pruzdelp\datapr29.txt');
append(g29);
end;
{-----}
Procedure Close_Files;
begin
Closefile(g1);
Closefile(g2);
Closefile(g3);
Closefile(g4);
Closefile(g5);
Closefile(g6);
Closefile(g7);
Closefile(g8);
Closefile(g9);
Closefile(g11);
Closefile(g12);
Closefile(g13);
Closefile(g14);
Closefile(g15);
Closefile(g16);
Closefile(g17);
Closefile(g18);
Closefile(g19);
Closefile(g21);
Closefile(g22);
Closefile(g23);
Closefile(g24);
Closefile(g25);
Closefile(g26);

```

```

Closefile(g27);
Closefile(g28);
Closefile(g29);
end;
{-----}
End.

```

```

{=====}
unit Vars;
{=====}
interface
const
  Nf=180;
  Sfdp=0.0015;
  pend=0.01;
  df=2*Pi/Nf;
  Nfii1=45;
  Nfii2=90;
  Nfii=180;
  dfii1=2*Pi/Nfii1;
  dfii2=2*Pi/Nfii2;
  dfii=2*Pi/Nfii;
  pp1=5;
  pp2=8;
  pp=8;
  po1=0.5;
  po2=0.9;
  dp1=po1/pp1;
  dp2=(po2-po1)/pp2;
  {dp=(1-po2)/pp;}
  pendd=30;
  dp=1./pendd;
  MM=5000;
  eps0=0.001;
  cind=9;
  a0=-1.111;
  a1=50;
  Na=338;
  du=Pi/2/Na;
type
  raschet = array[1..cind,1..MM,1..3] of extended;
  zapis = array[1..cind,1..3] of integer;
  trigonom = array[1..Nfii] of extended;
  trigonom1 = array[1..Nfii1] of extended;
  trigonom2 = array[1..Nfii2] of extended;
  Fmas=array[1..nf] of extended;
var
  izap : zapis;
  AM,BM,CM : ^raschet;

```

```

sinus,cosinus : trigonom;
sinus1,cosinus1 : trigonom1;
sinus2,cosinus2 : trigonom2;
si,co : Fmas;
pind : array[1..pendd] of extended;
ci : array[1..cind] of extended;
a,b,d : extended;
i3,i9 : integer;
srez,s1,s2,s3 : string;
g1,g2,g3,g4,g5,g6,g7,g8,g9,g11,g12,g13,g14,g15,
g16,g17,g18,g19,g21,g22,g23,g24,g25,g26,g27,g28,
g29 : textfile;
Procedure Copen;
{-----}
  implementation
{-----}
Procedure Copen;
var i:integer;
    fi : extended;
begin
  New(AM);
  FillChar(AM^,SizeOf(raschet),#0);
  New(BM);
  FillChar(BM^,SizeOf(raschet),#0);
  New(CM);
  FillChar(CM^,SizeOf(raschet),#0);
  for i:=1 to cind do
  begin
    ci[i]:=0.01+(i-1)*0.1;
    izap[i,1]:=0;
    izap[i,2]:=0;
    izap[i,3]:=0;
  end;
  for i:=1 to Nfii do
  begin
    sinus[i]:=sin((i-0.5)*dfii);
    cosinus[i]:=cos((i-0.5)*dfii);
  end;
  for i:=1 to Nfii1 do
  begin
    sinus1[i]:=sin((i-0.5)*dfii1);
    cosinus1[i]:=cos((i-0.5)*dfii1);
  end;
  for i:=1 to Nfii2 do
  begin
    sinus2[i]:=sin((i-0.5)*dfii2);
    cosinus2[i]:=cos((i-0.5)*dfii2);
  end;
  for i:=1 to nf do
  begin
    fi:=df*i-df/2;
    si[i]:=sin(fi);
  end;
end;

```

```
    co[i]:=cos(fi);  
  end;  
  pind[1]:=dp/2;  
  for i:=2 to pendd do pind[i]:=pind[i-1]+dp;  
end;  
{-----}  
End.
```