

На правах рукописи

Ремшев Евгений Юрьевич

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ  
ТАРЕЛЬЧАТЫХ ПРУЖИН МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Специальность 05.16.09 - материаловедение (машиностроение)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург-2013 г.

Работа выполнена на кафедре «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» ФГБОУ ВПО «Балтийский Государственный Технический Университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Титов Андрей Валерьевич

Официальные оппоненты: Скотникова Маргарита Александровна  
доктор технических наук, профессор,  
научный руководитель лаборатории «Физико-технологических исследований и электронной микроскопии» ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»;  
Мотовилина Галина Дмитриевна  
кандидат технических наук, доцент,  
ведущий специалист 3-го отделения  
ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург.

Ведущая организация: ООО «Фирма «Спринг- центр», г.Санкт-Петербург

Защита состоится "16" апреля 2013г. в 16 часов,  
на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан – «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.т.н. профессор

Востров Владимир Николаевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы .** В машиностроении широко используются упругие элементы, работающие при статической, динамической и циклической нагрузках. К упругим элементам предъявляется требование по обеспечению заданных эксплуатационных свойств в установленных пределах в течение длительного времени. Наиболее широкое распространение в механизмах находят пружины растяжения, сжатия, кручения с различным профилем сечения проволоки. Применяются также тарельчатые, фасонные, многожильные и составные пружины. Основными эксплуатационными свойствами пружин являются прочность, релаксационная стойкость и высокие упругие характеристики. Существующая методика оценки релаксационной стойкости тарельчатых пружин заключается в построении релаксационной кривой по результатам измерений силы до и после циклических нагрузок. Недостатками такой методики является: оценка релаксационной стойкости выборочной партии пружин, значительная трудоемкость и энергозатраты, связанные с осуществлением контроля. Для оценки важнейших показателей надежности и долговечности, а также релаксационной стойкости на длительный период эксплуатации до 25 – 30 лет интерес представляют неразрушающие методы контроля, в том числе метод акустической эмиссии.

**Объектом исследования** являются упругие элементы (тарельчатые пружины), изготовленные из стали 60С2А и титанового сплава ВТ23.

**Цель работы** заключается в разработке научно обоснованной методики контроля качества и прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин с использованием метода акустической эмиссии.

## **Задачи работы:**

1. Анализ применения метода акустической эмиссии для выявления наружных и внутренних дефектов в металлических деталях и прогнозирования релаксационных свойств упругих элементов механизмов при статическом, динамическом и циклическом нагружении в процессе длительного срока эксплуатации.

2. Экспериментальное исследование и установление закономерностей изменения уровня сигналов акустической эмиссии в зависимости от наличия и развития дефектов, релаксационной стойкости и микроструктуры тарельчатых пружин из стали 60С2А и титанового сплава ВТ23 на этапе их изготовления и предэксплуатационных испытаний.

3. Построение математических моделей прогнозирования для количественной оценки релаксационной стойкости тарельчатых пружин при циклическом нагружении в зависимости от уровня сигналов акустической эмиссии при заневоливании.

4. Разработка рекомендаций по практическому использованию результатов исследования и построение научно обоснованной методики прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин из сталей и титановых сплавов на базе установленных закономерностей.

5. Внедрение методики в технологический процесс изготовления отдельным контрольным блоком предэксплуатационной подготовки пружин.

**Методы исследования:** решение поставленных задач работы осуществлялось методами научного анализа, теоретических и экспериментальных исследований, обобщения полученных результатов постановкой многофакторного планируемого эксперимента.

**Научная новизна.** В диссертационной работе установлены зависимости между уровнями сигналов акустической эмиссии при статическом нагружении и релаксацией тарельчатых пружин, под действием циклических нагрузок. Показана возможность применения метода акустической эмиссии

для качественной оценки микроструктуры тарельчатых пружин изготовленных из рессорно-пружинной стали и титанового сплава ВТ23. Разработаны математические модели прогнозирования релаксации в зависимости от уровня сигналов акустической эмиссии и временем эксплуатации.

**Практическая значимость.** Разработаны рекомендации по практическому использованию результатов исследования и методика прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин из стали 60С2А и титанового сплава ВТ23 на основе уровня сигналов АЭ. Внедрение в производство позволяет повысить качество изготавливаемой продукции, исключить необходимость применения циклических испытаний выборочной партии пружин, снизить себестоимость их изготовления. Разработанная методика успешно применяется на предприятии ОАО «НПП Пружинный центр» г. Санкт-Петербург. Результаты работы используются в учебном процессе БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова при обучении студентов по направлению «Машиностроение».

**Защищаемые положения.**

1. Результаты экспериментального исследования влияния различных режимов нагружения тарельчатых пружин на характер изменения и величину сигналов акустической эмиссии.
2. Результаты оценки качества микроструктуры сплава ВТ23 после цикла термической обработки методом АЭ.
3. Математические модели прогнозирования релаксации тарельчатых пружин из стали 60С2А и сплава ВТ23 при циклическом нагружении в зависимости от уровня сигналов акустической эмиссии на этапе заневоливания.
4. Методика прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин методом акустической эмиссии, исключая циклические испытания изделий.

**Личный вклад автора:** Экспериментальные исследования выполнялись на кафедре Е4 «Высокоэнергетические системы автоматических устройств» автором с участием научного руководителя. Лично осуществлял внедрение и сопровождение разработанной методики прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин на предприятии ОАО «НПП Пружинный центр» г. Санкт-Петербург, участвовал в оформлении заявки на изобретение.

**Апробация работы:** Исследования проводились в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы. Результаты работы обсуждались на международных и общероссийских научно-практических конференциях. Значительная часть исследования проводилась совместно с ОАО «НПП Пружинный центр», получен патент на изобретение, правообладателем которого является предприятие. В номинации «лучший инновационный проект» на всероссийском конкурсе научных и инновационных проектов студентов, аспирантов и молодых ученых по основным направлениям инновационного развития крупнейших отечественных компаний, работающих в области машиностроения, телекоммуникаций и связи в 2012 г. получен приз 1 степени, в основу проекта вошли результаты диссертационной работы.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 8 печатных работах, в изданиях перечня ВАК – 3, в трудах научно-технических конференций - 5.

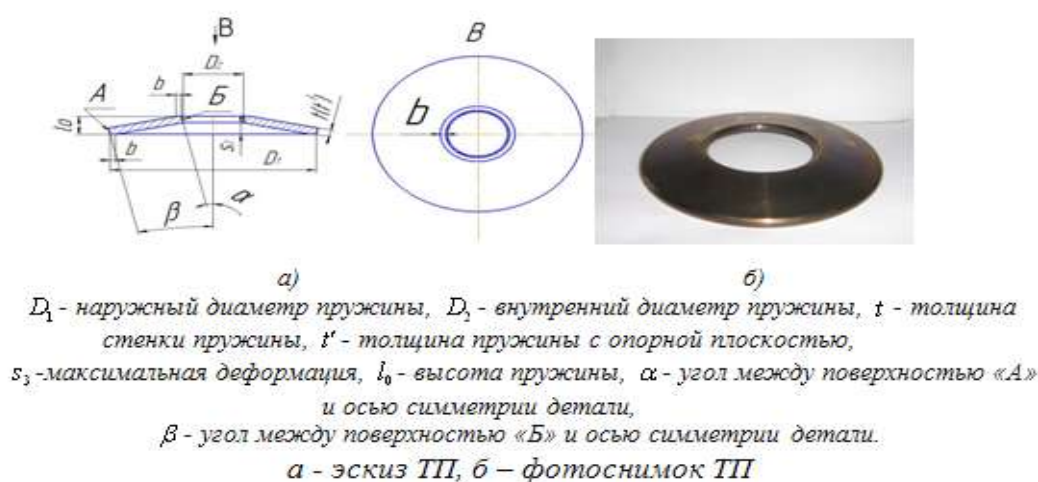
**Структура и объем диссертации.** Содержание диссертации изложено на 125 страницах текста, текст содержит 37 таблиц и 50 рисунков. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Список цитируемой литературы включает 105 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Введение** содержит область применения упругих элементов, актуальность темы, описание проблемной ситуации, возникшей в исследуемой области. Сформулированы цель и задачи работы.

### **Первая глава «Постановка задачи исследования» :**

Упругие элементы и пружины различного назначения широко применяются в различных механизмах как амортизаторы, накопители энергии и приводы, которые работают при сложных циклических нагрузках при динамическом и условно статическом нагружении. Пружины подразделяют на винтовые, спиральные, тарельчатые (Рис.1) и другие.

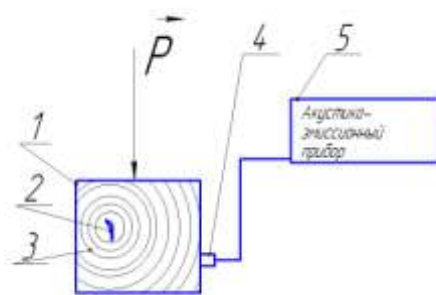


*Рисунок 1 – Тарельчатая пружина (объект исследования)*

К пружинам ответственных механизмов предъявляются жесткие требования по реализации заданных упругих характеристик, обеспечению прочности, ограничению релаксации в течение длительного срока работы. Эксплуатационные характеристики пружин формируются в процессе технологии их изготовления, которая включает в себя различные виды механической обработки, комплекса термических и контрольных операций. Упругие свойства, циклическая стойкость, релаксационная стабильность

обеспечивается комплексом термических операций (отжиг, закалка, отпуск, старение), промежуточного и окончательного многократного нагружения с разгрузкой и последующим заневоливанием, т.е. выдержкой при максимальной деформации в течение 72 часов. В настоящее время для изготовления ответственных узлов механизмов и машин применяют титановые сплавы, которые легче по сравнению со сталью, обладают высокими прочностными и упругими свойствами, коррозионной стойкостью, что позволяет существенно повысить характеристики работоспособности элементов машин, в том числе и пружин. Наиболее сложным при изготовлении пружин из титановых сплавов является обоснованный выбор режимов термической обработки для формирования оптимальной структуры материала, обеспечивающую высокие прочностные и упругие свойства и минимальную склонность к релаксации. В технологических процессах изготовления ТП применяют традиционные методы контроля качества изделий, однако до последнего времени не применяются неразрушающие методы, с помощью которых возможна не только оценка параметров изготовленных пружин, но и прогнозирование их работоспособности в течение длительного срока эксплуатации. Наиболее перспективным неразрушающим методом контроля качества ТП является метод АЭ, который способен выявлять различные дефекты в изделиях, находящихся под нагрузкой и прогнозировать стабильность (или нестабильность) показателей работоспособности, в том числе и склонность к релаксации (Рис.2). В производстве пружин метод АЭ не применяется для контроля качества готовой продукции в связи с отсутствием обоснованных методик качественной и количественной оценки показателей работоспособности подобных изделий.





а)

б)

1- объект контроля, 2- дефект, 3- акустические волны, 4 – датчик регистрации сигналов акустической эмиссии, 5 – прибор регистрации сигналов акустической эмиссии, а- установка датчика на поверхность изделия,  $\vec{P}$  - сила, действующая на объект контроля;  
 б- фотоснимок акустико-эмиссионной системы «Ранис-11»

Рисунок 2 – Схема регистрации сигналов акустической эмиссии

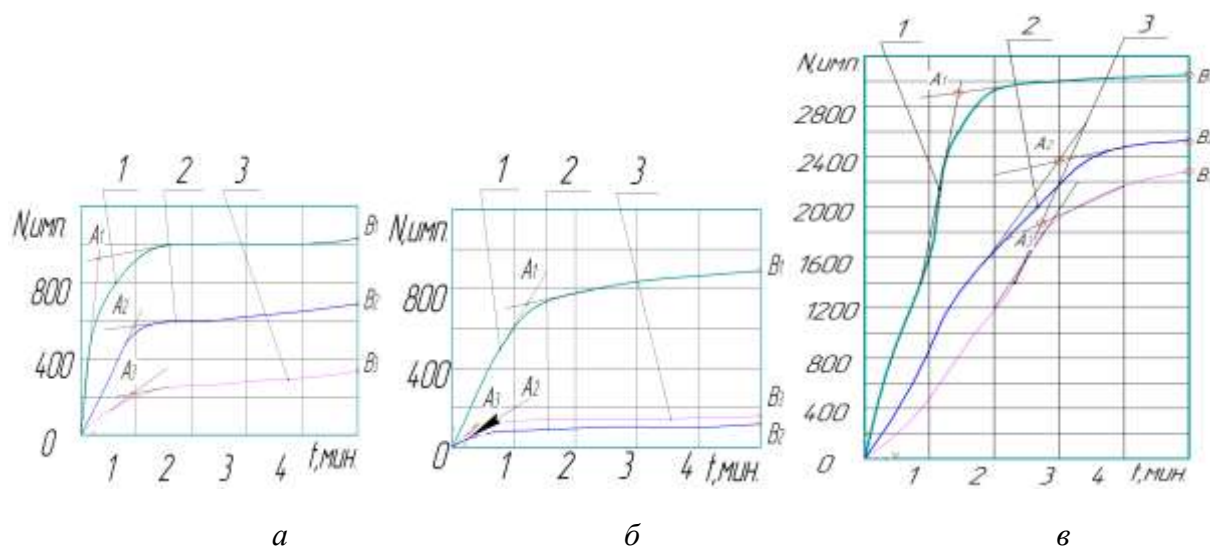
**Вторая глава «Установление закономерностей изменения сигналов акустической эмиссии в зависимости от наличия и развития дефектов, релаксационной стойкости и микроструктуры тарельчатых пружин» :**

Проведено экспериментальное исследование для установления закономерностей между акустической эмиссией, релаксационной стойкостью и микроструктурой ТП (Табл.1). Последовательность испытаний: кратковременное обжатие, выдержка при постоянной силе с регистрацией сигналов АЭ, циклические испытания и оценка релаксации, исследование микроструктуры. По результатам кратковременного обжатия с регистрацией сигналов АЭ строились графические зависимости суммарной АЭ от времени обжатия (Рис.3). Введены коэффициенты оценки качества пружин на кратковременном обжатии. Локально-динамический критерий пружины  $K_l$  указывает на завершенность технологических операций изготовления ТП для каждой исследованной группы установлены интервалы значений.

Коэффициент затухания  $K_{21} = \frac{N_{B2}}{N_{B1}}$  не превышает определенного уровня для каждой группы, мера оценки микроструктуры сплава.

Таблица 1 – Группы экспериментальных образцов ТП

№ п.п.	№ Группы	Материал	Временное сопротивление $\sigma_6$ , МПа	Режимы термообработки
1	ТП 1	60С2А	1570	Закалка при $t = 860^\circ\text{C}$ , охлаждение в масле, отпуск при $t = 420^\circ\text{C}$
2	ТП 2	ВТ23	1560	Закалка при $t = 850^\circ\text{C}$ 60 мин. охлаждении в воде, старение при $t = 450^\circ\text{C}$ 10 часов.
3	ТП 3	ВТ23	1325	Закалка при $t = 850^\circ\text{C}$ 60 мин. охлаждении в воде, старение при $t = 550^\circ\text{C}$ 10 часов.
4	ТП 4	ВТ23	1100	Закалка при $t = 800^\circ\text{C}$ 60 мин. охлаждении в воде, старение при $t = 550^\circ\text{C}$ 10 часов.
5	ТП 5	ВТ23	1560 (ДЕФЕКТЫ)	Закалка при $t = 850^\circ\text{C}$ 60 мин. охлаждении в воде, старение при $t = 450^\circ\text{C}$ 10 часов. Нанесение умышленных дефектов.



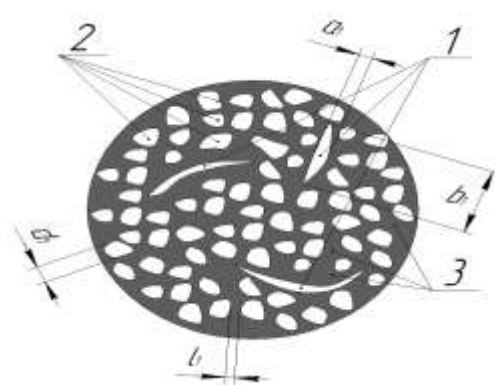
а-ТП3-2, б-ТП3-4, в-ТП3-5

1-первое обжатие, 2 – второе обжатие, 3 – третье обжатие

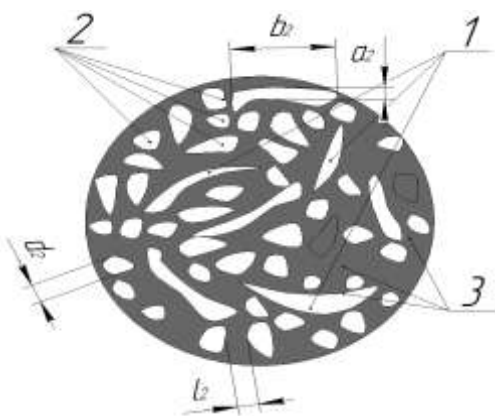
Рисунок 3 – Зависимости суммарной АЭ ( $N$ ) от времени ( $t$ ) в процессе обжатия пружин (группа 3)

Коэффициент стабилизации, как правило,  $K_{32} < 1$ , что вероятно свидетельствует о сформированности благоприятной микроструктуры и отсутствии предрасположенности к развитию дефектов. В случае, когда  $K_{32}$

> 1 с большой долей вероятности можно говорить о наличии предрасположенности к развитию дефекта в материале пружины или его наличие. Выявлены закономерности уровней сигналов АЭ от микроструктуры образцов ТП (Рис.4). Наиболее оптимальной для ТП с минимальной склонностью к релаксации и низким уровнем сигналов АЭ является микроструктура с дисперсной, умеренной коагулированной вторичной  $\alpha$  и  $\beta$  фазой, а наличие первичной  $\alpha$ -фазы в сплаве должно быть минимальным и равнонаправленным.



а)



б)

а - ТП 3-8:  $N_{общ,72}=26$  имп.,  $R=1,28\%$ ; б- ТП 3-5:  $N_{общ,72}=153$  имп.,  $R=2,29\%$ .

Рисунок 4 – Микроструктура ТП группы 3: 1 – первичная  $\alpha$  - фаза; 2 – вторичная  $\alpha$ -фаза; 3 -  $\beta$ -фаза;  $a_1, a_2$  - ширина пластинок первичной  $\alpha$ -фазы;  $b_1, b_2$  -длина пластинок первичной  $\alpha$ -фазы;  $d_1, d_2$  - усредненный диаметр глобулей вторичной  $\alpha$ -фазы ;  $l_1, l_2$  - характеристика размера  $\beta$ -фазы

Выявлены закономерности изменения уровня сигналов АЭ в зависимости от наличия и развития дефектов и релаксационной стойкости ТП. При заневоливании ТП общее число сигналов АЭ в процессе их длительного нагружения, не должно превышать некоторого порогового значения ( $N_{пор.}$ ), которое зависит от материала пружины. Полученная закономерность сформулирована в виде условия  $N_{общ.72} \leq N_{пор.}$ , являющейся мерой оценки релаксационной стойкости, где  $N_{общ.72}$  - общее количество импульсов АЭ в процессе выдержки ТП в течение 72 часов,  $N_{пор.}$  - пороговое значение сигналов АЭ.

### **Третья глава «Построение математических моделей прогнозирования релаксационной стойкости ТП»**

Для построения моделей использовалась методика планируемого многофакторного эксперимента. Теория планирования эксперимента предполагает использование математических моделей пригодных для любых экспериментов, т.е. для любых откликов и факторов. Функцией отклика, характеризующей релаксационные свойства ТП является величина релаксации силы сжатия ТП ( $R$ ) при деформации  $s = 0,2 \cdot s_3$  ,:

$$R = \left(1 - \frac{P_{конеч.}}{P_{начал.}}\right) \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $P_{начал.}$  – значение силы сжатия ТП при деформации  $s = 0,2 \cdot s_3$  , после операции «заневоливание» технологического процесса изготовления ТП;

$P_{конеч.}$  – значение силы сжатия ТП при деформации  $s = 0,2 \cdot s_3$  , после 9000 циклов в интервале нагрузок 100кН – 160кН. Факторы математической модели:  $N_{общ.72}$  - общее количество импульсов АЭ, зарегистрированных на этапе заневоливания;  $T$  - время эксплуатации ТП (эквивалентом которого является количество циклов в интервале нагрузок 100кН – 160кН).

Активный планируемый многофакторный эксперимент предполагал проведение исследование ТП двух групп из рессорно-пружинной стали и титанового сплава ВТ23. Для прогнозирования релаксационной стойкости ТП из рессорно-пружинной стали и титанового сплава ВТ23 построены 2 двухфакторные математические модели. В качестве математической модели (уравнения регрессии) зависимости отклика от исследуемых факторов (Табл.2) принят полином (2).

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n + b_{n+1}x_1^2 + \dots + b_{2n}x_n^2 + b_{2n+1}x_1x_2 + \dots + bx_{n-1}x_n . (2)$$

Таблица 2 - Исследуемые факторы и уровни

<b>Наименование факторов и отклика</b>	Общее количество импульсов акустической эмиссии в процессе выдержки тарельчатой пружины в течение 72 часов $N$ , имп.		Время эксплуатации ТП, $T$ , лет
<b>Обозначение фактора</b>	$N_{общ72}$		$T$
<b>Кодирование фактора</b>	$x_1$		$x_2$
<b>Диапазон изменения</b>	Для ТП из стали 60С2А 2..17	Для ТП из сплава ВТ23 25..153	0..30
<b>Значение среднего уровня фактора</b>	9	89	15
<b>Количество уровней варьирования</b>	3		3

Уравнение регрессии для прогнозирования релаксационной стойкости ТП из рессорно-пружинной стали 60С2А имеет вид:

$$R = 2,22 \cdot 10^{-2} + 1,42 \cdot 10^{-2} \cdot N_{общ.72} + 2,14 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1,43 \cdot 10^{-2} \cdot N_{общ.72} \cdot T - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot N_{общ.72}^2 + 6 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 . (3)$$

Уравнение регрессии для прогнозирования релаксационной стойкости ТП из титанового сплава ВТ23 имеет вид:

$$R = 1,4 \cdot 10^{-5} + 9,7 \cdot 10^{-5} \cdot N_{общ.72} + 19,2 \cdot 10^{-5} \cdot T + 6,4 \cdot 10^{-5} \cdot N_{общ.72} \cdot T - 8,3 \cdot 10^{-5} \cdot N_{общ.72}^2 + 5,7 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 . (4)$$

Проведена оценка значимости математических моделей прогнозирования, а также сопоставлены расчетные и экспериментальные значения релаксационной стойкости. Полученные результаты говорят о высокой степени точности уравнений регрессии, что позволит использовать их при оценке релаксационной стойкости пружин на производстве упругих элементов.

#### **Четвертая глава «Разработка практических рекомендаций по возможности использования результатов научной работы в реальном секторе экономики»**

Выработаны практические рекомендации, которые позволят оценивать качество и прогнозировать релаксационную стойкость ТП в процессе производства. Разработана методика оценки качества, и прогнозирования релаксационной стойкости ТП из рессорно-пружинной стали 60С2А и титанового сплава ВТ23. Разработанная методика встраивается в технологический процесс изготовления тарельчатых пружин; проверке подвергается каждая ТП изготовленной партии; требует меньше временных, энергетических и материальных затрат; исключает проведение циклических испытаний выборочных партий пружин для определения склонности к релаксации; позволяет количественно оценить значение релаксационной стойкости ТП на установленный период эксплуатации; контролировать режимы (обеспечивающие оптимальную микроструктуру титанового сплава ВТ23 ТП) термической обработки. Представлена последовательность проведения методики и результаты внедрения разработанной методики в производство пружин ОАО «НПП Пружинный центр» г.Санкт-Петербург, с применением акустико-эмиссионной системы «Ранис» ООО «Фортехлэб» г.Троицк МО. Разработана инструкция по эксплуатации стенда для осуществления контроля ТП в производстве упругих элементов.

## **Основные выводы (достижения)**

1. Проведен анализ применения метода акустической эмиссии для выявления наружных и внутренних дефектов в металлических деталях и прогнозирования релаксационных свойств упругих элементов механизмов при статическом, динамическом и циклическом нагружении в процессе длительного срока эксплуатации. Обоснована актуальность применения метода акустической эмиссии для оценки качества и прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин.

2. На основании результатов экспериментального исследования установлены закономерности изменения уровня сигналов акустической эмиссии в зависимости от наличия и развития дефектов, релаксационной стойкости и микроструктуры тарельчатых пружин на этапе их изготовления и предэксплуатационных испытаний, установлены критерии оценки микроструктуры титанового сплава ВТ23 на основе уровня сигналов акустической эмиссии.

3. Построены двухфакторные математические модели прогнозирования для количественной оценки релаксационной стойкости тарельчатых пружин (из стали 60С2А и титанового сплава ВТ23) в зависимости от уровня сигналов акустической эмиссии.

4. Разработаны рекомендации по практическому использованию результатов исследования и построена научно обоснованная методика прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин из сталей и титановых сплавов на базе установленных закономерностей изменения сигналов акустической эмиссии.

5. Получен патент на изобретение №2011132601/28(048037) «Способ прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин». Разработанная методика прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин внедрена в технологический процесс изготовления в

виде отдельного контрольного блока предэксплуатационной подготовки изделия на предприятии ОАО «НПП Пружинный центр» г.Санкт-Петербург.

### **В Приложении представлено:**

1. Решение о выдаче патента на изобретение №2011132601/28(048037) «Способ прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин».

2. Инструкция по эксплуатации стенда для контроля качества тарельчатых пружин.

### **Основные публикации по теме диссертационной работы**

#### *Публикации из перечня рецензируемых журналов ВАК*

**1. Е.Ю. Ремшев. Методика прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин на основе излучения сигналов акустической эмиссии / Г.А. Данилин, А.В. Титов, // Металлообработка. СПб. – 2011. - № 2. - С.17-21.**

**2. Е.Ю.Ремшев. Оценка релаксационной стойкости тарельчатых пружин на основе метода акустической эмиссии / Г.А. Данилин, А.В.Титов и др. // Деформация и разрушение материалов. М.-2012.-№ 3. – С.41-44.**

**3. Е.Ю.Ремшев. Применение метода акустической эмиссии для контроля качества тарельчатых пружин из сплава ВТ23 // Металлообработка. СПб. – 2012. - № 4.-С.27-33.**

#### *Прочие публикации в научных периодических изданиях и в трудах научных конференций*

4. Е.Ю. Ремшев. Перспективы применения метода акустической эмиссии в процессах обработки металлов давлением / А.В. Титов, , Н.А. Павлов // Труды международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова «Прогрессивные методы и



технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением», СПб.БГТУ, 2009. – С.137-141.

5. Е.Ю. Ремшев. Исследование возможностей применения метода акустической эмиссии для контроля качества нагруженных деталей, изготовленных методами штамповки / Г.А. Данилин, А.В. Титов // Труды II Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодеж.Техника.Космос», СПб.БГТУ,2010.-С.163-167.

6. Е.Ю. Ремшев. Методика прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин, изготовленных способами штамповки, на основе уровня сигналов акустической эмиссии/ Г.А. Данилин, А.В. Титов// Труды III Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодеж.Техника.Космос», СПб.БГТУ,2011.-С.126-128.

7. Е.Ю. Ремшев. Методика прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин, изготовленных способами штамповки, на основе распределения сигналов акустической эмиссии / Г.А. Данилин, А.В. Титов // Труды Общероссийской научно-технической конференции «Специальные технологии и материалы», СПб. БГТУ,2011.-С.122-132.

8. Е.Ю. Ремшев. Методика прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин, на основе уровня сигналов акустической эмиссии / Данилин, Белогур В.П. и др.// Труды IV Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и Наноматериалов», М.ИМЕТ РАН,2011.- С.770-772.