

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»  
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)

ДОПУСКАЕТСЯ К ЗАЩИТЕ:

Факультет Е  
Выпускающая кафедра Е4  
Группа Е1М31  
индекс группы

Заведующий кафедрой Е4  
Игнатенко В.В.  
Фамилия ИО  
« 7 » июня 2019 г.  
подпись

## ОТЧЕТ

о прохождении преддипломной практики  
Лихошерстных Илья Алексеевич

Фамилия, имя, отчество обучающегося

обучающегося по  
направлению

15.04.03

Прикладная механика

Руководитель практики:

Ремшев Е.Ю., к.т.н., доцент, доцент

Фамилия ИО, ученая степень, ученое звание, должность

Срок прохождения практики: с 05.03.2019 г. по 07.06.2019 г.

Руководитель практики:

Ремшев Е.Ю.  
Фамилия ИО  
« 7 » июня 2019 г.  
Подпись

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2019 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Заведующий кафедрой

Е4

индекс кафедры

Игнатенко В.В.

Фамилия ИО

подпись

« 07 »

июня

2019 г.

## ЗАДАНИЕ

на \_\_\_\_\_ преддипломную \_\_\_\_\_ практику

наименование практики

Обучающемуся группы

E1M31

Лихошерстных И.А.

группа

Фамилия Имя Отчество

Направление/специальность

15.04.03

Прикладная механика

нужное подчеркнуть

код

полное наименование направления/специальности

Руководитель практики

Ремшев Е.Ю.,

Фамилия ИО, ученая степень, ученое звание, должность

Тема задания на практику:

Подготовка магистерской диссертации к защите.

Подготовка слайдов и доклада. Оформление отчета о преддипломной практике

Срок прохождения практики: с 05.03.2019 г. по 07.06.2019 г.

Место прохождения практики: ФГБОУ ВО БГТУ «Военмех», кафедра Е4

«Высокоэнергетические устройства автоматических систем»

Должность обучающегося на практике: магистрант

Подготовка разделов магистерской диссертации. Составление научно-технического отчета.

1. Виды работ и требования к их выполнению:

Разработка слайдов по теме магистерской диссертации. Оформление приложений магистерской диссертации. Составление доклада магистерской диссертации.

2. Виды отчетных материалов и требования к их выполнению: Отчет в соответствии с ГОСТ 7.32. Комплект отчетных документов, по преддипломной практике.

## 3. ПЛАН-ГРАФИК практики

№ этапа	Наименование этапа	Срок завершения этапа	Виды работ	Форма отчетности
	Подготовка разделов магистерской диссертации.	31.03.2019	Подготовка разделов магистерской диссертации.	
	Разработка слайдов по теме магистерской диссертации	15.04.2019	Разработка слайдов по теме магистерской диссертации	
	Оформление приложений магистерской диссертации.	30.04.2019	Оформление приложений магистерской диссертации.	
	Составление научно-технического отчета.	07.06.2019	Составление научно-технического отчета.	

Дата выдачи задания:

« 05 » марта 2019 г.

Срок сдачи отчетных документов:

« 07 » июня 2019 г.

Руководитель практики:

« 05 » марта 2019 г.

Обучающийся:

« 07 » июня 2019 г.

## Содержание

1. Разработка методики оценки качества плоских спиральных пружин с отогнутыми зацепами с применением неразрушающих методов контроля. Слайд 1.....	3
2. Анализ конструкторско-технологических характеристик и технических требований. Слайд 2.....	3
3. Анализ методик расчета деформационно-силовых характеристик спиральных пружин. Слайд 3.....	4
4. Методы контроля критериев качества и основных эксплуатационных характеристик. Слайд 4.....	6
5. Методы контроля критериев качества и основных эксплуатационных характеристик. Слайд 4.....	10
6. Разработка методики экспериментального исследования, направленного на выявление зависимостей между параметрами акустической эмиссии и эксплуатационными свойствами спиральных пружин. Слайд 5.....	12
7. Механические испытания на растяжение плоских образцов титанового сплава вт23 с регистрацией сигналов АЭ. Слайд 6.....	15
8. Технологические испытания на изгиб листовых образцов из титанового сплава вт23 с регистрацией сигналов АЭ. Слайд 6.....	16
9. Разработка методики оценки качества исходной листовой заготовки сп методом АЭ. Слайд 6.....	18
10. Разработка методики экспериментального исследования оценки релаксационной стойкости СП методом АЭ. Слайд 7.....	20
11. Результаты механических испытаний на растяжение плоских образцов титанового сплава вт23 с регистрацией сигналов АЭ. Слайд 8.....	25
12. Результаты технологических испытаний на изгиб листовых образцов из титанового сплава вт23 с регистрацией сигналов АЭ. Слайд 9.....	28
13. Результаты оценки качества исходной листовой заготовки сп методом АЭ. слайд 9.....	31
14. Результаты экспериментального исследования оценки релаксационной стойкости СП методом АЭ. слайд 10.....	32
15. Методика оценки качества спиральной пружины с отогнутыми зацепами на основе уровня сигналов акустической эмиссии. Слайд 11...	37
16. Список использованных источников .....	40
17. Приложение А.	



*1. Разработка методики оценки качества плоских спиральных пружин с отогнутыми зацепами с применением неразрушающих методов контроля.*

*Слайд 1*

*2. Анализ конструкторско-технологических характеристик и технических требований. Слайд 2*

Плоские спиральные пружины с отогнутыми зацепами (СП) (Рис.1), действие которых основано на возникновении изгибающего момента в плоскости, перпендикулярной к оси пружины, применяют как аккумуляторы энергии. Внутренний конец спиральных пружин укрепляют в валике, а наружный на барабане. Правильные закрепления пружин на валиках и барабанах обеспечивают нормальную работу пружин.

Коэффициентом полезного действия спиральных пружин называется отношение работы, совершаемой пружиной при ее разворачивании, к работе, затраченной на ее заводку. Коэффициент полезного действия СП достигает значений от 0,7 до 0,85 %, в некоторых случаях 0,9 %. Эскиз, фотоснимки и основные геометрические параметры СП представлены на рис.1. На рис.1 а представлена СП, заведенная до угла  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , на деформационно-силовой диаграмме показана графическая зависимость затраченной силы на заводку пружины (углу  $\varphi_1$  соответствует момент  $M_1$  и  $\varphi_2$  соответствует момент  $M_2$ ). На рисунке 1 б показана развертка СП (заготовка, используемая для получения конечной формы пружины).

Материалы, используемые для изготовления СП (рессорно-пружинная сталь, бронзовые сплавы) не всегда обеспечивают требуемые эксплуатационные свойства.

Титан – серебристо-белый металл с малым удельным весом. Температура плавления титана зависит от степени его чистоты и составляет 1668°С-1720°С. Сплавы на основе титана, имеют ряд особенностей: высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, низкая плотность, прочность при высоких температурах. СП изготовлены из титанового сплава ВТ23. Сплав ВТ23 по классу структуры является двухфазным ( $\alpha + \beta$ ). В таблице 1 представлены физико-механические характеристики титанового сплава ВТ23 в отожженном состоянии.

Физико-механические свойства, химический состав, технологичность сплава ВТ23 при определенных режимах термической и термомеханической обработки позволяют говорить о возможности применения его для изготовления СП.

### *3. Анализ методик расчета деформационно-силовых характеристик спиральных пружин. Слайд 3*

Методика расчета СП состоит в определении деформационно-силовых характеристик пружины при заданных геометрических параметрах. Пружина устанавливается в барабан, а внутренний виток устанавливается в валик (Рис.2).

Толщину  $s$  пружины выбирают из условия:

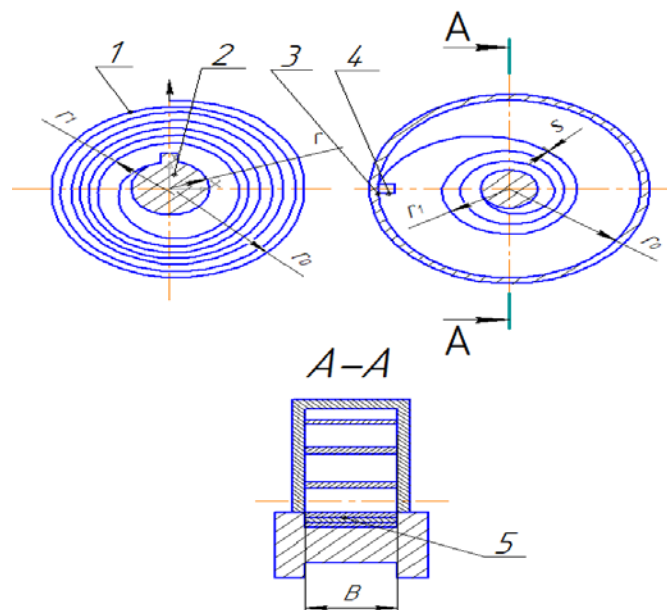
$$s \leq \frac{r}{15}, (1.1)$$

где  $r$  - радиус валика, на который наматывается пружина.

Условие (1.1) учитывает, что наибольшие напряжения изгиба испытывают первые к валику витки пружины. Также рекомендуется придерживаться выражения:

$$r = \frac{r_0}{3}, (1.2)$$

где  $r_0$  - внутренний радиус барабана.



$r_0$  - внутренний радиус барабана;  $r$  - радиус валика пружины;  $r_1$  - внешний радиус заведенной пружины, равный внутреннему радиусу спущенной;  $s$  - толщина пружины;  $B$  - ширина пружины

1-СП; 2-валик; 3-барабан; 4- место крепления СП к барабану; 5-витки намотанные на валик

Рисунок 2 – Эскиз пружины закрепленной в барабане

Обозначения, принятые при расчете пружин:

$r_1$  - внешний радиус заведенной пружины, равный внутреннему радиусу спущенной (на рисунке 2 слева СП в спущенном состоянии, справа в заведенном), мм;

$s$  - толщина пружины, мм;

$\psi$  - рабочее число оборотов барабана (количество оборотов барабана, необходимое для скручивания СП до угла  $\varphi_3$ );

$n_1$  - число витков свободной пружины;

$n$  - число витков спущенной пружины;

$n_2$  - число витков заведенной пружины;

$n_p$  - расчетное число витков пружины;

$L$  -длина развернутой пружины,мм;

$\hat{A}$  -ширина пружины,мм;

$M_{\max}$  -максимальный момент на валике пружины, Н\*мм;

$M_{\min}$  -минимальный момент на валике пружины, Н\*мм;

$[\sigma_{\text{изг}}]$  - допускаемое напряжение на изгиб,  $\text{Н} / \text{мм}^2$ ;

$E$  - модуль упругости,  $\text{Н} / \text{мм}^2$ ;

$\eta$  - КПД в зависимости от смазки.

#### 4. Методы контроля критериев качества и основных эксплуатационных характеристик. Слайд 4

Качество пружин - это понятие, в которое входит совокупность технических и экономических требований, предъявляемых к изделию. Качество СП можно разделить на три основные составляющие: эффективность, надежность, себестоимость (Рис.3).

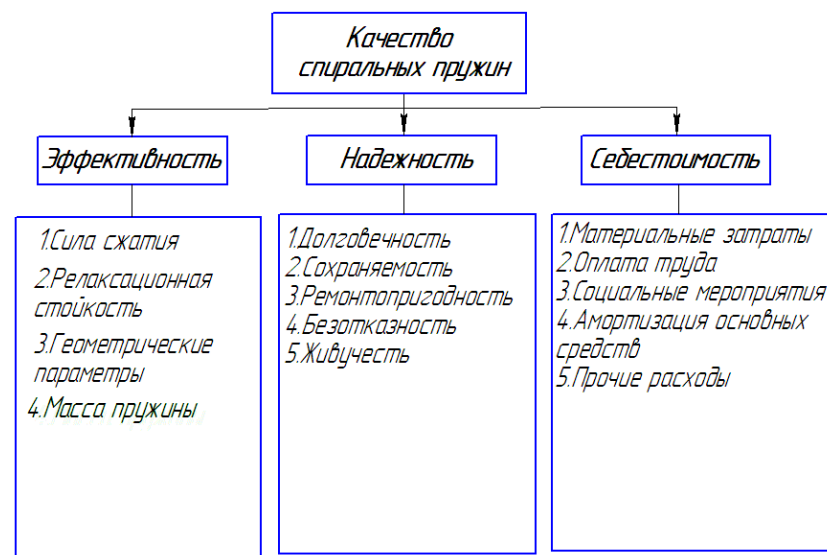


Рисунок 3 – Качество СП

Качество пружин - это понятие, в которое входит совокупность технических и экономических требований, предъявляемых к изделию.

Эффективность – способность изделия обеспечивать требуемые эксплуатационные свойства в установленных пределах.

Надёжность - свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания и транспортирования.

Себестоимость – это выраженная в денежной форме часть стоимости продукции (работ, услуг), которая включает затраты на потребленные средства производства, заработную плату с начислениями, оплату услуг и налогов.

Проанализируем основные эксплуатационные свойства СП. Сила сжатия – обеспечение равенства, в установленном интервале значений силы при прямом и обратном ходе пружины. На формирование заданной силы сжатия пружины влияют механические свойства материала: 1. Упругость – свойство тела деформироваться под действием нагрузки и восстанавливать первоначальную форму и размеры после ее снятия. 2. Прочность - свойство материала сопротивляться разрушению под действием внутренних напряжений, возникающих в результате действия внешних сил. Релаксационная стойкость – обеспечение заданной нагрузки сжатия в установленных пределах, в течение определенного промежутка времени.

Проанализировав основные эксплуатационные свойства, выделим важнейшие для СП (Рис.4).

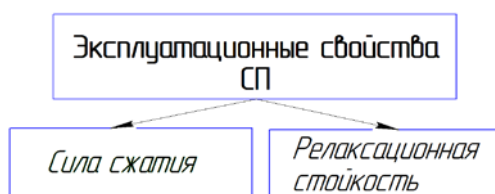


Рисунок 4 – Основные эксплуатационные свойства СП

Основными факторами (Рис.4), влияющими на эксплуатационные свойства СП - являются качество исходного материала и качество технологического процесса (соблюдение заданных режимов термической и механической обработки).



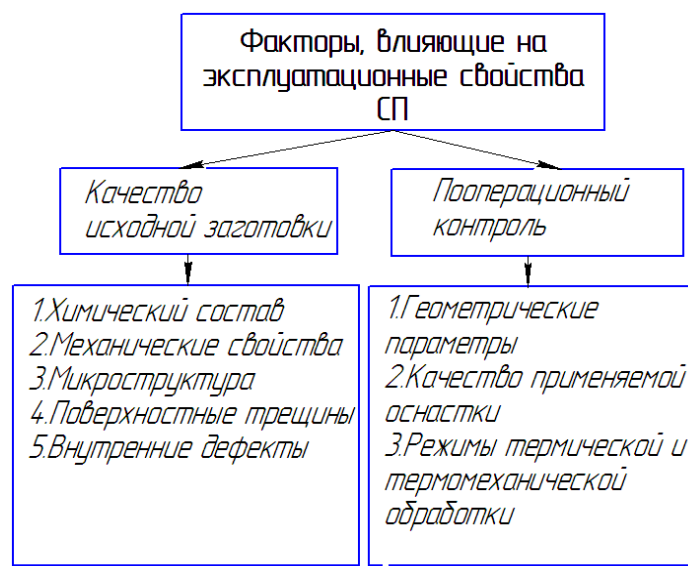


Рисунок 5 - Схема факторов, влияющих на эксплуатационные свойства СП

Качество исходной заготовки включает в себя соответствующий химический состав; механические свойства; микроструктуру; отсутствие поверхностных и внутренних дефектов. Химический состав, физико-механические характеристики и микроструктуру материала определяют путем проведения соответствующих испытаний. Из поступившей партии отбирают несколько образцов и результаты сравнивают с сертификатом. Определение химического состава, физико-механических свойств и микроструктуры материала относится к входному контролю исходной заготовки.

Наличие поверхностных дефектов определяют визуальным методом или другими методами поверхностного контроля, в том числе неразрушающими (капиллярный, магнитопорошковый и др.).

Наличие внутренних дефектов в исходном материале упругих элементов осуществляют методом ультразвуковой дефектоскопии.

Технологический (пооперационный) контроль обеспечивает точность и соблюдение, геометрических размеров; режимов термообработки; качества поверхности и соответствие физико-механических характеристик и микроструктуры материала. На каждой операции технологического процесса изготовления СП осуществляют пооперационный контроль. После каждой

операции (обработки давлением или обработки резанием) измеряют геометрические размеры и качество поверхности с помощью специального мерительного инструмента.

### Объяснение критериев качества.

Введены следующие параметры эксплуатационных свойств СП:

1.  $R(t^0)$  - неизменность релаксационных свойств при воздействии температуры от  $-100^{\circ}\text{C}$  до  $+120^{\circ}\text{C}$  в течении 10 часов;
2.  $\sigma_{0,2}(t^0)$  - неизменность условного предела текучести при температурах от  $-100^{\circ}\text{C}$  до  $+120^{\circ}\text{C}$  при воздействии температуры от  $-100^{\circ}\text{C}$  до  $+120^{\circ}\text{C}$  в течении 10 часов;
3.  $\sigma_B(t^0)$  - неизменность предела прочности при воздействии температуры от  $-100^{\circ}\text{C}$  до  $+120^{\circ}\text{C}$  в течении 10 часов.

Сформулированные единичные показатели качества для СП, имеют числовые значения или интервалы значений. Эти числовые показатели будем называть критериями качества.

Таким образом, комплексный числовой критерий качества ( $ЧК$ ) должен не превышать допустимого значения:

$$ЧК \leq [ЧК]_{доп.} \quad (1.10)$$

Допустимое значение числового критерия качества  $[ЧК]_{доп.}$  упрощенно можно представить в виде функциональной зависимости от комплекса показателей качества:

$$[ЧК]_{доп.} = f(E, \sigma_{0,2}, \sigma_B, R) \quad (1.11)$$

## *5. Методы контроля критериев качества и основных эксплуатационных характеристик. Слайд 4*

В отечественном и зарубежном машиностроении широкое распространение получили неразрушающие методы контроля качества изделий, такие как: визуальный, ультразвуковой, оптический (лазерной дефектоскопии), рентгеноскопии, магнитно-индукционный, акустической эмиссии и другие. Широкое применение неразрушающих методов контроля, не требующих вывода объекта из эксплуатации или разрушения готовых изделий, позволяет избежать больших потерь времени и материальных затрат, обеспечить частичную или полную автоматизацию операций контроля при значительном одновременном повышении качества и надежности изделий. Рассмотрим основные методы неразрушающего контроля, применяемые в производстве упругих элементов.

Визуально-оптический неразрушающий контроль основан на анализе взаимодействия оптического излучения с объектом контроля.

Ультразвуковой метод неразрушающего контроля (УМНК) основан на сканировании ультразвуком исследуемого объекта. Метод позволяет определить местоположение дефектов и их геометрию.

Методы лазерного контроля основаны на взаимодействии электромагнитного излучения с материалом заготовки или готового изделия. На поверхность изделия посылается лазерный луч. Наличие дефектов в заготовке или изделии влияет на вид отраженного лазерного излучения.

Капиллярные методы основаны на проникновении индикаторных жидкостей в полости поверхностных и сквозных несплошностей объекта и регистрации индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователя.

Метод люминесцентной дефектоскопии применяют для обнаружения также поверхностных дефектов. Сущность метода заключается в

способности некоторых веществ ярко светиться при облучении их ультрафиолетовыми лучами.

Акустическая эмиссия (АЭ) – излучение материалом механических волн, вызванное внутренней динамической локальной перестройкой его структуры. Метод акустической эмиссии позволяет контролировать качество труднодоступных объектов, в процессе эксплуатации при повышенных температурах; давать оценку наличия и развития дефекта; обладает высокой чувствительностью, пассивностью, дистанционностью.

Волна, распространяясь от источника звука во всех направлениях материала контролируемого объекта, достигает двух (или более) датчиков. Датчики преобразуют звуковую волну в очень слабый электрический сигнал и направляют этот сигнал в предусилитель, который усиливает микровольтный сигнал обычно в 100 раз (40 дБ) и направляет сигнал в основной электронный блок системы, где регистрируется точное (до наносекунд) время прихода и параметры волны. По вычисляемой разности времени прихода, известной геометрии объекта, скорости распространения волн в объекте можно вычислить координаты места, где была генерирована звуковая волна. По амплитудным и временным параметрам волны можно оценить энергию источника звука (т.е., в конечном итоге, потенциальную опасность дефекта материала, если источником излучения был именно дефект).

Преимуществом метода АЭ по сравнению с другими является его чувствительность, возможность обнаружения дефекта, например, трещины в момент ее образования и развития.

*6. Разработка методики экспериментального исследования, направленного на выявление зависимостей между параметрами акустической эмиссии и эксплуатационными свойствами спиральных пружин. Слайд 5*

На этапе проектирования и изготовления СП предусматривается проведение механических и технологических испытаний, направленных на выявление оптимальных режимов технологического процесса, которые позволяют сформировать установленные техническим заданием требования к механическим свойствам материала пружины. В литературе оптимальным показателем сочетания прочности и пластичности для упругих элементов является соотношение:

$$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_s} = 0,5..0,8. \quad (2.1)$$

На этапе проектирования необходимое соотношение(2.1) выявляют путем проведения механических испытаний на растяжение плоских образцов. Поэтому в экспериментальном исследовании планируется проведение механических испытаний на растяжение образцов из титанового сплава BT23 с регистрацией сигналов АЭ, для выявления зависимостей между параметрами АЭ и механическими характеристиками образца сплава BT23.

Основными технологическими операциями изготовления СП является операция обработки давлением- гибка:

-навивка спирали;

-кратковременное обжатие;

-заневоливание (длительная выдержка при постоянной силе). Наличие не зафиксированного дефекта (внутренней трещины) в конечном изделии при



длительной статической и циклической нагрузки может привести к разрушению пружины. Поэтому на различных этапах изготовления детали применяют технологические испытания на изгиб (например, кратковременное обжатие пружины). Поэтому в экспериментальном исследовании планируется проведение технологических испытаний на изгиб с регистрацией сигналов АЭ. На заготовки для гибки, планируется наносить умышленные дефекты в виде поверхностных трещин. По результатам испытаний планируется установить различия между параметрами АЭ при гибки заготовок без дефектов и с умышленно нанесенными поверхностными трещинами.

В случае отсутствия наружных и внутренних дефектов в материале пружины, способных развиваться и привести к разрушению при длительных статических и циклических нагрузках, важнейшим показателем качества является релаксационная стойкость. В настоящее время на производстве применяется методика оценки релаксационной стойкости СП на основе проведения циклических испытаний. Существующая методика имеет ряд недостатков:

- разрушающий способ контроля (испытанные пружины непригодны для дальнейшей эксплуатации);
- вывод о всех пружинах изготовленной партии делается на основе испытаний выборочных образцов;
- не достаточная точность (не позволяет контролировать каждую пружину изготовленной партии);
- требует значительных материальных и временных затрат. Для устранения описанных выше недостатков существующей методики, планируется ее совершенствование с применением неразрушающего метода

АЭ. После проведения экспериментального исследования(Рис.7) планируется решение следующих задач научной работы:

1. Экспериментальное исследование закономерностей изменения уровня сигналов акустической эмиссии при механических испытаниях на растяжение и изгиб, установление различия в параметрах акустической эмиссии при наличие и росте трещин и релаксационных процессах в материале СП.
2. Экспериментальное исследование закономерностей изменения уровня сигналов акустической эмиссии в зависимости от наличия и развития дефектов, изменения микроструктуры и релаксационной стойкости в спиральных пружинах на этапе их изготовления и предэксплуатационных испытаний.
3. Установление закономерностей изменения уровня сигналов акустической эмиссии при длительном нагружении спиральных пружин изготовленных из титанового сплава для оценки их релаксационной стойкости.

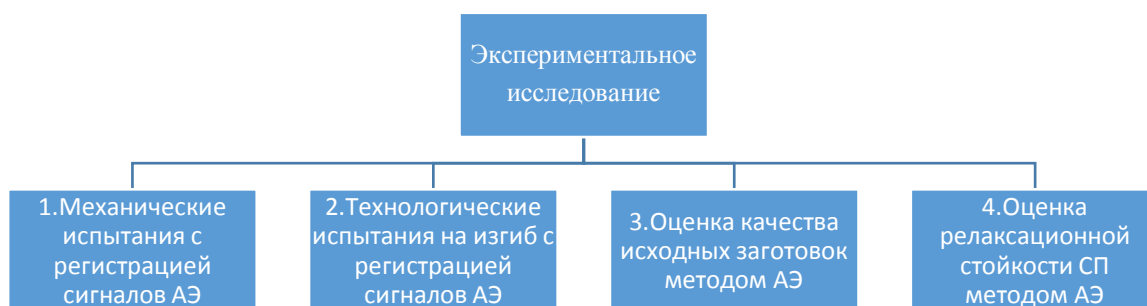
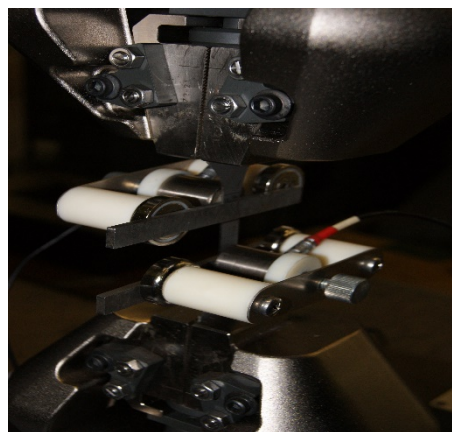
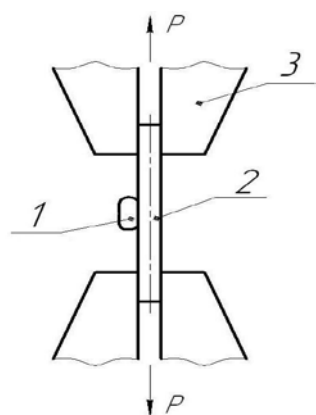


Рисунок 7 – Основные этапы экспериментального исследования СП

На основе полученных экспериментальных результатах планируется установить закономерности между параметрами АЭ и физико-механическими характеристиками материала ВТ23 и СП. На основе полученных закономерностей разработать методику оценки качества и прогнозирования релаксационной стойкости СП.

#### *7. МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ23 С РЕГИСТРАЦИЕЙ СИГНАЛОВ АЭ. СЛАЙД 6*

Испытания планируется проводить на испытательной машине SHIMADZU серии AG-X, для регистрации сигналов АЭ применять акустико-эмиссионную систему «ЛОКТОН-2004», схема установки образцов с датчиком АЭ (Рис.8).



*1-датчик АЭ;*

*2-Плоский образец;*

*3-Захваты*

*Рисунок 8 – Схема установки образцов для растяжения с регистрацией сигналов АЭ*

Целью проведения механических испытаний на растяжение являлось установление физико-механических характеристик материала пружин в состоянии поставки, а также при различных режимах термической обработки с регистрацией сигналов АЭ. Необходимо было установить уровень сигналов АЭ на различных этапах деформации заготовки, а также подобрать

оптимальный режим регистрации параметров АЭ (амплитудно-частотные характеристики) для последующего использования выбранных настроек для контроля качества и определения релаксационной стойкости СП.

*8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ НА ИЗГИБ ЛИСТОВЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT23 С РЕГИСТРАЦИЕЙ СИГНАЛОВ АЭ. СЛАЙД 6*

Суть испытания состоит в изгибе образца под действием условно статического нагружения и служит для определения способности металла выдерживать заданную пластическую деформацию без разрушения и характеризующуюся углом изгиба, радиусомгиба.

Элементами СП, в которых возникают наибольшие концентраторы напряжений – это зацепы (Рис.9). В процессе изготовления они воспринимают большие нагрузки по сравнению с другими элементами конструкции.



*а)*

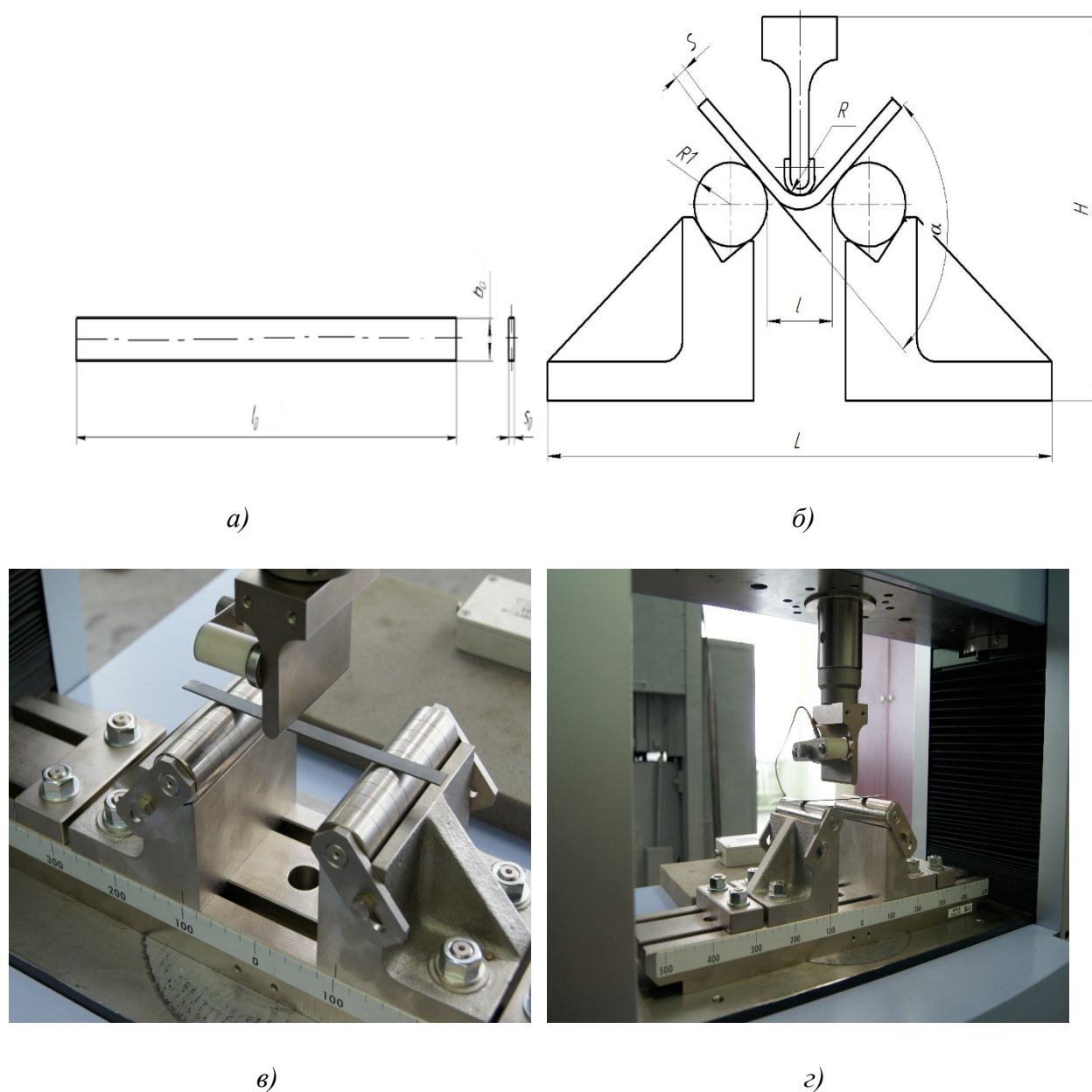
*б)*

*а – СП с зацепами на концах; б – СП с отломанным зацепом в центре*

*Рисунок 9 – Фотоснимок СП с зацепом и со сломанным зацепом*

Испытания на изгиб проводились для того, чтобы уточнить физико-механические характеристики, амплитудно-частотный интервал и уровни сигналов АЭ в процессе изгиба и роста трещины для последующего контроля изделия.

Гибку производили на испытательной машине SHIMADZU серии AG-X с применением специальной оснастки (Рис.10).



*а – заготовка для гибки; б – схема гибки в приспособлении; в, г – фотоснимок испытательного стенда*

*Рисунок 10 – Заготовка и приспособление для гибки с регистрацией сигналов АЭ*

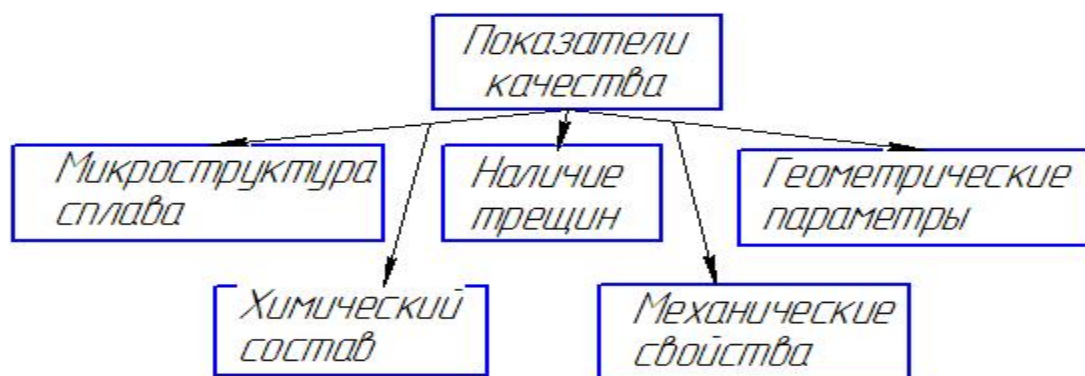
По результатам механических испытаний на растяжение и изгиб с регистрацией параметров АЭ планируется установить уровни и амплитудно-частотные характеристики сигналов АЭ для различных условий нагружения образцов из титанового сплава ВТ23 без дефектов, а также с умышленно



нанесенными наружными дефектами. В случае наличия трещин внутри исходного материала или в полуфабрикате необходимо знать причину возникновения АЭ волн, что в последующем позволит установить предельные уровни сигналов АЭ при релаксационных процессах.

#### *9. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИСХОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ СП МЕТОДОМ АЭ. СЛАЙД 6*

На схеме представлены основные показатели качества, которые необходимо контролировать в исходных заготовках упругих элементов (Рис.11).



*Рисунок 11 – Основные показатели качества исходных заготовок СП*

Химический состав, механические свойства, микроструктуру сплава, как правило, контролируют на предприятии изготовители проката.

В опытно-конструкторской работе планируется применить метод АЭ для обнаружения дефектов в материале исходной заготовки для спиральной пружины из сплава ВТ23.

На рисунке 12 представлена зависимость сигналов АЭ от силы, действующей в процессе нагружения образца. На участке АВ рост усилия сопровождается увеличением сигнала АЭ. На участке ВС происходит разгрузка и повторная нагрузка изделия, при этом сигнал АЭ регистрируется только в точке В, соответствующей уровню окончания первичной нагрузки.

На участке BD рост усилия сопровождается ростом сигнала АЭ. На участке DE следует разгрузка материала и его вторичная нагрузка, при этом сигнал АЭ возникает в точке F, соответствующей усилию меньшему, чем в момент окончания первичной нагрузки. Это свидетельствует о наличии дефекта внутри материала. На участке FG усилие остается постоянным, но при этом наблюдается рост сигналов АЭ. Это также свидетельствует о наличии дефекта внутри материала, т.к. если бы дефектов не было, то сигналы АЭ при постоянной нагрузке сначала стабилизировались, а затем постепенно уменьшались.

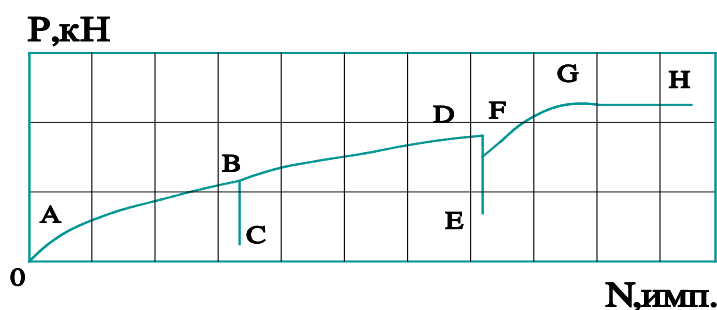


Рисунок 12 – Схема изменения сигналов АЭ от силы нагружения

Закономерность восстановления сигнала АЭ при повторной нагрузке регламентируется коэффициентом Фелисити ( $FR$ ):

$$FR = \frac{P_{AЭ}^{i+1}}{P_{AЭ}^i}, \quad (2.4)$$

$P_{AЭ}^{i+1}$  - величина нагрузки, при которой возникают сигналы АЭ при повторном нагружении;

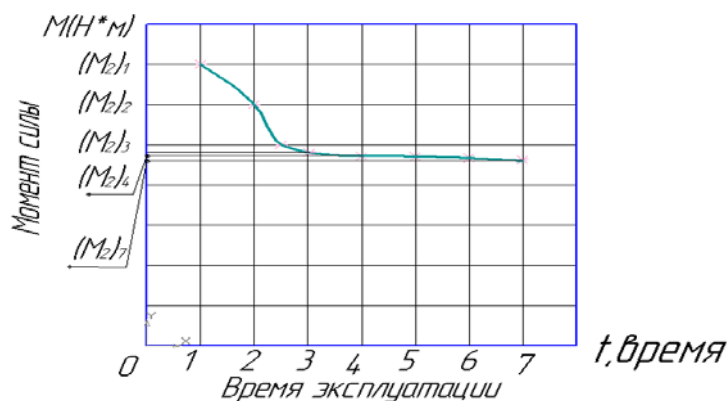
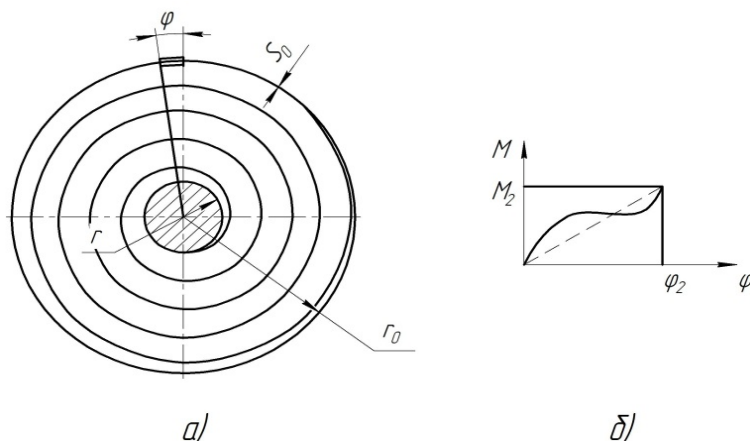
$P_{AЭ}^i$  - максимальная величина первичного нагружения.

Если  $FR \geq 1$ , то дефекты в конструкции отсутствуют (эффект Кайзера). Если коэффициент  $FR < 1$ , то внутри изделия есть дефект. Международный стандарт ASME, регламентирует отбраковывать изделия, у которых  $FR < 0,95$ .

В экспериментальном исследовании настоящей работы планируется тоекратно нагружать полосу, являющуюся исходной заготовкой для спиральной пружины. Испытание проводить на испытательной машине Shimadzu AGX -100 кН, в процессе нагружения на полосу установить датчики АЭ для регистрации сигналов АЭ. После нагружения с регистрацией сигналов АЭ проанализировать результаты и дать оценку возможности применения метода АЭ для обнаружения дефектов в исходной заготовке спиральной пружины[10-20].

#### 10. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОЦЕНКИ РЕЛАКСАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СП МЕТОДОМ АЭ. СЛАЙД 7

Существующие методики оценки релаксационной стойкости пружин заключаются в проведение циклических испытаний выборочной партии пружин с заданным количеством циклов и измерении изменения деформационно-силовых параметров ( $F$  - сила,  $M$  -момент силы,  $\varphi$ -угол при скручивании). Схема и релаксационная кривая СП представлена на рис13.)



в)

$L$  – длина развернутой плоской спиральной пружины (ленты);  $s_0$  – толщина пружины (ленты);  $b$  – ширина пружины (ленты);  $r$  – радиус валика;  $r_0$  – радиус барабана;  $n_2$  – число витков заведенной пружины (в барабане);  $n$  – число витков спущенной пружины (в барабане);  $M_2$  – рабочий момент на валике;  $\varphi_2$  – угол поворота валика при рабочем моменте,  $M$  – момент силы спиральной пружины,  $t$  – время эксплуатации

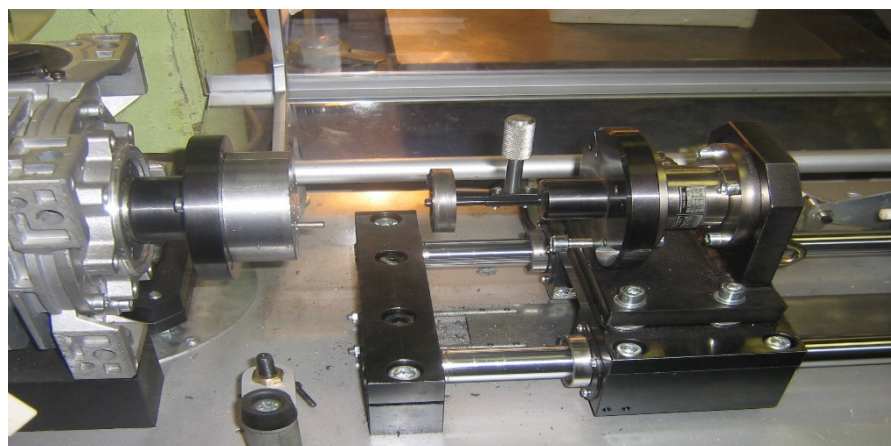
Рисунок 13 - Схема и геометрические параметры СП:

а-схема СП, б-деформационно-силовая характеристика, в-релаксационная кривая

По результатам циклических испытаний (заводка СП до  $\varphi_2$  с последующим срабатыванием) строится релаксационная кривая на основе значений контролируемых параметров на каждом этапе испытаний, для СП она имеет вид (Рис. 13 в).

Условием изготовления и этапов эксплуатации СП является сжатие (заход) СП до определенного момента (например  $M_2$ ). Пружина заводится до угла  $\varphi_2$ , ему соответствует момент  $M_2$  на стадии изготовления – технологическая операция заневоливание, этот момент времени соответствует значению  $(M_2)_1$ . В процессе заневоливания происходит стабилизация деформационно-силовых параметров (перераспределение внутренних напряжений), поэтому после операции «заневоливание» значение  $M_2$  изменяется при  $\varphi_2$ , что соответствует  $(M_2)_2$ . В случае использования термически не стабильного материала (рессорно-пружинной стали) и повышения температуры, возможны релаксационные процессы в материале пружины значение  $M_2$  изменяется при  $\varphi_2$ , что соответствует  $(M_2)_3$ . Затем в течение длительного срока эксплуатации от 5 лет и более значения  $M_2$  при  $\varphi_2$  изменяется не значительно. В зависимости от материала пружины и режимов термической и термомеханической обработки релаксация может достигать от 2% и более, значения  $(M_2)_4$  и  $(M_2)_7$  на релаксационной кривой (Рис.13 в). Эти значения  $M_2$  и соответственно уровни релаксации устанавливаются экспериментально. Измерение изменения деформационно-

силовых параметров СП на различных этапах экспериментального исследования планируется производить в специально изготовленном стенде (Рис.14).

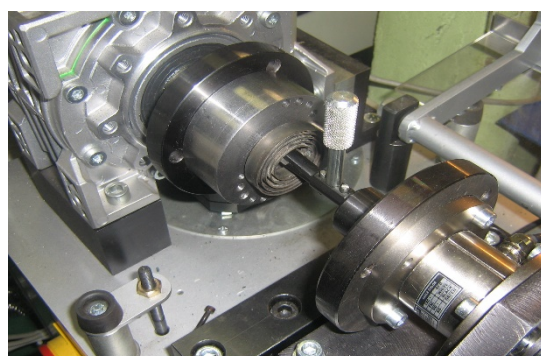


а)

«Результаты последнего по времени испытания»  
Количество ступеней- 3  
Цикл: нагружение

	1	2	3	4	5
М	44.8	119.6	144.8		
Н	0.5000	1.5004	1.7644		
α, °	180	540	635		

ESC- выход / ENTER- следующая страница



б)

в)

*а – общий вид испытательного стенда; б - электронное табло с параметрами моментов и углов закручивания; в – измерение деформационно-силовых спиральной пружины*

*Рисунок 14 – Испытательный стенд для измерения деформационно-силовых характеристик СП*

Существующая методика оценки релаксационной стойкости имеет следующие недостатки:

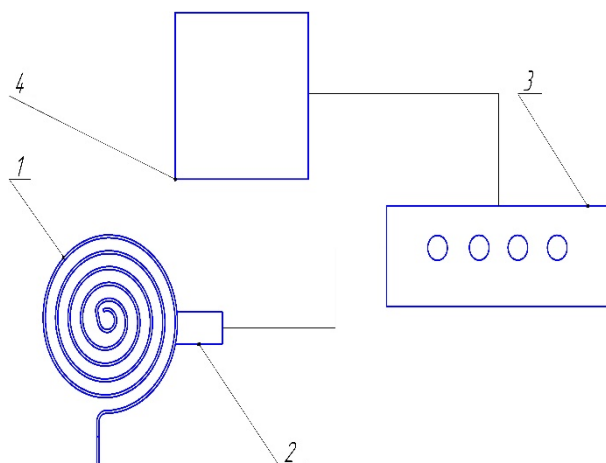
-испытания проводят на выборочной партии изготовленных пружин и по релаксации выборочной партии делают вывод о релаксационной стойкости всех пружин (не достаточная точность);



- не позволяет оценивать релаксационную стойкость каждой пружины изготовленной партии;
- значительные затраты связаны с подготовкой и проведением циклических испытаний.

Для решения задачи оценки релаксационной стойкости каждой изготовленной СП планируется применить метод АЭ. Планируется:

- 1) на этапе заневоливания СП в течение 12 часов установить датчик АЭ и зарегистрировать параметры АЭ (Рис.15);
- 2) провести циклические испытания (до 1000 циклов) каждой исследуемой СП в интервале нагрузок от угла  $\varphi_1$  до  $\varphi_2$ , через каждые 100 циклов производить замеры моментов при заданных углах (построить релаксационную кривую);
- 3) установить закономерности между параметрами АЭ и релаксационной стойкостью;
- 4) повторить пункты 1-3 с предварительным нагревом СП в закалочной печи до  $+120^{\circ}\text{C}$  в течение 10 часов.
- 5) на основе полученных результатов сделать вывод о релаксационной стойкости исследуемых пружин и возможности применения метода АЭ для прогнозирования релаксации на длительный период эксплуатации.



а)

б)

*а- схема заневоливания с регистрацией сигналов АЭ; б- фотоснимок установки датчика АЭ на СП; 1- спиральная пружина; 2-датчик АЭ; 3-прибор АЭ; 4-ПК с программой сбора и обработки АЭ параметров*

*Рисунок 15 – Выдержка при постоянной силе в течение 12 часов (заневоливание) СП с регистрацией сигналов АЭ*

Выполнение первого этапа опытно-конструкторской работы, позволило:

- провести оценку конструкции и технологичности и технических требований объекта контроля;
- сформулировать основные критерии качества СП;
- проанализировать применяемые методы оценки эксплуатационных характеристик, их достоинства и недостатки;
- сформировать цель и основные задачи работы;
- проанализировать особенности метода акустической эмиссии, как метода контроля эксплуатационных характеристик упругих элементов;
- сформировать основные этапы экспериментального исследования для установления закономерностей между параметрами акустической эмиссии и эксплуатационными свойствами спиральных пружин;
- разработать эскизные проекты приспособлений, стендов включающих в себя необходимые приборы и оборудование для проведения экспериментальных исследований.

Вторым этапом работы является проведение экспериментального исследования, анализ полученных результатов. На основе полученных результатов построение методики оценки качества и релаксационной стойкости спиральных пружин на основе метода акустической эмиссии.

Разработка практических рекомендаций по использованию в производстве спиральных пружин[15-20].

# 11. РЕЗУЛЬТАТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ23 С РЕГИСТРАЦИЕЙ СИГНАЛОВ АЭ. СЛАЙД 8

-образцы, изготовленные по техническим условиям на титановый сплав ВТ23 имеют обозначения О..ТУ-№ (первая буква-режим термообработки, ТУ- указывает на тип образца, №-порядковый номер опытного образца);

-образцы, изготовленные по ГОСТ имеют обозначение О..ГОСТ-№.

Анализ первой группы образцов - образцы, изготовленные по ТУ с толщиной рабочей части 10 мм, отожженные при  $t = 650^{\circ}\text{C}$  в течение 4 часов. Для образца ОТУ-1 на участке ОА, (Приложение А) соответствующего упругой деформации, предел пропорциональности  $\sigma_{п.п.}=808,6$  МПа, зарегистрирован уровень сигналов АЭ на частоте 100-200 кГц равный  $N_{п.п.}=7$  имп. На участке АА<sub>1</sub>, соответствующего упруго-пластической деформации, условный предел текучести материала  $\sigma_{0,2}=933,6$  МПа, зарегистрирован уровень сигналов АЭ с  $N_{0,2}=12$  имп. На участке А<sub>1</sub>В, соответствующего пластической деформации, интенсивность напряжений в момент образования шейки  $\sigma_{iy}=1179,0$  МПа, зарегистрирован уровень сигналов АЭ  $N_{iy}=81$  имп.

Образцы группы 4 ( ВТ23 закалка 850°C + старение 550°C, изготовленные по ГОСТ и вырезанные вдоль проката)

Образцов группы 3 (ВТ23 отжиг по режиму 650°C 4 часа)

Таблица 2 – Сопоставление параметров механических характеристик и сигналов АЭ плоских образцов после разрыва

Группы и обозначения образцов	$\sigma_{п.п.}$ , МПа	$N_{п.п.}$		$\sigma_{0,2}$ , МПа	$N_{0,2}$		$\sigma_{iy}$ , МПа	$N_{iy}$	
		100-200 кГц	200-300 кГц		100-200 кГц	200-300 кГц		100-200 кГц	200-300 кГц
<b>1</b>	ОТУ-1	808,6	7	-	933,6	12	-	1179,0	81
	ОТУ-2	748,8	18	7	889,4	41	14	1158,9	126
									52

	0ТУ-3	797,1	63	44	909,8	91	62	1172,8	156	84
	0ТУ-4	779,6	36	7	940,5	43	7	1241,6	75	9
<u>2</u>	ЗСТУ-1	907,2	2331	1492	1033,6	9419	5372	1291,9	4638	1410
	ЗСТУ-2	742,0	4523	10113	893,1	17352	37008	998,1	25840	49785
	ЗСТУ-3	813,7	11757	5877	885,6	22455	11278	1038,8	54110	23553
	ЗСТУ-4	907,5	840	955	999,3	11904	11655	1190,8	54830	43206
<u>3</u>	ОГОСТ-1	549,9	45	7	747,8	98	20	1283,9	786	68
	ОГОСТ-2	459,1	30	17	558,8	56	52	1205,2	242	199
<u>4</u>	ЗСГОСТ-1В	410,9	0	0	452,9	0	0	1304,5	2904	26107
	ЗСГОСТ-2В	334,8	0	0	355,4	0	0	1025,9	5804	7168
	ЗСГОСТ-3В	502,3	0	0	599,4	0	0	1048,3	3291	1202
	ЗСГОСТ-4В	507,3	5	2	733,5	1123	1780	999,4	7213	4926
<u>5</u>	ЗСГОСТ-1П	821,4	596	28	860,8	724	32	937,9	1207	62
	ЗСГОСТ-2П	554,4	510	567	691,5	2054	4021	973,1	4588	18121
	ЗСГОСТ-3П	354,9	0	0	365,1	1	0	1067,2	3539	15408
	ЗСГОСТ-4П	445,7	0	0	511,2	18	6	1003,5	2212	6243

По результатам механических испытаний образцов на растяжение с регистрацией сигналов АЭ, выявлено:

1.Общий уровень сигналов АЭ для отоженных образцов ниже( $N_{\max}$  =786 имп.), чем для термообработанных(по режиму закалка+старение)( $N_{\max}$  =54830 имп.);

2. Изменение уровня сигналов АЭ на участке от предела пропорциональности( $\sigma_{н.л.}$ ) до условного предела текучести( $\sigma_{0,2}$ ) обозначили коэффициентом( $L_{упз.}$ ):

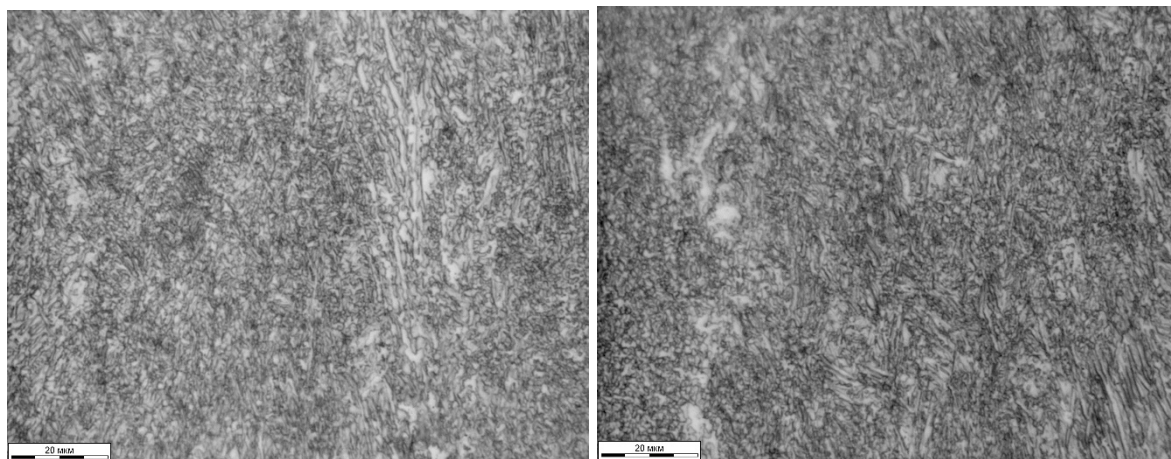
$$L_{упз.} = \frac{N_{н.л.}}{N_{0,2}}, (3.1)$$

где  $N_{н.л.}$  - уровень сигналов АЭ, зарегистрированный от начала нагружения до достижения напряжения  $\sigma_{н.л.}$ ;

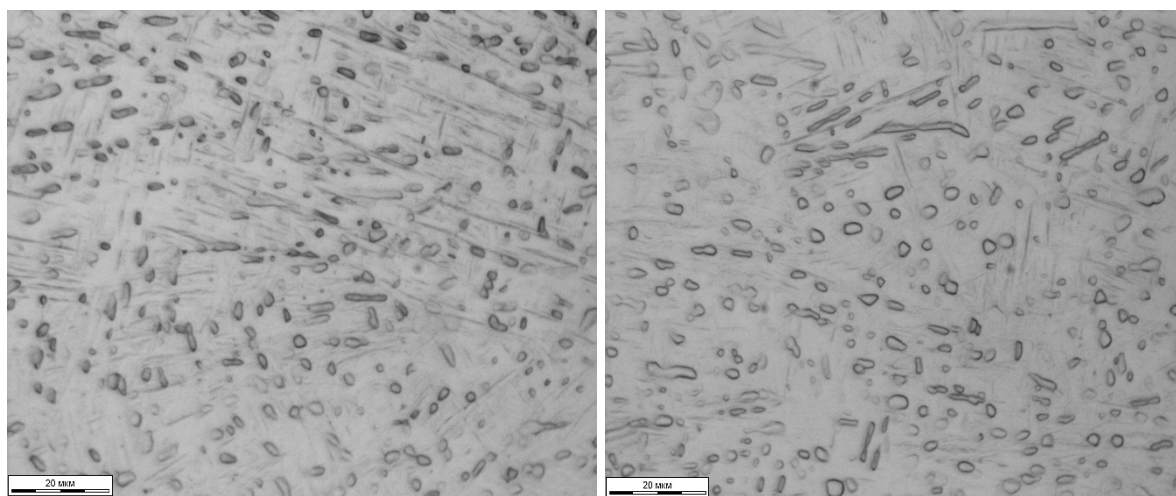
$N_{0,2}$  - уровень сигналов АЭ, зарегистрированный от начала нагружения до достижения напряжения  $\sigma_{0,2}$ . Прирост сигналов АЭ в упруго-пластической зоне (на участке от предела пропорциональности до условного предела текучести) значительно выше для образцов, обработанных по режиму

закалки и старения  $L_{упз.}=0,07$ , нежели для отожженных  $L_{упз.}=0,5$ , а абсолютные величины отличаются на порядок.

3. Не значительные различия в напряжениях, соответствующих моменту образования шейки, для отожженных  $(\sigma_{iy})_{cp.}=1188$  МПа и закаленных и состаренных  $(\sigma_{iy})_{cp.}=1664$  МПа, соответствуют значительные различия в уровнях сигналов АЭ для отожженных  $(N_{iy})_{cp.}=109$  имп. и закаленных и состаренных  $(N_{iy})_{cp.}=44926$  имп. Для установления причины различия сигналов АЭ между отожженными и закаленными и состаренными образцами исследовали микроструктуру образцов.



а)



б)

а- отожженные при  $t=650^{\circ}\text{C}$  4 часа; б- закалка при  $t=850^{\circ}\text{C}$  + старение при  $t=550^{\circ}\text{C}$

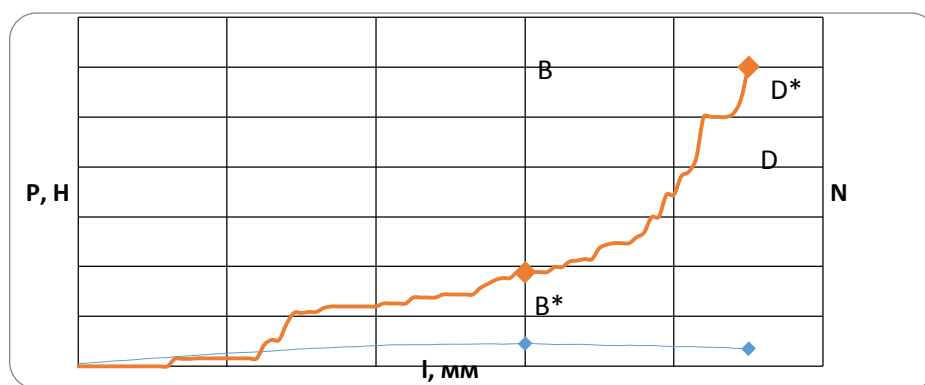


Микроструктура в состоянии поставки представляет собой  $(\alpha + \beta)$ -структуру «корзиночного плетения», типичную для отожжённых  $(\alpha + \beta)$ -сплавов (Рис.16 а). На фотоснимке белым цветом в виде вытянутых утолщенных отрезков («пластинок»), переплетенных между собой показана  $\alpha$ -фаза сплава ВТ23, белым цветом в виде включений различной формы (глобулей) вторичная  $\alpha$ -фаза (образовавшаяся после отжига), темным цветом на фотоснимке изображена  $\beta$ -фаза. Режим закалки *при  $t=850^{\circ}\text{C}$  +старение при  $t=550^{\circ}\text{C}$*  позволяет получить однородную  $(\alpha + \beta)$ -структуру сплава с равномерным распределением глобулярных включений  $\alpha$ -фазы средних размеров (Рис.16 б). Выявленные закономерности доказывают наличие зависимостей между уровнем сигналов АЭ и микроструктурой образцов из сплава ВТ23, что в свою очередь обосновывает наличие закономерностей между релаксационной стойкостью конечного изделия, его микроструктурой и уровнем сигналов АЭ, как в зоне упругой, так и в зонах упруго-пластической и пластической деформации.

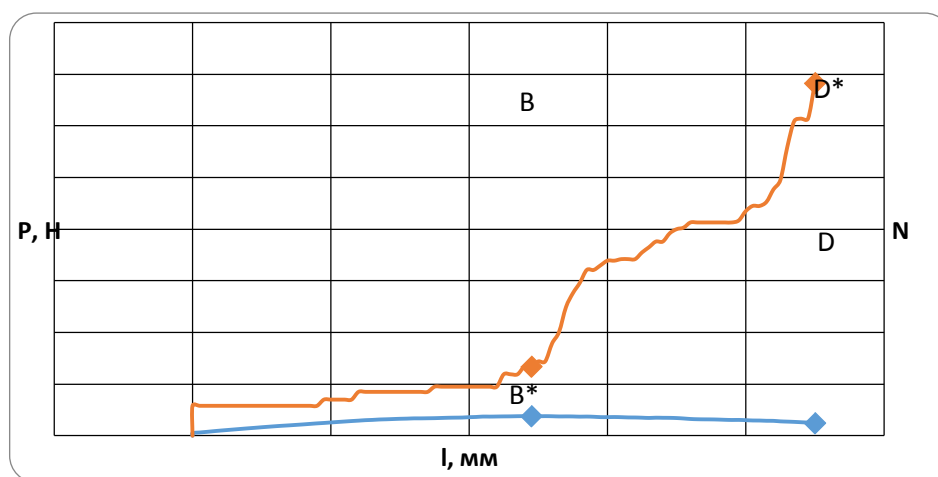
## 12. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ИЗГИБ ЛИСТОВЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ23 С РЕГИСТРАЦИЕЙ СИГНАЛОВ АЭ. СЛАЙД 9

Для анализа полученных результатов диаграмма изгиба разделена на два участка: ОВ – участок, охватывающий начало нагружения и достижение максимальной силы при изгибе, ВD – участок, соответствующий изменению силы от максимальной силы до максимальной деформации(45 мм), что соответствует изгибу испытанного образца на  $90^{\circ}$ . Для сопоставления изменения силы при деформации и суммарной АЭ, соответствующие участки на диаграмме суммарная АЭ – деформация образца разделены на: ОВ<sub>1</sub>– значение сигналов АЭ, зарегистрированные по достижению максимальной силы в процессе изгиба, В<sub>1</sub>D<sub>1</sub>– значение сигналов АЭ, зарегистрированные по достижению максимальной деформации(угла  $90^{\circ}$ ).

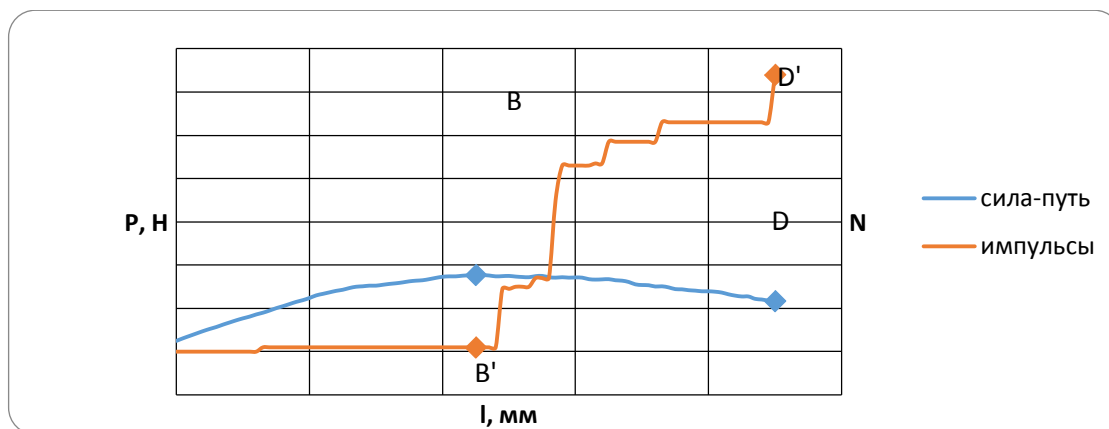
Анализируя результаты технологических испытаний на изгиб с регистрацией сигналов АЭ, выявили, что в процессе изгиба образцов импульсы АЭ на участке ОВ<sub>1</sub> излучаются менее интенсивно, чем на участке В<sub>1</sub>Д<sub>1</sub>. Эта закономерность сохраняется в независимости от количества нагружений испытуемого образца. Количество импульсов, соответствующих второму и третьему нагружению меньше, чем количество импульсов при первом нагружении ( $N_1 > (N_2; N_3)$ ). Большая интенсивность излучения сигналов АЭ после достижения максимальной силы при изгибе, связана с большей энергией, выделяющейся на 2-м этапе нагружения.



а)



б)



в)

а- первое нагружение, б-второе нагружение, в – третье нагружение

Рисунок 17 - Совмещенные диаграммы зависимостей сила( $P$ ), количество импульсов ( $N$ )- деформация образца №1 при изгибе на  $90^\circ$

излучение сигналов АЭ имеет корреляционную зависимость не только с внутренним состоянием материала (микро и макро структурой), но и с процессами, протекающими при нагружении (пластическая деформация). Предположили, что энергия излучения сигналов АЭ в процессе изгиба( $E_u$ ) состоит, как минимум из двух составляющих:

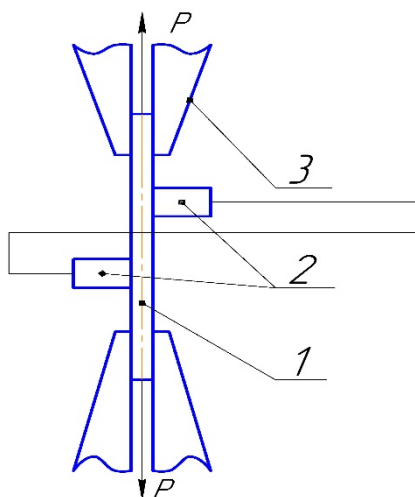
1. Энергия взаимодействия фазовых составляющих ( $E_m$ ) на уровне зерна сплава (для титанового сплава ВТ23  $\alpha$  и  $\beta$  фаз (участок ОВ);
2. Энергия, возникающая в результате действия напряжений( $E_\sigma$ ) при изгибе образца ( участок ВD).

Вероятно, что энергия участка ВD не связана с пластической деформацией при изгибе, так как сопоставление результатов испытаний на растяжение и обобщения результатов экспериментального исследования, указывают на то, что на участке спектра АЭ (частота пропускания 100 – 200 кГц) при пластической деформации не регистрируются сигналы АЭ. Запишем условие излучение сигналов АЭ при изгибе:

$$E_u = E_m + E_\sigma .(3.2)$$

*13. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИСХОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ СП  
МЕТОДОМ АЭ. СЛАЙД 9*

Схема нагружения полосы представлена на рис.18.



*1-исходная заготовка СП, 2-датчики АЭ, 3-тиски испытательной машины*

*Рисунок 18 – Схема нагружения исходной заготовки СП с регистрацией сигналов АЭ*

По результатам испытаний по оценки возможности применения метода АЭ для оценки качества исходных заготовок выявлено:

- трехкратное нагружение исходной заготовки СП с регистрацией сигналов АЭ позволяет оценить максимальный уровень сигналов АЭ на каждом нагружении, предположили, что в случае выполнения закономерности уменьшения сигналов АЭ на каждом последующем обжати ( $N_1 > N_2 > N_3$ ) заготовка не имеет предрасположенности к развитию дефектов и пригодна для использования в технологическом процессе;

- выявлено, что в независимости от выполнения закономерности уровня сигналов АЭ на каждом нагружении, числовые значения сигналов АЭ различны, для заготовок из одной партии материала, предположили, что различный уровень сигналов АЭ связан с различиями в микроструктуре образцов СП и остаточными напряжениями в материале исходной заготовки;

- отработка оптимальных режимов технологического процесса (оптимальных режимов термической и термомеханической обработки, обеспечивающей оптимальную микроструктуру) и проведение дополнительных исследований позволит использовать метод АЭ, как контрольную операцию и исключить использование образцов-свидетелей для контроля режимов термообработки, а также корректировать температурные режимы, в зависимости от исходного состояния микроструктуры заготовок СП.

#### *14. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОЦЕНКИ*

##### *РЕЛАКСАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СП МЕТОДОМ АЭ. СЛАЙД 10*

Для установления закономерностей между параметрами АЭ и релаксационной стойкостью ТП проведено экспериментальное исследование, которое состояло из следующих этапов.

- 1.Заневоливание СП с регистрацией сигналов АЭ;
- 2.Измерение деформационно-силовой характеристики СП в стенде;
- 3.Циклические испытания СП с фиксацией значения момента до и после нагрузок в 100 циклов.
- 4.Оценка релаксационной стойкости СП и сопоставление с параметрами АЭ.

Для проведения экспериментального исследования изготовлено 9 образцов.

Результаты первого этапа экспериментального исследования СП по заневоливанию с регистрацией сигналов АЭ представлены в табл.4.

Таблица 4 – Результаты заневоливания СП с регистрацией сигналов АЭ

Образец	Характеристика	Сигналы АЭ при заневоливание пружины, $N_{общ.12}$ , имп.	Выбросы суммарной акустической эмиссии при заневоливание, $V_{общ.12}$ , шт.
<b>СП-1</b>	Полоса $s=0,9$ мм. Гибка. Закалка 850°C – 25 мин.; старение 550 °C - 10 часов.	149	4186
<b>СП-2</b>	Вырезана из листа 10мм, $s=1,5$ . <u>Термообработка:</u> Старение 550°C - 10 часов.	1	3
<b>СП-3</b>	Полоса $s=1,5$ мм. Гибка. <u>Термообработка:</u> Закалка 850°C – 25 мин.; старение 550 °C - 10 часов.	1264	52277
<b>СП-4</b>	Вырезана из листа 10мм, $s=1,5$ . <u>Термообработка:</u> Старение 550°C - 10 часов.	2	7
<b>СП-5</b>	Вырезана из листа 10мм, $s=1,5$ . <u>Термообработка:</u> Старение 550°C - 10 часов.	3	9
<b>СП-6</b>	Вырезана из листа 10мм, $s=1,5$ . <u>Термообработка:</u> Старение 550°C - 10 часов.	3	5
<b>СП-7</b>	Полоса $s=1,5$ мм. Гибка. <u>Термообработка:</u> Закалка 850°C – 25 мин.; старение 550 °C - 10 часов.	528	15898
<b>СП-8</b>	Вырезана из листа 10мм, $s=1,5$ . <u>Термообработка:</u> Старение 550°C - 10 часов.	17	657
<b>СП-9</b>	Полоса $s=1,5$ мм. Гибка. <u>Термообработка:</u> Закалка 850°C – 25 мин.; старение 550 °C - 10 часов.	148	11907

По результатам испытаний первого этапа выявлено:

1. СП изготовленные по различным технологическим процессам имеют различные значения параметров АЭ ( $N_{общ.12}$  - общее количество импульсов

зарегистрированное за 12 часов  $V_{общ.12}$  -превышение(пересечение) электрическим сигналом АЭ установленного порогового уровня(40 дБ ). СП изготовленные способом отрезки из листа толщиной 10 мм имеют малый уровень сигналов АЭ и низкое значение выбросов по сравнению с СП изготовленных способом гибки полосы с закалкой и старением (Табл.4).

2.Максимальный уровень параметров АЭ для СП, изготовленных способом отрезки, составил  $N_{общ.12}=17$  имп. и  $V_{общ.12}=657$  выб. Для пружин изготовленных способом гибки  $N_{общ.12}=1264$  имп. и  $V_{общ.12}=52277$  выб.

Таким образом, в процессе выдержки СП при постоянной силе, обнаружена закономерность, заключающаяся в отсутствии значительных выбросов сигналов АЭ у пружин, предположительно не имеющих наружных дефектов и предрасположенности к развитию внутренних дефектов. На основе полученной закономерности сделано предположение о том, что у пружин, не имеющих высокого риска утраты требуемого значения релаксационной стойкости, в течение 20-25 лет эксплуатации, из-за наличия предрасположенности к развитию внутренних дефектов или нестабильного состояния структуры материала общее число сигналов АЭ в процессе их длительного нагружения, не должно превышать некоторого порогового значения, которое зависит от материала пружины (4).

$$N_{общ.12} \leq N_{порог} , \quad (3.3)$$

где  $N_{порог}$  - пороговое значение общего количества импульсов АЭ в процессе выдержки СП в течение 12 часов;

$N_{общ.12}$  - общее количество импульсов АЭ зарегистрированных в процессе выдержки СП в течение 12 часов. Числовое значение  $N_{порог.}$  назначается на основании обобщения числа результатов испытаний.



После заневоливания с регистрацией сигналов АЭ произвели циклические испытания СП с количеством циклов 200 в интервале рабочих нагрузок от  $M_1$  до  $M_2$ . После каждых 100 циклов производили измерения деформационно-силовых характеристик пружин и оценивали релаксационную стойкость ( $R$ ):

$$R = \left( \frac{M_{\text{начал.}} - M_{\text{конеч.}}}{M_{\text{начал.}}} \right) \cdot 100\% \quad (3.4)$$

где  $M_{\text{начал.}}$  - рабочий момент СП после завершения технологического процесса;

$M_{\text{конеч.}}$  - рабочий момент СП после циклических нагрузок в рабочем интервале.

Результаты циклических испытаний СП представлены в табл. 5, 5.1.

*Таблица 5 - Результаты циклических испытаний СП-1*

№п.п.	СП-1	Значения моментов силы при эксплуатационных углах завода, $\varphi_1 = 180^\circ$ $\varphi_2 = 540^\circ$ $\varphi_2 = 635^\circ$			Значения релаксации после циклических испытаний $R, \%$		
		$M_1,$ Н·м	$M_2,$ Н·м	$M_3,$ Н·м	$R_1, \%$	$R_2, \%$	$R_3, \%$
1	Значения после заневоливания 12 часов	4,16	11,21	15,16			
2	После 100 циклов	4,18	11,23	15,1	0,5	0,2	0,4
3	После 200 циклов	4,17	11,22	15,0	0,3	0,1	0,7

*Таблица 5.1 - Результаты экспериментального исследования релаксационной стойкости СП-3*

№п.п.	СП-3	Значения моментов силы при эксплуатационных углах завода, $\varphi_1 = 289^\circ$ $\varphi_2 = 469^\circ$ $\varphi_2 = 516^\circ$			Значения релаксации после циклических испытаний $R, \%$		
		$M_1,$ Н·м	$M_2,$ Н·м	$M_3,$ Н·м	$R_1, \%$	$R_2, \%$	$R_3, \%$

<b>1</b>	<b>Значения после заневоливания 12 часов</b>	1,24	2,02	2,55			
<b>2</b>	<b>После 100 циклов</b>	1,25	2,00	2,49	0,8	1,0	2,3
<b>3</b>	<b>После 200 циклов</b>	1,23	2,04	2,56	1,6	2	2,8

Релаксация всех испытанных СП не превысила значение в 2,8% у пружины с максимально зарегистрированными сигналами АЭ на этапе заневоливания  $N_{общ.12}=1264$  имп. Для СП-1 с зарегистрированным уровнем сигналов  $N_{общ.12}=149$  имп. максимальное значение релаксации составило 0,7%. Для всех остальных образцов релаксационная стойкость не превысила значение в 1%.

*Таблица 6 – Обобщенные результаты оценки релаксационной стойкости СП из титанового сплава ВТ23*

Образец	Сигналы АЭ при заневоливание пружины, $N_{общ.12}$ , имп.	Выбросы суммарной акустической эмиссии при заневоливание, $V_{общ.12}$ , шт.	Максимальное значение релаксации, $R$ , %
<b>СП-1</b>	149	4186	0,70
<b>СП-2</b>	1	3	0,6
<b>СП-3</b>	1264	52277	2,8
<b>СП-4</b>	2	7	0,5
<b>СП-5</b>	3	9	0,4
<b>СП-6</b>	3	5	0,89
<b>СП-7</b>	528	15898	0,92
<b>СП-8</b>	17	657	0,74
<b>СП-9</b>	148	11907	0,63

По результатам экспериментального исследования релаксационной стойкости СП, сделаны следующие выводы:

-установлена зависимость между уровнем сигналов АЭ на этапе заневоливания СП и релаксационной стойкостью после циклических нагрузок;

- максимальный уровень сигналов АЭ, зарегистрированный для группы образцов составил  $N_{общ.12}=1264$ имп. этому значению соответствует максимальная релаксация  $R=2,8\%$ ;

- характерным пороговым значением сигналов АЭ ( $N_{порог}$ ) для исследованных образцов является значение в 528 имп.;

- вероятно, что существует закономерность между параметрами АЭ и состоянием микроструктуры сплава СП, сформированной по завершению технологического процесса изготовления, которая предопределяет релаксационную стойкость на длительный период времени.

#### *14. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СПИРАЛЬНОЙ ПРУЖИНЫ С ОТОГНУТЫМИ ЗАЦЕПАМИ НА ОСНОВЕ УРОВНЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ. СЛАЙД 11*

Одним из показателей эксплуатационных свойств СП является релаксационную стойкость ( $R$ ), которая рассчитывается по формуле:

$$R = \left( \frac{M_{начал.} - M_{конеч.}}{M_{начал.}} \right) \cdot 100\% \quad (3)$$

где  $M_{начал.}$  - рабочий момент СП после завершения технологического процесса;

$M_{конеч.}$  - рабочий момент СП после циклических нагрузок в рабочем интервале.

Существующая методика оценки релаксационной стойкости СП заключается в проведении циклических нагружений выборочной партии, оценки их релаксации и вывода о всей партии на основе результатов,

полученных по выборке. Предлагаемая методика заключается в регистрации сигналов АЭ на операции заневоливания СП и качественной оценки релаксационной стойкости на базе установленных закономерностей. На основе полученной закономерности сделано предположение о том, что у пружин, не имеющих высокого риска утраты требуемого значения релаксационной стойкости, в течение 20-25 лет эксплуатации, из-за наличия предрасположенности к развитию внутренних дефектов или нестабильного состояния структуры материала общее число сигналов АЭ в процессе их длительного нагружения, не должно превышать некоторого порогового значения, которое зависит от материала пружины.

#### 1.Оцениваемые характеристики и расчетные соотношения

После заневоливания с регистрацией сигналов АЭ оценивается непревышение сигналами АЭ порогового значения:

$$N_{\text{общ.12}} \leq N_{\text{порог}} , \quad (\text{B.1})$$

где  $N_{\text{порог}}$  - пороговое значение общего количества импульсов АЭ в процессе выдержки СП в течение 12 часов;

$N_{\text{общ.12}}$  - общее количество импульсов АЭ зарегистрированных в процессе выдержки СП в течение 12 часов. Числовое значение  $N_{\text{порог.}}$  назначается на основании обобщения числа результатов испытаний и для спиральных пружин из сплава ВТ23 обработанных по режиму закалки и старении имеет порог:

$$N_{\text{порог.}} = 1000 \text{ имп.}, (\text{B.2})$$

что свидетельствует о стабильности состояния микроструктуры сплава СП, которая обеспечит не превышение релаксационной стойкостью значения в 2 %.

#### 5.Условия, режимы, порядок, место проведения, виды и этапы испытаний

Методика встраивается в технологический процесс изготовления СП на операции заневоливание. Контролю подвергается каждая пружина изготовленной партии. Методика оценки качества применяется на предприятии изготовители СП.

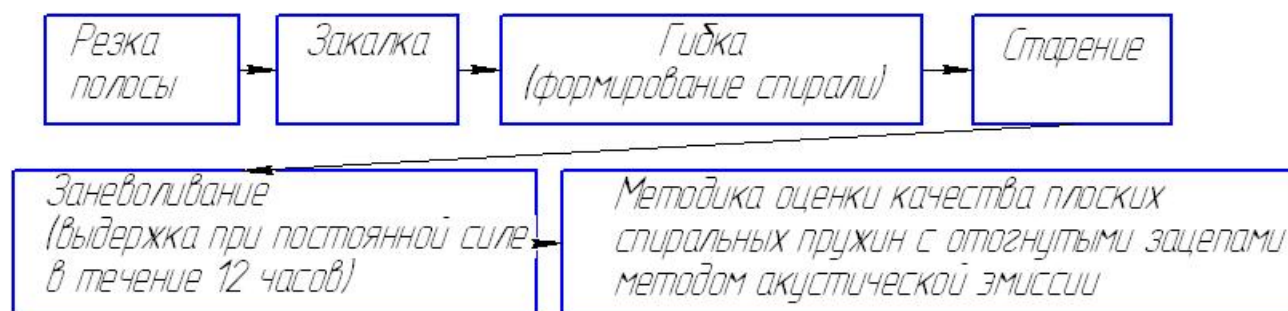


Рисунок 19 – Схема положения методики оценки качества в технологическом процессе

По результатам заневоливания СП с регистрацией сигналов АЭ делается вывод о ее релаксационной стойкости.

## 2.Обработка, анализ и оценка результатов испытаний

По результатам испытаний оценивается не превышение уровня сигналов установленного порогового значения. Пружины для которых не выполняется закономерность не превышения порогового значения  $N_{общ.12} \leq N_{порог}$ , считают не прошедшими испытание по оценки качества и не допускают к длительной эксплуатации.

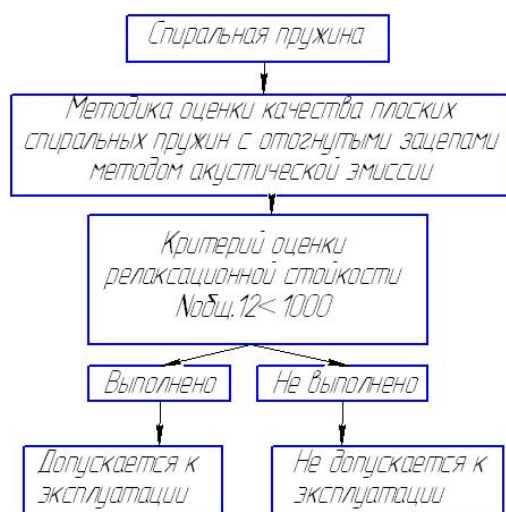


Рисунок 20 – Критерий оценки релаксационной стойкости СП методом АЭ

### ***Список использованных источников***

1. А.В.Лясников, Н.П.Агеев, Д.П.Кузнецов [и др.]. Сопротивление материалов пластическому деформированию в приложениях к процессам обработки металлов давлением. – Санкт-Петербург: Внешторгиздат-Петербург,1995.-527с.
2. И.Ф.Прохоренко Унифицированные пружины сжатия- М. Металлургия,1985.-695с.
3. М.В.Ботанов, Н.В.Петров Пружины.- М.: Машиностроение,1968.-215 с.
4. В.И.Анурьев Справочник конструктора-машиностроителя.- М.:Машиностроение,1978.-559с.
5. И.Ф.Прохоренко,Н.М.Панченко,Е.К.Решетников Унифицированные пружины растяжения и пружины других типов.-М.:Металлургия,1985.-695с.
6. В.П.Белогур, А.Н.Трещевский, С.Ю.Конев Перспективные титановые сплавы для пружин запорной арматуры химической и нефтеперерабатывающей промышленности/Современные пружинные материалы конференция ЦКБА 2004
7. В.П.Белогур, А.Н.Трещевский, С.Ю.Конев Опыт применения титановых пружин при повышенных температурах// «Бизнес-Гид» №1. 2007.
8. Ю.М.Тебенко Проблемы производства высокоскоростных пружин и пути их решения. - Ставрополь: ООО «Мир данных»,2007.-152 с.
9. Г.С.Ионычев, Д.А.Прокошкин, А.Г.Рахштадт, Л.В.Каткова Релаксация напряжений в пружинных сплавах при циклическом нагружении
- 10.В.В.Забильский, М.М. Исмагилов, О.И. Шаврин, Ю.Т. Яковлев Упругое последствие и долговечность заневоленных пружин
- 11.В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин, А.В.Ковалев [и др.]. Неразрушающий контроль и диагностика. - М.: Машиностроение,2003.-656с.
- 12.Н.П.Алешин Методы акустического контроля металлов-М.: Машиностроение,1989.-456 с.

13. Н.П.Алешин, В.Г.Щербинский Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий.- М.: Высшая школа,1991.-271с.
14. М.Я.Балазовский Ультразвуковая дефектоскопия – М.:МАШГИЗ,1959.- 149с.
15. Н.А.Бунина Устройство для испытания образцов при сложных напряженных состояниях.- Л.ЛНЦНТИ,1989.- 4 с.
16. ГОСТ 27655-88.Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения.
17. В.А.Стрижало, И.Н.Пономаренко, С.И.Лихацкий, В.И.Белогурова Сравнительные испытания аппаратуры для исследования прочности и деформативности материалов методом акустической эмиссии //Проблемы прочности.1985.№ 6.- 98 с.
18. Е.Г.Смирнов, О.В.Букатин, Б.И.Медведев Изучение особенностей выделения акустической эмиссии при пластическом деформировании алюминиевых сплавов // Металлы.1980.№5.
19. С.П.Быков, В.И.Иванов Акустическая эмиссия при росте трещин в вязкоупругом материале//Заводская лаборатория/ 2008.
20. А.В.Титов, Е.Ю.Ремшев, Н.А.Павлов Перспективы применения метода акустической эмиссии в процессах обработки металлов давлением/ Материалы международной научно-технической конференции «Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением» - Санкт-Петербург: БГТУ, 2009 – 172с.



## **Приложение А**

**Разработка методики оценки качества плоских спиральных пружин с отогнутыми зацепами с применением неразрушающих методов контроля.**