

УДК 681.326.74

Контроль технологических и эксплуатационных свойств изделий из титановых сплавов методом акустической эмиссии

Ремшев Е.Ю.*, Данилин Г.А., Титов А.В., Ермоленков П.А.*****

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

имени Д.Ф. Устинова,

ул. 1-я Красноармейская, 1, Санкт-Петербург, 190005, Россия.

**e-mail: remshev@mail.ru*

***e-mail: sapreu@yandex.ru*

****e-mail: sfot96@gmail.com*

Аннотация

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 существующей методики является: оценка релаксационной стойкости выборочной партии пружин; отсутствие возможности прогнозирования релаксационных свойств каждой пружины на длительный срок эксплуатации; значительная трудоемкость и энергозатраты, связанные с осуществлением контроля. Для оценки важнейших показателей по надежности и долговечности, неизменности основных характеристик, а также релаксационной стойкости на длительный период эксплуатации до 25 – 30 лет интерес представляют неразрушающие методы контроля, в том числе метод акустической эмиссии.

Ключевые слова: титановые сплавы, акустическая эмиссия, релаксационной стойкости, тарельчатые пружины.

Для космической индустрии, ракето- и самолётостроения широко используются титановые сплавы. Например, в пассажирском Боинге 777 ~60 т титана, в Аэробусе А380 ~150 т, включая 26 т в двигателях. От 40 до 60% этого металла – российского производства. В процессе исследований анализировали опыт применения титановых сплавов, как в России, так и за рубежом, особенно при производстве тарельчатых пружин, был незначительным. Имелись сведения о производстве винтовых пружин из β -сплавов: [Ti-15V-3Cr-3Al-3Fe] [13], [Ti-11V-11Zr-2Al-2Sn] [14], [Ti-15Mo-3Zn-3Al][15], [Ti-13V-11Cr-3Al] [16] в США и Японии[17,18].

Сплав марки ВТ23 относится к группе высокопрочных титановых сплавов и по классу структуры является $(\alpha + \beta)$ – двухфазным мартенситного класса с коэффициентом β -стабилизации $K_\beta = 0,8$. Для сплавов этой группы характерным является хорошее сочетание прочности, пластичности и вязкости в отожженном состоянии. Их, в большей или меньшей степени, можно подвергать упрочняющей термической обработке [19], эффект которой возрастает по мере увеличения K_β . По этой причине большинство титановых сплавов мартенситного класса используются в промышленности как в отожженном, так и в термически упрочненном состояниях. Обладая высокой прочностью и достаточно хорошей пластичностью и вязкостью, а также способностью к упрочнению, сплавы этой группы, однако, имеют некоторые недостатки. К ним относятся: чувствительность к термическому воздействию;

пониженная термическая стабильность при использовании сплавов в недостаточно стабилизированном состоянии, например, после охлаждения на воздухе с температур отжига; повышенная чувствительность служебных свойств к типу структуры, особенно в термически упрочненном состоянии [17]. Последнее обстоятельство обуславливает чрезвычайную важность правильного выбора режима термической обработки для сплавов этой группы, исходя из конкретного химического состава сплава и требований, предъявляемых условиями дальнейшей эксплуатации изделий из него. Несмотря на некоторые недостатки, титановые сплавы мартенситного класса, к которым относится сплав ВТ23, интересны и перспективны как конструкционный материал, поскольку характеризуются большой удельной прочностью. Благодаря своим свойствам, сплав применяется для изготовления тяжело нагруженных деталей и узлов конструкций, особенно в условиях фрикционного и кавитационного воздействия, в частности в аэрокосмической технике. Так, например, сплав ВТ23 использовался при изготовлении летательного аппарата «Буран». Тарельчатые пружины используются в качестве амортизаторов специальных систем, работающих в агрессивных средах (морская вода и др.).

Актуальной является задача разработки методики прогнозирования эксплуатационных свойств пружин из титановых сплавов с применением неразрушающих методов контроля, в том числе метода акустической эмиссии [22].

Упругие элементы и пружины различного назначения широко применяются в различных механизмах как амортизаторы, накопители энергии и приводы, которые работают в сложных циклических условиях при динамическом и условно

статическом нагружении[1,2]. По конструкции пружины подразделяются на винтовые, спиральные, тарельчатые (Рис.1) и др.

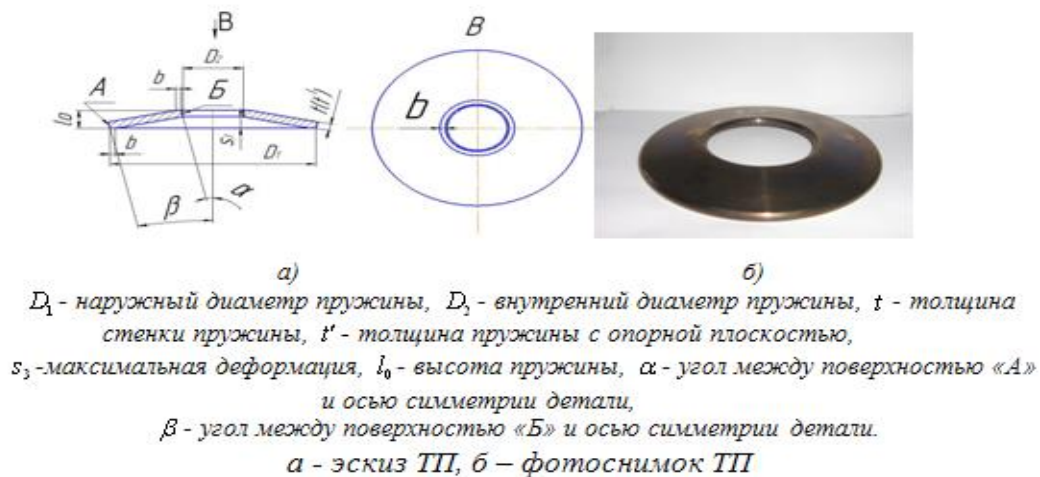


Рисунок 1 – Тарельчатая пружина (объект исследования)

К пружинам ответственных механизмов предъявляются жесткие требования по реализации заданных упругих характеристик, обеспечению прочности, ограничению релаксации в течение длительного срока работы [20]. Эксплуатационные характеристики пружин формируются в процессе технологии их изготовления, которая включает в себя различные виды механической обработки, комплекса термических и контрольных операций [18]. 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 [20, 21]. В настоящее время для изготовления ответственных узлов механизмов и

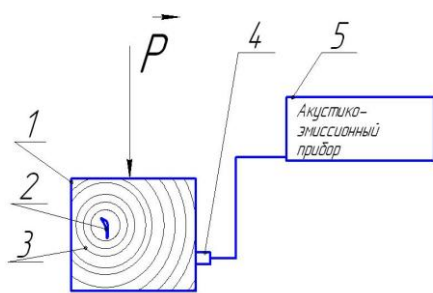
машин применяют титановые сплавы, которые легче по сравнению со сталью обладают высокими прочностными и упругими свойствами, достаточной пластичностью, коррозионной стойкостью, что позволяет существенно повысить характеристики работоспособности элементов машин, в том числе и пружин. Наиболее сложным при изготовлении ТП из титановых сплавов является обоснованный выбор режимов термической обработки и механического нагружения, которые бы формировали оптимальную структуру материала, обеспечивающую высокие прочностные и упругие свойства и минимальную склонность к релаксации. При серийном производстве термическая обработка проводится в проходных печах с защитной эндо атмосферой. К печам такого типа относятся печи модели «Вега» 300/1000.(рис.2). Пружины и заготовки располагаются в печи на сетчатом конвейере. Скорость нагрева выбиралась с учетом обеспечения минимальных затрат времени на нагрев металла, однако при этом не должны возникать термические напряжения, которые при ускоренном нагреве могут вызвать коробление и трещины. Скорость нагрева зависит от теплопроводности сплава, определяемой его химическим составом. Время выдержки должно быть достаточным для сквозного прогрева детали в наибольшем сечении и для полного завершения всех структурно-фазовых превращений. В печи серии Вега временные интервалы, обеспечивающие требуемые условия составляют и определяются скоростью перемещения ленты конвейера и температурой в печи. Например, при проведении рекристаллизационного отжига (температура 750-800°C) время нагрева, выдержки и охлаждения составляет 25-5- 90 минут соответственно.



Рисунок 2 – Проходная печь отжига безокислительного нагрева

(проектирование и производство ООО «Техмаш СПб» г. Санкт-Петербург)

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 акустической эмиссии (АЭ)[3-7], который способен выявлять различные дефекты в изделиях [23-25], находящихся под рабочей нагрузкой и прогнозировать стабильность (или нестабильность) показателей работоспособности, в том числе и склонность к релаксации (Рис.3). 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 3 – Схема регистрации сигналов акустической эмиссии

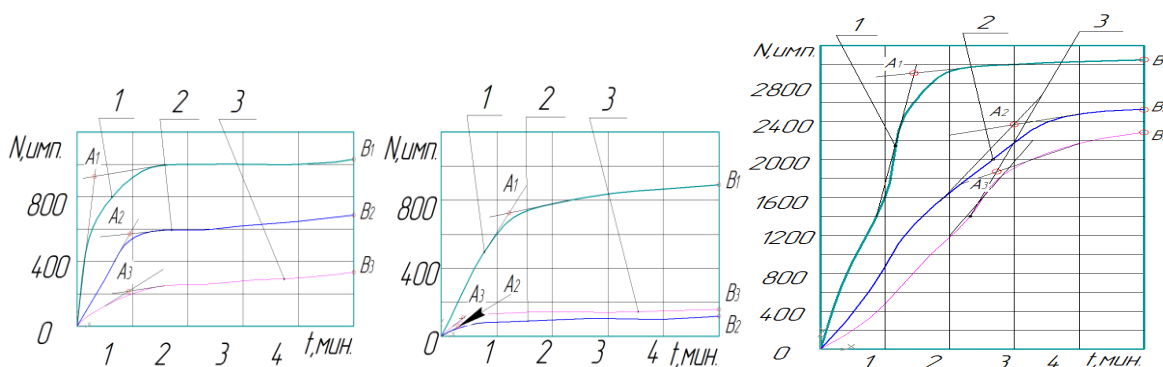
Проведено экспериментального исследования для установления закономерностей между акустической эмиссией, релаксационной стойкостью и микроструктурой ТП (Табл.1). Выполнено экспериментальное исследование ТП: кратковременное обжатие, выдержка при постоянной силе с регистрацией сигналов АЭ, циклические испытания и оценка релаксации, исследование микроструктуры. По результатам кратковременного обжатия с регистрацией сигналов АЭ строились графические зависимости суммарной АЭ от времени обжатия (Рис.4). Введены коэффициенты оценки качества ТП на кратковременном обжатии с регистрацией сигналов АЭ: локально-динамический критерий пружины K_n (указывает на завершенность технологических операций изготовления ТП, для каждой исследованной группы установлены интервалы значений); коэффициент затухания

$$K_{21} = \frac{N_{B2}}{N_{B1}} \text{ (не превышает определенного уровня для каждой группы, мера оценки}$$

микроструктуры сплава пружины).

Таблица 1 – Группы экспериментальных образцов ТП

№ п.п.	№ Группы	Материал	Временное сопротивление σ_s , 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. охлаждения 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. охлаждения 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. охлаждения 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. охлаждения в воде, старение при $t = 450^\circ\text{C}$ 10 часов. Нанесение умышленных дефектов.



а

б

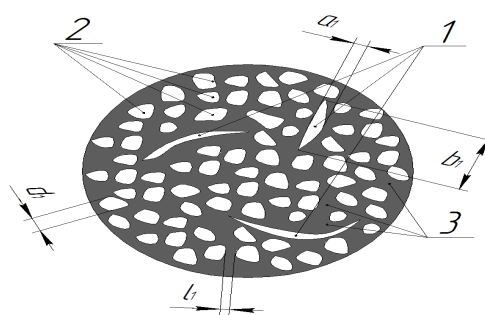
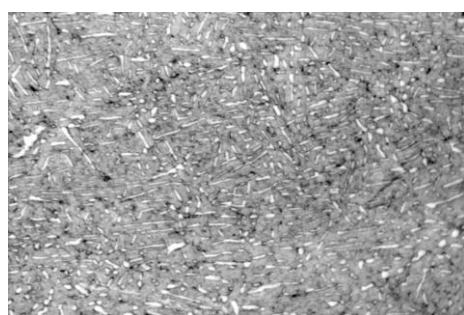
в

а-ТП3-2, б-ТП3-4, в-ТП3-5

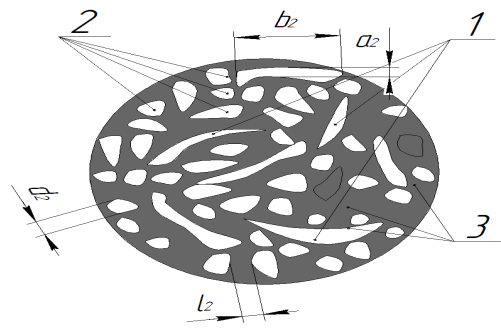
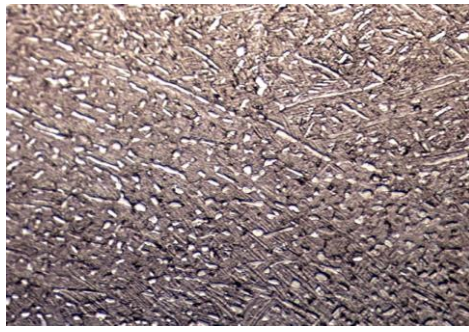
1-первое обжатие, 2 – второе обжатие, 3 – третье обжатие

Рисунок 4 – Зависимости суммарной АЭ (N) от времени (t) в процессе обжата пружин

Коэффициент стабилизации, как правило, $K_{32} < 1$, что вероятно свидетельствует о сформированности однородной микроструктуры и отсутствии предрасположенности к развитию дефектов; коэффициент стабилизации $K_{32} = \frac{N_{B3}}{N_{B2}}$ как правило, < 1 . 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.5). Наиболее оптимальной для ТП с минимальной склонностью к релаксации и низким уровнем сигналов АЭ является микроструктура с дисперсной, умеренной коагулированной вторичной α и β фазой, а наличие первичной α -фазы в сплаве должно быть минимальным и равнонаправленным.



a)



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 5 – Микроструктура ТП группы 3: 1 – первичная α - фаза; 2 – вторичная α - фаза; 3 - β -фаза; a_1, a_2 - ширина пластинок первичной α -фазы; b_1, b_2 - длина пластинок первичной α -фазы; d_1, d_2 - диаметр глобулей вторичной α -фазы; l_1, l_2 - характеристика размера β -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, $N_{пд}$ - пороговое значение уровня сигналов АЭ.

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, принята величина релаксации силы сжатия ТП (R) при деформации $s = 0,2 \cdot s_3$;

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

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

$P_{\text{конеч.}}$ – значение силы сжатия ТП при деформации $s = 0,2 \cdot s_3$, после 9000 циклов в интервале нагрузок 100кН – 160кН.

На основе анализа требований, предъявляемых к ТП, выделены основные факторы, влияющие на релаксацию силы (R). Факторы математической модели: $N_{\text{общ.72}}$ – общее количество импульсов АЭ N в процессе выдержки ТП в течение 72 часов; T – время эксплуатации ТП (эквивалентом которого является C – 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 решения технической задачи прогнозирования релаксационной стойкости ТП из рессорно-пружинной стали и титанового сплава ВТ23 построены 2 двухфакторные математические модели. В качестве математической модели (уравнения регрессии) зависимости параметра от исследуемых факторов (Табл.2) принят полином(2).

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n + b_{n+1} x_1^2 + \dots + b_{2n} x_n^2 + b_{2n+1} x_1 x_2 + \dots + b_{x_{n-1} x_n} \quad (2)$$

Таблица 2 - Исследуемые факторы и уровни

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

варьирования		
---------------------	--	--

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

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

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

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

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.

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 термической обработки (обеспечивающие оптимальную микроструктуру титанового сплава ВТ23 ТП).

Выводы

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 из пружинной стали и титанового сплава 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 на этапе заневоливания в процессе длительного срока эксплуатации.

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.

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».

Библиографический список

1. Данилин Г.А., Титов А.В., Ремшев Е.Ю. Исследование возможностей применения метода акустической эмиссии для контроля качества нагруженных деталей, изготовленных методами штамповки // II Общероссийская молодежная научно-техническая конференция «Молодежь. Техника. Космос». Тезисы докладов. (Санкт-Петербург, 17-19 марта 2010). - СПб: БГТУ, 2010. С.163 - 167.

2. Данилин Г.А., Титов А.В., Ремшев Е.Ю. Методика прогнозирования релаксационной стойкости тарельчатых пружин на основе излучения сигналов акустической эмиссии // Металлообработка. 2011. № 2. С. 17 - 21.
3. Бунина Н.А. Устройство для испытания образцов при сложных напряженных состояниях.- Л.: ЛНЦНТИ, 1989. - 4 с.
4. Стоев П.И., Папиров И.И. Влияние продолжительности отжига на акустическую эмиссию титана // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2006. № 33. С. 95 - 97.
5. Филоненко С.Ф. Влияние свойств обрабатываемого композиционного материала на акустическую эмиссию // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. Т. 2. № 5 (74). С. 60 - 64.
6. Калугина М.С., Ремшев Е.Ю., Данилин Г.А. и др. Комбинированный термоакустический способ модификации структуры титанового сплава // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 185 - 196.
7. Ремшев Е.Ю., Данилин Г.А., Воробьева Г.А., Кузнецов В.В. Исследование влияния аэротермоакустической обработки на структуру и свойства титанового сплава ТС6 // Металлы. 2017. № 1. С. 43 - 48
8. Глазунов С.Г., Колачёв В.А. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. - М.: Металлургия, 1980. – 464 с.
9. Попова Л.Е., Попов А.А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и β -раствора в титановых сплавах. - М.: Металлургия, 1991. – 500 с.

10. Майстров В.М. Формирование структуры высокопрочного сплава ВТ23 при термической обработке и обоснование способов повышения его механических свойств. Автореф. Дисс.канд.техн.наук. - М.: ВИАМ, 1986. – 24 с.
11. Ремшев Е.Ю. Применение метода акустической эмиссии для контроля качества тарельчатых пружин из сплава ВТ23 // *Металлообработка*. 2012. № 4. С. 27 - 33.
12. Chakraborty S. Shaw A. Crack propagation in bi-material system via pseudo-spring smoothed particle hydrodynamics // *International Journal of Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 2014, no. 3, pp. 294 - 301.
13. Li S.J., Cui T.C., Li Y.L., Hao Y.L., Yang R. Ultrafine-grained β -type titanium alloy with nonlinear elasticity and high ductility // *Journal Applied Physics Letters*, 2008, 92, 043128 (2008), doi: 10.1063/1.2839594.
14. Wang Q., Li Z.H., Sun D.L. Compression characteristic and tensile property in an (α + β)-type titanium alloy at high temperature // *Journal Key Engineering Materials*, 2005, no. 297, pp. 1439 - 1445.
15. Yilmazer H., Niinomi M., Cho K., Nakai M., Hieda J., Sato S., Todaka Y. Microstructural evolution of precipitation-hardened β -type titanium alloy through high-pressure torsion // *Journal Acta Materialia*, 2014, no. 80, pp. 172 - 182.
16. Sherman, A.M., Allison J.E. Potential for automotive applications of titanium alloys // *International Congress and Exposition*, 1986, Feb. 24-28, SAE, Warrendale, PA, Paper 860608.
17. Хорев А.И. Титановые сплавы для авиакосмической техники и перспектива их развития // *Авиационные материалы и технологии*. 2002. № 2. С. 11 - 32.

18. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67501>
19. Hamu G.B., Eliezer D., Wagner L., Barel E. The effect of heat treatment and hcf performance on hydrogen trapping mechanism in timental LCB alloy // Journal of Alloys and Compounds, 2009, no. 1-2, pp. 77 - 86.
20. Ostroumov V.P. Effect of shot blasting on, stress relaxation in springs // Journal Metal Science and Heat Treatment, 1965, no. 11, pp. 701 - 702.
21. Dudarev E.F., Pochivalova G.P., Nikitina N.V. Microplastic deformation of polycrystals during cyclic loading // Soviet Physics Journal, 1990, no. 3, pp. 227 - 230.
22. Bogorosh A., Voronov S., Roizman V., Bubulis A., Vyšniauskiene Ž. Defect diagnostics in devices via acoustic emission // Journal of Vibroengineering, 2009, no. 4, pp. 676 – 683.
23. Gheorghies C., Thompson M. Characteristics of acoustic emission signal specific to isolated cracks triggered by scratch tests in stainless steel coatings // Journal of Adhesion Science and Technology, 2008, no. 2, pp. 2003 - 2011.
24. He Y.Y., Zhang X.M., Friswell M.I. Defect diagnosis for rolling element bearings using acoustic emission // Journal of Vibroengineering Acoust, 2009, no. 131, pp. 10.
25. Carpinteri A., Lacidogna G., Niccolini G., Puzzi S. Critical defect size distributions in concrete structures detected by the acoustic emission technique // Journal Meccanica, 2008, no. 43, pp. 349 - 363.