

УДК 539.3:354.2

Прогнозирования долговечности работы трубопроводов высокого давления при воздействии малоцикловых нагрузок

Пхон Хтет Кьяв*, **Сысоев Е.О.****, **Кузнецов Е.А.*****, **Мин Ко Хлайн******

Комсомольский-на-Амуре государственный университет, пр. Ленина, 27,

Комсомольск-на-Амуре, 681013, Россия

**e-mail: phonehtetkyaw18@gmail.com*

***e-mail: fs@knastu.ru*

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

*****e-mail: minkohlaing53@gmail.com*

Статья поступила 19.09.2019

Аннотация

В статье рассматривается методика прогнозирования долговечности трубопроводов при воздействии малоцикловых нагрузок при различных траекториях нагружения в двумерном пространстве напряжений при плоском напряженно-деформированном состоянии с использованием метода акустической эмиссии. Проблема определения долговечности трубопроводов высокого давления зависит от накопления опасных повреждений в конструкционном материале трубопроводов в результате пластических деформаций накопленных от малоцикловых нагружений, которые характеризуются высокими напряжениями, различными формами цикла и траекториям нагружений. Оценка остаточного ресурса действующих трубопроводов в настоящее время базируется на основе последних достижений в области механики разрушения, металловедения, неразрушающих методов контроля, действующих расчетных норм на прочность и

условий фактической эксплуатации. При этом существующие методы не учитывают эволюцию микроструктуры конструкционного материала в реальном времени. Учесть преобразование микроструктуры конструкционного материала в режиме реального времени и спрогнозировать остаточный ресурс позволяет применение метода акустической эмиссии.

Предложенная в статье методика позволяет значительно сократить количество лабораторных испытаний для прогнозирования долговечности трубопроводов высокого давления при воздействии малоцикловых нагрузок при различных траекториях нагружения.

Ключевые слова: долговечность, малоцикловые нагружения, плоское напряженно-деформированное состояние, траектория нагружения, трубопроводы высокого давления, акустическая эмиссия.

Введение

В настоящее время в авиации и машиностроении широко используются трубопроводы высокого давления в гидрогазовых и топливных системах. При изготовлении и эксплуатации машин и механизмов уделяется большое внимание контролю трубопроводов высокого давления изготовленных из высокопрочных нержавеющей сталей, алюминиевых и титановых сплавов. [16,20]. Трубопроводы работают в условиях воздействия малоцикловых нагрузок, от воздействия внутреннего давления, растяжения и кручения, которые оказывают значительное

влияние на их длительную прочность, при различных видах напряженно-деформированного состояния, и формах цикла нагружения. В реальных условиях эксплуатации эти элементы конструкций работают, как при линейном, так и при сложном напряженном состоянии. При этом малоцикловые нагрузки имеют широкий диапазон интенсивности напряжений с различными траекториями нагружений в пространстве напряжений [9,10]. При проектировании возникает сложная задача уменьшить материалоемкость и стоимость изделий, обеспечив при этом прочность и долговечность детали. Для предотвращения аварий конструкций в процессе их проектирования назначают завышенные запасы прочности и, как следствие, увеличивают их материалоемкость и стоимость[1]. Однако при таком подходе не учитываются повреждения микроструктуры материала, и скачкообразное изменение прочностных свойств материала при накоплении повреждений в процессе изготовления и эксплуатации [11,12].

Решение проблемы – это установление качественных и количественных зависимостей изменения микроструктуры материала и длительной прочностью, определяющих долговечность конструкционных материалов и остаточный ресурс эксплуатируемого объекта.

Наиболее подходящим для регистрации этих изменений является метод акустической эмиссии (АЭ) [13-15]. АЭ – отражает все перестроения микроструктуры конструкционных материалов под воздействием любых нагрузок, но при расчетах следует принимать во внимание наиболее информативные сигналы АЭ, от дефектов

которые не залечиваются в дальнейшей эксплуатации, фрактальной размерностью арттрактора сигнала $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$ [3,4].

Методика исследования

Для исследования долговечности деталей, агрегатов и конструкций в строительной лаборатории ФГБУ ВО КнАГУ были выполнены исследования с использованием методики [5-8]. Испытательные образцы из алюминиевого сплава Д20 были выполнены в виде тонкостенных труб с рабочей частью образца $l = 10\text{мм}$, $D = 10\text{мм}$ и толщиной стены $h = 0.5\text{мм}$ (алюминиевые сплавы находят все более широкое применение в авиации). Образцы нагружались по различным траекториям в пространстве напряжений при разных видах напряженно-деформированного состояния и были использованы для получения однородного плосконапряжённого состояния, это дало возможность выявить влияние вида напряженно-деформированного состояния на длительную прочность конструкционных материалов и параметры АЭ.

Комплексная программа позволяет исследовать долговечность конструкционных материалов (рис.1) предусматривает программное малоцикловое нагружение образцов по различным траекториям в условиях плоского напряженного состояния с регистрацией параметров акустической эмиссии в режиме on-line. Процесс нагружения в любой точке деформируемого тела происходил в плоскости двумерного вектора напряжений (рис. 1). Уравнение такой траектории нагружения имеет вид:

$$\vec{S} = S_1 \cdot \vec{i}_1 + S_2 \cdot \vec{i}_2 = S(t), \quad (1)$$

где S_1 и S_2 -компоненты вектора напряжений.

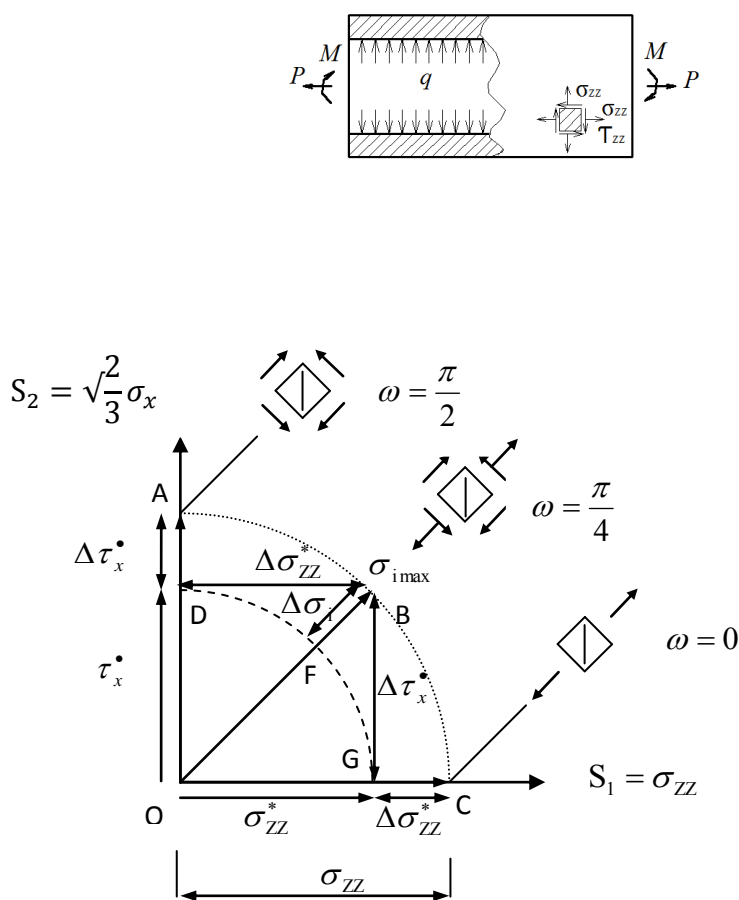


Рис. 1 Траектории циклического нагружения.

Такое напряженное состояние, характеризуемое компонентами тензора напряжений $\sigma_{zz}(t) \neq 0$ и $\tau_x(t) \neq 0$ создавалось в тонкостенном цилиндрическом образце, который подвергался растяжению и внутреннему гидравлическому давлению ($N=N(t)$; $P=P(t)$).

Программа нагружения образца позволяла создавать в конструкционном материале плосконапряженное состояние при пропорциональном виде напряженно-деформированного состояния (по траектории $0 \rightarrow D \leftrightarrow A$, $0 \rightarrow F \leftrightarrow B$, $0 \rightarrow G \leftrightarrow C$ рис.1) и

сложном виде напряженно-деформированного состояния (по траектории $0 \rightarrow G \leftrightarrow B$, $0 \rightarrow D \leftrightarrow B$ рис.1) циклическом нагружении ($\Delta\sigma_i = \sigma_{i\min} \leftrightarrow \sigma_{i\max}$). При этом вектор напряжений $S(t)$ в каждую единицу времени совпадал с вектором $\bar{\sigma}_i(t)$

При проектировании машин и механизмов закладываются значительные запасы прочности, но несмотря на это время от времени происходят аварии. Анализ причин катастроф показывает, что они являются результатом неправильной эксплуатации конструкций, ошибочных решений при сборке конструкций (замена материалов, несоблюдение технологических процессов), а в некоторых случаях ошибок при проектировании. Запасы прочности, закладываемые при проектировании, подчас избыточные, но не учитывают процессов изменения структуры конструкционных материалов на разных уровнях ее эволюции и вызывают неоправданные экономические затраты [21-23]. Более того подавляющее большинство современных конструкций и машин работают под воздействием малоцикловых нагружений в условиях сложного напряженного состояния, когда в процессе эксплуатации происходит активное изменение структуры конструкционных материалов [19,2]. Неконтролируемые изменения микроструктуры конструкционных материалов от воздействия циклических нагрузок приводят к внезапным разрушениям конструкций и механизмов.

Все это показывает необходимость, появления систем мониторинга долговечности при эксплуатации деталей машин и сооружений в реальном времени, что позволит своевременно определять их остаточный ресурс, предотвращая техногенные аварии. Платформой для этих систем может стать метод акустической

эмиссии, так как другие методы (тензометрии и фотограмметрии и т.п.) имеют существенные ограничения по температурным режимам и компактности, и не отслеживают изменение структуры материала в реальном времени.

Акустическая эмиссия возникает по мере приложения к материалу внешних воздействий. При этом происходит динамическое диссипативное изменение структуры материала, порождающее волны упругих колебаний. А любое изменение микроструктуры отражается в изменении параметров сигналов А.Э. (количество и энергия импульсов, их частота и д.р.). Особенно важно, что при воздействии циклических нагрузок, в отличие статических, диссипативные структуры образуются непрерывно и динамично [17,18].

Появление и залечивание дефектов структуры материала, сопровождается излучением АЭ. По количеству, энергии и фрактальной размерности сигналов АЭ можно определить изменения дефектности микроструктуры конструкционных материалов. Скорость деградации структуры конструкционного материала определяет количество дефектов в структуре материала и скорость их накопления от воздействия малоцикловых нагружений, что позволяет спрогнозировать момент разрушения.

**Методика прогнозирования долговечности работы трубопроводов
высокого давления при воздействии малоцикловых нагрузок с использованием
параметров акустической эмиссии**

В результате поставленных экспериментов получены зависимости для сплава Д20 и определена взаимосвязь времени до разрушения от интенсивности

циклических напряжений при траектории $\omega^* = \alpha = 0$ и $\omega^* = \frac{\pi}{2}$ (Рис. 2).

Направление вектора напряжений в любое время цикла изменения интенсивности напряжений определялось по формуле:

$$\omega(t) = \arctg \frac{\operatorname{tg} \omega^* + \frac{\Delta \sigma_i(t) \sin \alpha}{\sigma_i^* \cos \omega^*}}{1 + \frac{\Delta \sigma_i(t) \cos \alpha}{\sigma_i^* \cos \omega^*}}$$

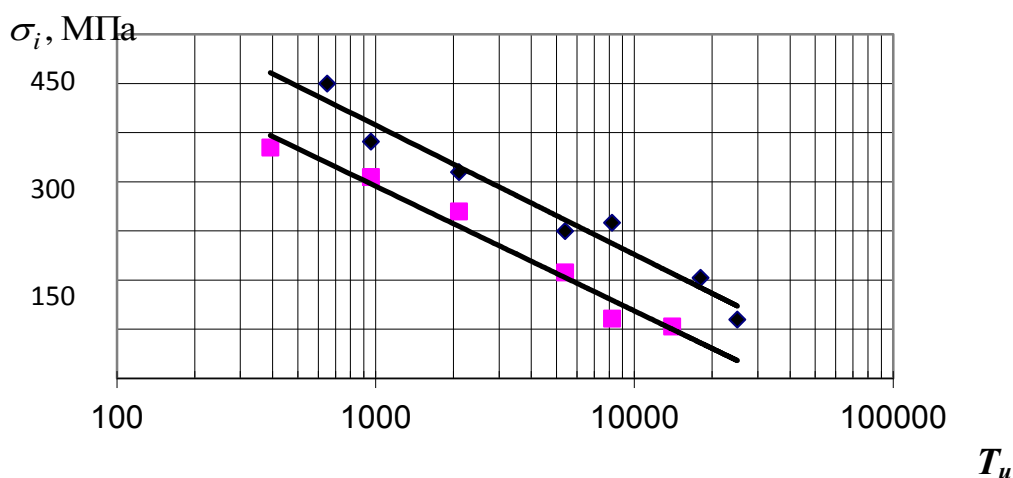


Рис.2 Влияние вида напряженно-деформированного состояния на времена до разрушения образца для сплава Д20 - ♦ при $\omega^* = \alpha = 0$; ■ при $\omega^* = \frac{\pi}{2}$.

Пространство между кривыми на рисунке 1 есть геометрическое место точек долговечности конструкционных материалов при любой траектории ($\omega^* = 0 \div \frac{\pi}{2}$) программного нагружения в рамках заданного диапазона интенсивности напряжений.

Нагрузки, при проведении экспериментов прикладывались по различным формам цикла нагружения, и характеризовались уравнением:

$$\bar{\gamma}_{\Pi_I} + \bar{\bar{\gamma}}_{\Pi_I} + \tilde{\gamma}_{\Pi_I} = 1$$

где: $\gamma_{\Pi_I} = \frac{\bar{t}_u}{t_u}$; $\bar{\gamma}_{\Pi_I} = \frac{\bar{\bar{t}}_u}{t_u}$; $\tilde{\gamma}_{\Pi_I} = \frac{\tilde{t}_u^I + \tilde{t}_u^{II}}{t_u}$ — соответственно относительное время

пребывания образца при минимальном значении напряжении цикла ($\bar{\bar{\gamma}}_{\Pi_I}$),

максимальном значении напряжении цикла за цикл нагружения (γ_{Π_I}) и переменных

значениях напряжения цикла ($\tilde{\gamma}_{\Pi_I}$). Асимметрия цикла нагружения составляла

$R=1/2$. Проведение таких экспериментов – процесс длительный, трудоемкий и

дорогостоящий, поскольку используются традиционные статистические методы.

Для получения результатов представленных в данной статье было поставлено более

70 экспериментов, а в обработку было принято только 40, остальные по разным

причинам были отклонены.

Относительные долговечности работы материала определялись по формуле:

$$D(\gamma, \omega) = \frac{N_{D2\max I}(\gamma, \omega)}{\dot{N}_{D2\min i}(\gamma, \omega)};$$

где $N_{D2\Delta t_u}$ – количество акустических сигналов с фрактальной размерностью аттрактора $1 \leq D_{2\text{ аттр.}} \leq 6$ на установившемся участке циклической ползучести Δt_u

– единица времени. $N_{D2\max I}(\gamma, \omega)$ – количество акустических сигналов с

фрактальной размерностью аттрактора $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$ в первом цикле нагружения при $\sigma_{i \text{ max}}$.

Интенсивность скорости счета акустических сигналов с фрактальной размерностью аттрактора $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$ находится по формуле:

$$\dot{N}_{D2}(\gamma, \omega) = \frac{N_{D2\Delta t}}{\Delta T};$$

В результате были получены относительные долговечности работы алюминиевого сплава Д20 при воздействии малоцикловых напряжений в диапазоне от $\sigma_{i \text{ min}} = 200 \text{ МПа}$ до $\sigma_{i \text{ max}} = 400 \text{ МПа}$ при различных формах цикла нагружений и траектории в пространстве напряжений (табл. 1).

Таблица 1

Траектория нагружения	$D(\gamma, \omega)$, при				
	$\bar{\gamma}_{\sigma i} = 1$	$\tilde{\gamma}_{\sigma i} + \bar{\gamma}_{\sigma i} = 1$	$\check{\gamma}_{\sigma i} = 1$	$\tilde{\gamma}_{\sigma i} + \bar{\bar{\gamma}}_{\sigma i} = 1$	$\bar{\bar{\gamma}}_{\sigma i} = 1$
$\omega_s = 0, \chi_\sigma = -1$	1	0,44	0,38	0,0194	0,21
$\omega_s = \frac{\pi}{2}, \chi_\sigma = 0$	0,24	0,18	0,14	0,04	0,03

χ_σ - параметр Надои-Лоде, ω_s - направление вектора напряжений

По данным таблицы 1 была построена диаграмма относительной долговечности алюминиевого сплава Д20 от воздействия малоцикловых напряжений $\sigma_{i \text{ min}} = 200 \text{ МПа}$ и $\Delta\sigma = 200 \text{ МПа}$ при различных формах цикла нагружений и траектории в пространстве напряжений при плосконапряженном состоянии.

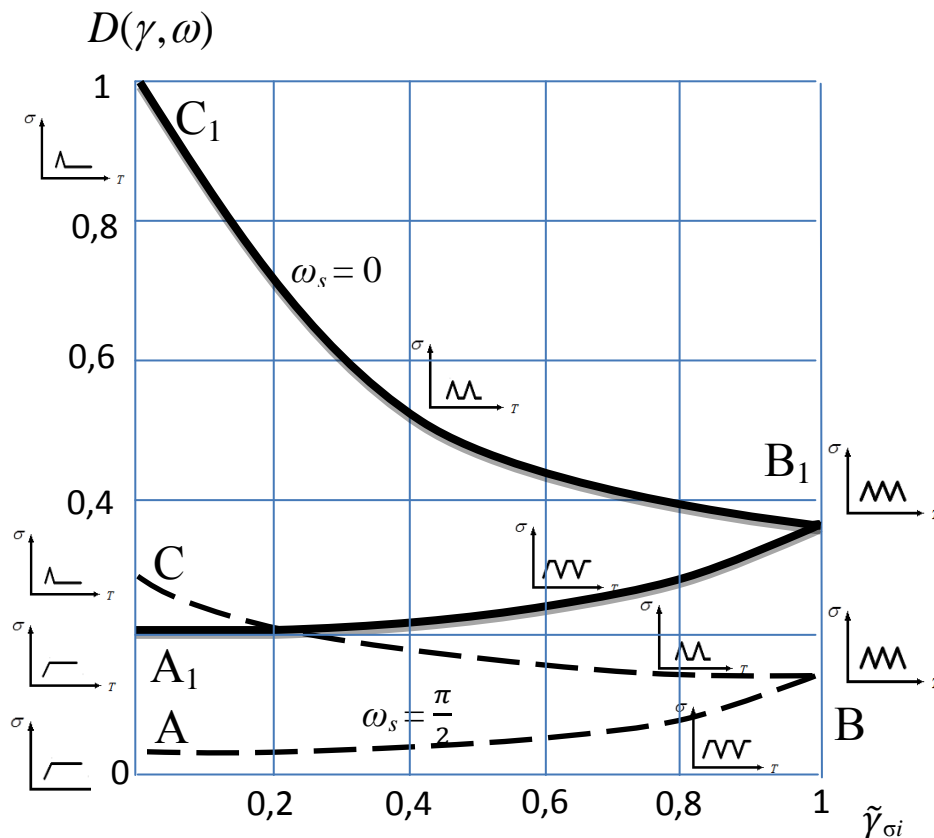


Рис. 3 Зависимость долговечности сплава Д20 от программы и траектории нагружения.

На рис 3 показано влияние программы изменения интенсивности напряжений и сложности траектории нагружения на относительную долговечность материала при любых сочетаниях ω^* , α и формах цикла изменения интенсивности напряжений по отношению к таковым в условиях $\sigma_{i\min} = const$. Если значение расчетной долговечности $D(\gamma, \omega)$ находится в пределах зоны А, В, С при $\omega_s = \pi/2$ и A_1, B_1, C_1 при $\omega_s = 0$ то мы с высокой степенью достоверности можем прогнозировать остаточный ресурс трубопровода. При этом количество экспериментов сокращается на порядок, так как для построения диаграммы подобной рис. 3 требуются значения

в точках A, B, C, A_1, B_1, C_1 , что значительно упрощает задачу прогнозирования долговечности работы трубопроводов высокого давления.

Заключение

Использование предложенной методики значительно упрощает прогнозирование долговечности работы трубопроводов высокого давления при воздействии малоцикловых нагрузок по сравнению с методом тензометрии и другими методами неразрушающего контроля, а также позволяет контролировать состояние трубопроводов в режиме on-line.

Библиографический список:

1. Серьёзов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В. и др. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии. - М.: Машиностроение, 2004. - 368 с.
2. Семашко Н.А., Шпорт В.И., Марьин Б.Н. и др. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. - М.: Машиностроение, 2002. - 240 с.
3. Сысоев О.Е., Биленко С.В. Определение предельных состояний конструкционных материалов с использованием методов нелинейной динамики. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – 150 с.
4. Sysoev O.E., Kolykhalov D.G., Kuznetsov E.A., Belykh S.V. Forecasting Durability and Cyclic Strength of Aluminum Alloy AA2219 Using Fractal Analysis of Acoustic Emission // IV Sino-Russian ASRTU Symposium on Advanced Materials and Materials and Processing Technology, 2016, KnE Materials Science, pp. 161 - 167. DOI 10.18502/kms.v1i1.579.

5. Сысоев О.Е., Биленко С.В. Идентификация процессов изменения структуры конструкционных материалов на основе фрактального анализа акустической эмиссии // Ученые записки КнАГТУ. 2012. № 3. С. 107 - 115.
6. Phone Htet Kyaw, Sysoyev O.E, Kuznetsov E.A, Marin B.N. Regularities of Changes in the Fractal Dimension of Acoustic Emission Signals in the Stages Close to the Destruction of Structural Materials When Exposed to Low-Cycle Loaded // ICTTE 2018, Conference Paper, December 2018, pp. 213 - 217. DOI: [10.1145/3321619.3321685](https://doi.org/10.1145/3321619.3321685)
7. Сысоев О.Е., Кузнецов Е.А., Куриный В.В. Современные испытательные стенды для исследования конструкционных материалов при малоцикловых нагрузках в условиях сложного напряженного состояния с учетом параметров акустической эмиссии // Ученые записки КнАГТУ. 2012. № 1. С. 106 - 112.
8. Sysoev O.E. New Ideas for Monitoring the Steel Structures of Buildings and Surface facilities in the Extreme Limit State // Journal of shenyang jianzhu university, 2011, vol. 27, no. 6, pp. 1099 – 1102.
9. Кузнецов Е.А., Сысоев О.Е., Колыхалов Д.Г. Прогнозирование предельных состояний трубопроводов высокого давления гидрогазовых систем на этапе ввода в эксплуатацию // Труды МАИ. 2016. № 88. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=70409>
10. Колыхалов Д.Г., Сысоев О.Е., Иванов И.Н. Оценка технологичности трубопроводных систем летательных аппаратов на ранних стадиях проектирования // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74709>

11. Bashkov O.V., Popkova A.A., Bashkova T.I., Sharkeev Yu.P. The study of staging of the fatigue damage accumulation in the structured titanium samples by acoustic emission method // Tsvetnye Metally, 2017, vol. 9, pp. 84-90. DOI: 10.17580/tsm.2017.09.12
12. Bashkov O.V., Popkova A.A., Sharkeev Yu.P., Panin S.V., and Eroshenko A.Yu. Acoustic emission analysis of fatigue damages of titanium alloys // AIP Conference Proceedings 1909, 020012, 2017. DOI: [10.1063/1.5013693](https://doi.org/10.1063/1.5013693)
13. Рыбаулин А.Г., Сидоренко А.С. Исследование локального напряженного состояния и оценка долговечности конструкции авиационного изделия с дискретными сварными соединениями при случайном нагружении // Труды МАИ. 2015. № 79. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=55786>
14. Маслов Г.А., Лапушкин В.Н. Метод статистической обработки случайного вибрационного процесса при экспериментальной отработке летательных аппаратов // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=56918>
15. Ибрагимов А.А. Методы прогнозирования долговечности трубопроводов с учётом коррозии и переменных напряжений. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 76 с.
16. Lee C.K., Scholey J.J., Wilcox P.D., Wisnom M.R., Friswell M.I., Drinkwater B.W. 'Guided Wave Acoustic Emission from Fatigue crack growth in Aluminium Plate' // Advanced Material Research, 2006, vol. 13 - 14, pp 23 - 28.
17. Степанова Л.Н., Бобров А.Л., Канифадин К.В., Чернова В.В. Исследование основных параметров сигналов акустической эмиссии при статических и

циклических испытаниях образцов из стали 20гп. // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 6. С. 41 - 45.

18. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н. Применение метода акустической эмиссии при прочностных испытаниях элементов авиационных конструкций // Полет. 2004. № 3. С. 3 - 7.

19. Марьин Б.Н. Изготовление трубопроводов гидрогазовых систем летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1988. – 400 с.

20. 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=65216>

21. Полоник Е.Н., Суренский Е.А., Федотов А.А. Автоматизация расчетов усталостной долговечности элементов авиаконструкций с геометрическими концентраторами напряжений // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67799>

22. Шакиртов М.М. О влиянии коэффициента асимметрии цикла внешней нагрузки на характеристики цикла нагружения материала при вершине трещиновидного дефекта // Труды МАИ. 2016. № 89. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=72589>

23. Хохлов А.В. Кривые длительной прочности, порождаемые линейной теорией вязкоупругости в сочетании с критериями разрушения, учитывающими историю деформирования // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75559>