

## **Прогнозирование длительной прочности фасонных деталей гидрогазовых систем по параметрам акустической эмиссии**

**Пхон Хтет Кьяв\***, **Сысоев Е.О.\*\***, **Кузнецов Е.А.\*\*\***, **Сысоев О.Е\*\*\*\***

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

*Комсомольск-на-Амуре, 681013, Россия*

*\*e-mail: [phonehtetkyaw18@gmail.com](mailto:phonehtetkyaw18@gmail.com)*

*\*\*e-mail: [fks@knastu.ru](mailto:fks@knastu.ru)*

*\*\*\*e-mail: [workegor@mail.ru](mailto:workegor@mail.ru)*

*\*\*\*\*e-mail: [fks@knastu.ru](mailto:fks@knastu.ru)*

***Статья поступила 27.01.2020***

### **Аннотация**

В статье рассматривается методика прогнозирования прочности фасонных деталей гидрогазовых систем по параметрам акустической эмиссии (АЭ). При деформировании конструкционного материала в процессе изготовления, по различным траекториям в двумерном пространстве деформаций при плоском напряженно-деформированном состоянии, когда в заготовке детали накапливаются повреждения, которые влияют на ее прочность и долговечность. Определение прочности фасонных деталей гидрогазовых систем зависит от механических характеристик конструкционных материалов, способов деформирования и является сложной задачей, так как дефекты накопленные каждой деталью индивидуальны. В статье показан процесс изменения микроструктуры алюминиевых сплавов в процессе деформирования. Изучено прогнозирование долговечности деталей выполненных

путём обработки давлением и получена устойчивая зависимость определения времени до разрушения для сплава Д16 по параметрам акустической эмиссии с фрактальной размерностью аттрактора акустических сигналов  $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$ , от воздействия напряжений внутреннего давления при изготовлении деталей методом обработки давлением.

**Ключевые слова:** фасонные части трубопроводов, раздача трубы, акустическая эмиссия, напряженно-деформированное состояние, гидрогазовая система.

### **Введение**

В авиационной промышленности и машиностроении широко используются трубопроводы высокого давления для гидрогазовых систем. Фасонные части трубопроводов высокого давления (Рис.1) изготавливаются путем обработки давлением конструкционных материалов изготовленных из высокопрочных нержавеющей сталей, алюминиевых и титановых сплавов [1-3].

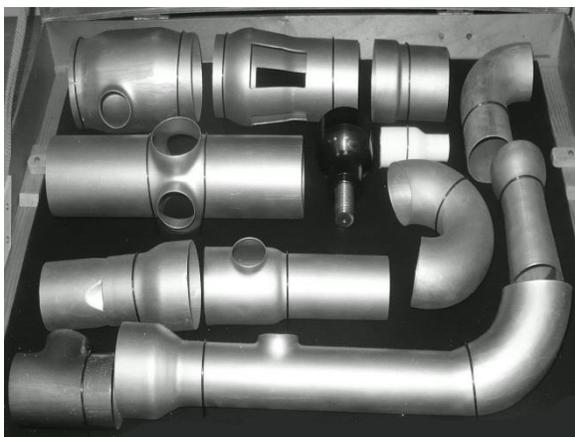


Рис. 1. Фасонные части трубопроводов гидрогазовых систем.

Формообразование деталей приводит к появлению различных дефектов в конструкционном материале, которые оказывают значительное влияние на длительную прочность изделий [4,14]. В расчетах на прочность при одновременном воздействии сил внутреннего давления, растяжения, кручения на трубопроводы, в основном учитывают механические характеристики материалов, которые получены при простейших нагружениях, но не учитываются индивидуальные дефекты полученные при изготовлении деталей гидрогазовых систем [5,6]. Поэтому возникает необходимость в проведении исследований и разработке методик учитывающих не только механические характеристики материалов при сложном напряжённом состоянии, но и эволюционные процессы, происходящие в микроструктуре материала на микроуровне при изготовлении конструкций [7].

Чтобы учитывать динамику микропроцессов, изменения микроструктуры конструкционных материалов в процессе изготовления деталей методом обработки давлением, предлагается использовать метод акустической эмиссии (АЭ).

Акустическая эмиссия возникает в материале, находящимся под механическим напряжением, от освобождения энергии в результате микро- и макроскопических явлений вызванных локальной динамической перестройкой внутренней структуры материала [13]. По мере приложения к конструкционному материалу нагружающей силы на начальном этапе происходят смещения атомов и уплотнение несплошностей материала, затем увеличение количества, сгущение и хаос первичных дислокаций, далее образуются дислокационные петли, геликоидальные дислокации. В ходе дальнейших испытаний наблюдается замыкание клубков, в результате чего формируется новый тип ДСС - ячеистая субструктура. Ячеистая субструктура является существенно неоднородной в масштабах, соизмеримых с линейными размерами ячейки. Основная часть дислокаций в этой субструктуре находится в стенках ячеек. Плотность дислокаций внутри ячеек намного ниже [15,16].

В сформированной ячеистой структуре плотность дислокаций в стенках и внутри ячеек может различаться приблизительно в 10 раз. В монокристаллах ячеистая субструктура анизотропна. Дислокационные стенки ячеек часто удлинены вдоль определенных направлений, чаще плотноупакованных. Стенки ячеек в алюминии состоят из про взаимодействовавших дислокаций и дислокационных петель. При дальнейшем нагружении, появляются разориентировки на границах ячеек, т.е. формируется разориентированная ячеистая или субзеренная субструктура (Рис. 2).

По мере этих превращений происходит излучение сигналов АЭ соответствующей частоты и амплитуды, имеющих индивидуальную фрактальную размерность в соответствии со стадией эволюции микроструктуры [9,22].

Таким образом, любое изменение структуры материала при сложном напряженном состоянии, появление и залечивание дефектов сопровождается излучением АЭ. То есть по количеству и энергии сигналов АЭ можно определить стадию деградации структуры конструкционного материала [8,20].

При эксплуатации машин и механизмов уделяется большое внимание контролю трубопроводов высокого давления. Они работают в условиях воздействия различных видах напряженно-деформированного состояния[17,21].

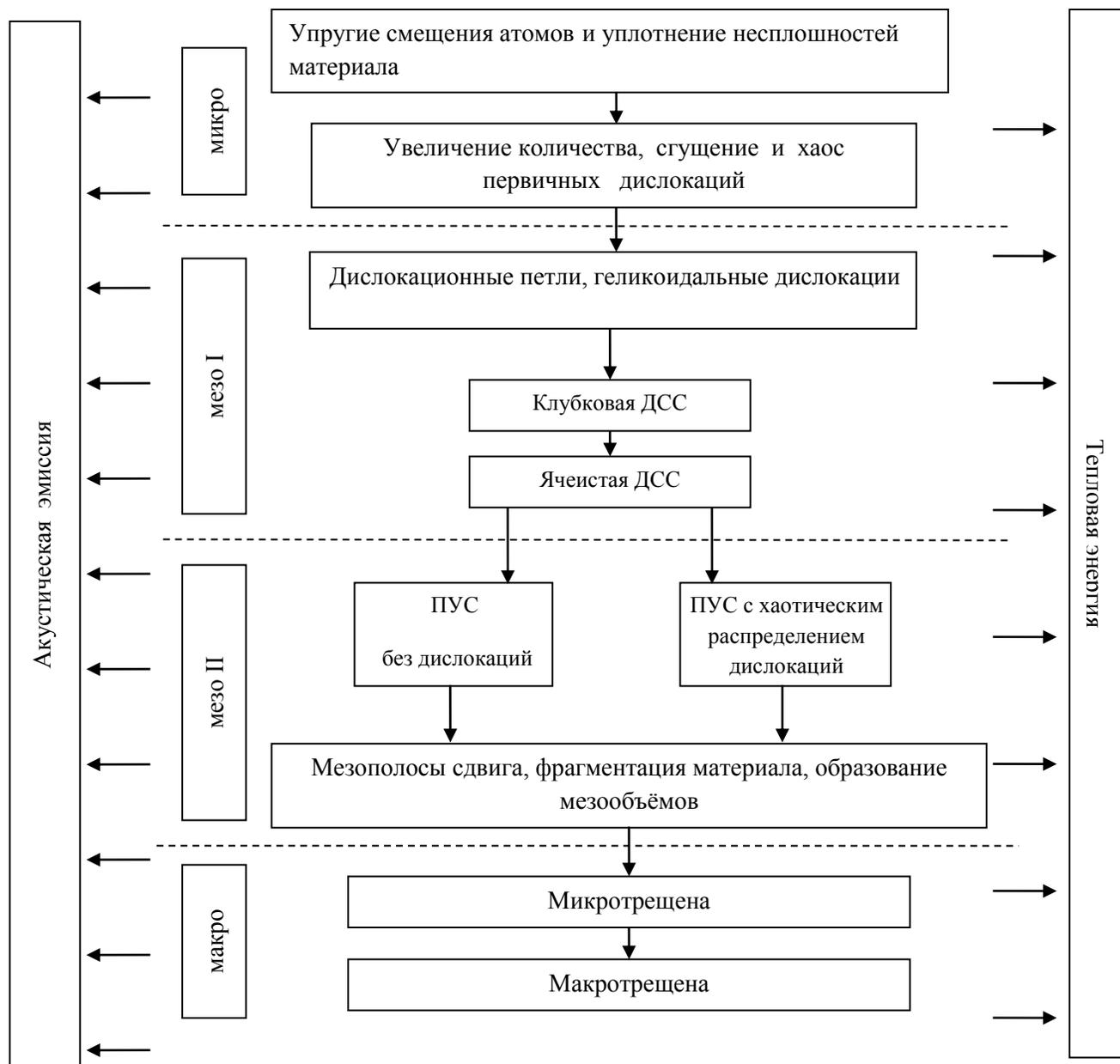


Рис. 2. Схема превращения микроструктуры алюминиевых сплавов

### Методика исследования

Для моделирования работы конструкционных материалов от воздействия нагрузений по параметрам АЭ, на базе Комсомольского-на-Амуре государственного университета были проведены испытания трубчатых образцов  $L = 63\text{мм}$ ,  $D = 31\text{мм}$  и

толщиной стены  $h = 1$  мм из сплава Д16. Испытания проводились на испытательной машине ОМД-3 (Рис 3,4) с использованием оригинального программного обеспечения. Для получения заготовки фасонной части трубопровода использовался штамп, соответствующий диаметру трубы.



Рис. 3. Установка для изготовления деталей обработкой давлением

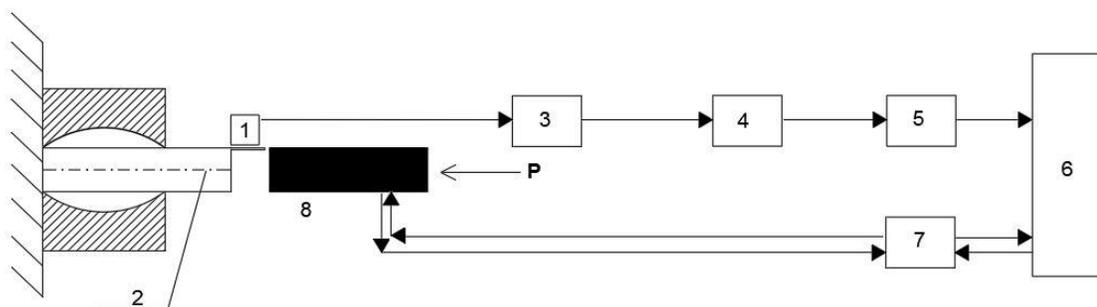


Рис.4. Блок схема регистрации сигналов акустической эмиссии.

1-пьезоэлектрическим датчиком; 2-образец; 3-предварительным усилителем акустических сигналов; 4-аналоговоцифровой преобразователь; 5- Программное

обеспечение; 6-системный блок ЭВМ; 7 – АЦП для программного управления скоростью деформирования образца; 8 – рабочее тело для раздачи полых и трубчатых заготовок

Штамп состоит из разъемной матрицы, установленной в жестком корпусе, наружной обоймы, пуансона. В матрице размещалась трубчатая заготовка (рис. 5а), внутри которой находится рабочее тело. Наверху на стенке трубчатой заготовки размещен датчик, с помощью которого регистрировались сигналы АЭ.

Штамп работает следующим образом. Посредством перемещения ползуна прессы с усилием  $P$  перемещается пуансон. От пуансона усилие  $P$  передается через рабочее тело в зону деформирования трубчатой заготовки, в результате чего происходит раздача трубы. Затем пуансон поднимают вверх, производят разборку матрицы и выемку готовой детали (рис. 5 б), с рабочим телом.



Рис. 5. Испытательные образцы из алюминиевого сплава Д16: а) образцы до проведения эксперимента, б) деформированные образцы в) разрушенные при деформировании образцы.

Комплексная программа проведения экспериментов, позволяет исследовать долговечность конструкционных материалов при деформировании 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. 6, 7) [10-12]. 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.

$$S_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_y, \quad S_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_x - \frac{1}{\sqrt{6}} \sigma_y;$$

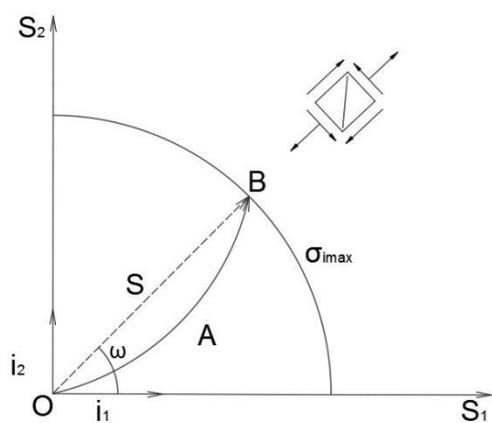


Рис.6. Траектория нагружения

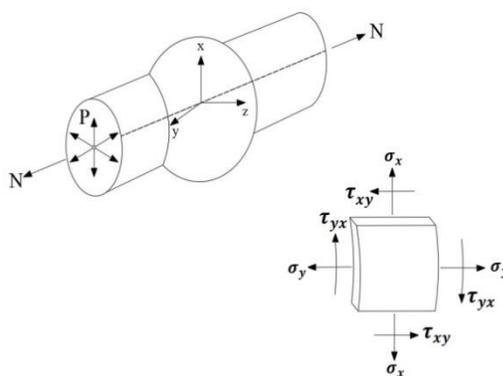


Рис.7. Схема напряжений

Такое напряженное состояние, характеризуемое компонентами тензора напряжений  $\sigma_z(t) \neq 0$  и  $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx}(t) \neq 0$  создавалось в тонкостенном образце, который подвергался растяжению и внутреннему гидравлическому давлению ( $N=N(t)$ ;  $P=P(t)$ ).

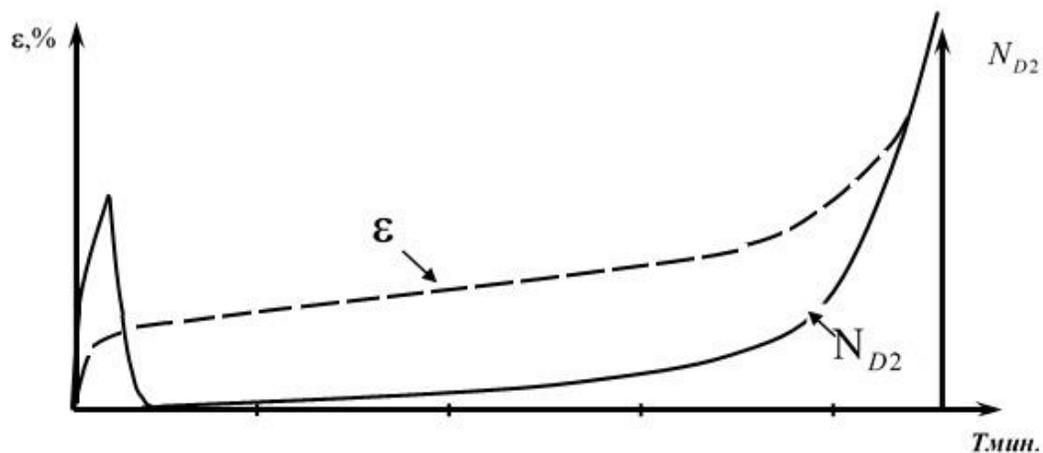


Рис.8. График (-----) ползучести конструкционного материала, График (—) параметров сигналов акустической эмиссии в соответствующий момент времени в зависимости от деформации; где  $\varepsilon$  – деформация образца %,  $T$  – время до разрушения мин.,  $N_{D2}$  – количество сигналов с фрактальной размерностью  $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$  в секунду.

### Определение времени до разрушения деталей с использованием параметров акустической эмиссии при внутреннем давлении

Прогнозирование сроков службы деталей и конструкций по параметрам АЭ в процессе эксплуатации возможно по минимальной интенсивности скорости счета акустических сигналов с фрактальной размерностью аттрактора  $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$ , на установившемся участке кривой ползучести[18,19].

$$\text{При } 0 \leq \omega \leq \frac{\pi}{2} \quad \dot{N}_{D2 \text{ мин } I}(\omega) = \frac{\dot{N}_{D2}(\omega)}{\dot{N}_{D2 \text{ макс } I}(\omega)} \quad (2)$$

где:  $\dot{N}_{D_2}(\omega)$  - скорость счета сигналов АЭ с фрактальной размерностью аттрактора  $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$ ;  $N_{D_{2 \text{ макс } I}}(\omega)$  - количество акустических сигналов с фрактальной размерностью аттрактора  $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$  при формообразовании детали путём обработки давлением нагружения при  $\sigma_{i \text{ макс}}$ .

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

$$\dot{N}_{D_2}(\omega) = \frac{N_{D_2}}{\Delta T}; \quad (3)$$

Где  $N_{D_2}$  - количество акустических сигналов с фрактальной размерностью аттрактора  $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$  на установившемся участке ползучести (рис. 8);  $\Delta T$  - единица времени.

Можно отметить, что минимальная интенсивность скорости счета акустических сигналов  $\dot{N}_{D_{2 \text{ мин } i}}(\omega)$  тесно связана с временем до разрушения конструкционного материала уравнением:

$$N_{D_{2 \text{ макс } I}}(\omega) = t_p \cdot \dot{N}_{D_{2 \text{ мин } i}}(\omega); \quad (4)$$

Произведение времени  $t_i(\omega)$  нахождения материала под нагрузкой  $\sigma_i(\omega)$  на минимальную интенсивность скорости счета акустических сигналов  $\dot{N}_{D_{2 \text{ мин } i}}(\omega)$  приведет к достижению количества АЭ за нагружению равным, количеству в нагружении  $N_{D_{2 \text{ макс } I}}(\omega)$  при  $\sigma_{i \text{ макс}}$  и разрушению материала.

Тогда:

$$t_p = \frac{N_{D2max I}(\omega)}{N_{D2mini}(\omega)} \cdot 100\%; \quad (5)$$

Т.е. время до разрушения определяется степенью повреждения материала. Следовательно, выявление зависимостей минимальной интенсивности скорости счета сигналов АЭ  $\dot{N}_{D2mini}(\omega)$  от траектории нагружения получает важное значение.

По результатам проведенных экспериментов получена зависимость времени до разрушения для сплава Д16 от минимальной интенсивности скорости счета сигналов АЭ (рис.9).

$\dot{N}_{D2mini}$

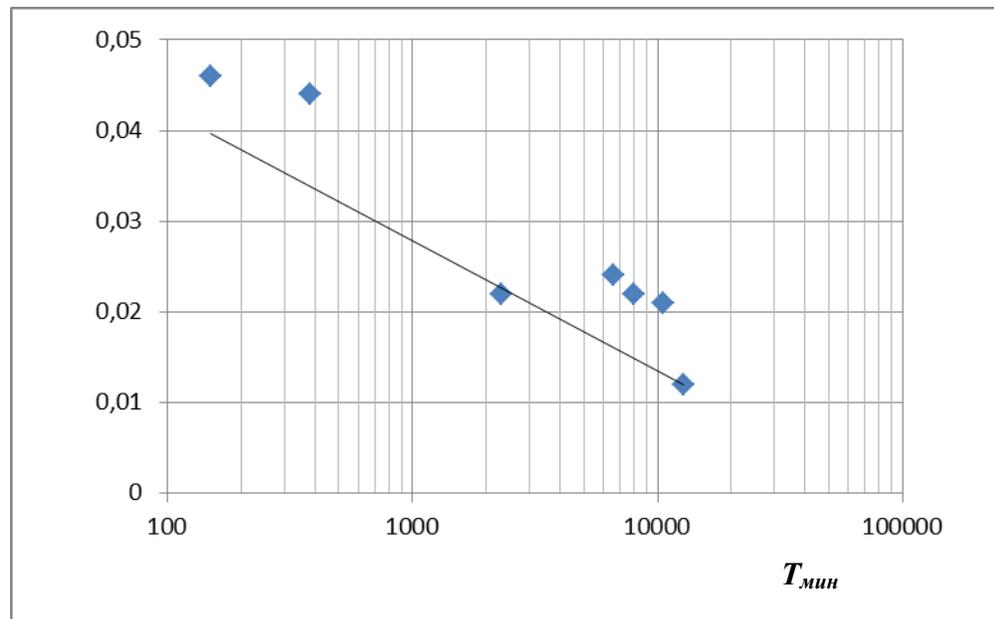


Рис.9. Зависимость времени до разрушения для сплава Д16 от минимальной интенсивности скорости счета сигналов АЭ при внутреннем давлении.

## **Заключение**

Таким образом получена устойчивая зависимость определения времени до разрушения для сплава Д16 по параметрам акустической эмиссии полученных от воздействия напряжений внутреннего давления при изготовлении деталей методом обработки давлением, что позволяет прогнозировать долговечность деталей и конструкций гидрогазовых систем.

## **Библиографический список**

1. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.
2. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
3. Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. - М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 403 с.
4. Серьёзов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В. и др. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии - М.: Машиностроение, 2004. - 368 с.
5. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. - Киев: Наукова думка, 1976. - 394 с.
6. 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, September 2017, no. 9, pp. 84 – 90. DOI: 10.17580/tsm.2017.09.12.

7. Семашко Н.А., Шпорт В.И., Марьин Б.Н. и др. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении - М.: Машиностроение, 2002. 240 с.

8. 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.

9. Bashkov O.V., Popkova A.A., Sharkeev Yu.P., Panin S.V., Eroshenko A.Yu. Acoustic emission analysis of fatigue damages of titanium alloys // AIP Conference Proceedings 1909, 2017. DOI: 10.1063/1.5013693.

10. Пхон Хтет Кьяв., Сысоев Е.О., Кузнецов Е.А., Мин ко Хлайнг. Прогнозирования долговечности работы трубопроводов высокого давления при воздействии малоцикловых нагрузок // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=109237>

11. Phone Htet kyaw, Sysoev 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 // Proceedings of the Asia-Pacific Conference on Intelligent Medical 2018 & International Conference on Transportation and Traffic Engineering, ICTTE 2018, 2018, pp. 213 – 217. DOI: [10.1145/3321619.3321685](https://doi.org/10.1145/3321619.3321685)

12. Tomasz Tomaszewski, Janusz Sempruch. Fatigue life prediction of aluminium profiles for mechanical engineering // Journal of theoretical and applied mechanics, 2017, no. 55 (2), pp. 497 – 507. DOI: [10.15632/jtam-pl.55.2.497](https://doi.org/10.15632/jtam-pl.55.2.497).
13. Orynyak I.V., Ageev S. M. Calculation of reference stresses for circumferential irregular-shaped defects in pipes // Strength of Materials, 2011, vol. 43, no. 6, pp. 673 – 686. DOI: [10.1007/s11223-011-9340-7](https://doi.org/10.1007/s11223-011-9340-7)
14. Колыхалов Д.Г., Сысоев О.Е., Иванов И.Н. Оценка технологичности трубопроводных систем летательных аппаратов на ранних этапах проектирования // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74709>
15. Башков О.В., Ким В.А., Гадоев Г.А. Исследование процесса образования трещин на ранних стадиях их развития в алюминиевом сплаве 1163 // Международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению»: Сборник трудов. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2018. С. 21 - 26.
16. Y.J. Kim, C.K. Oh, C.Y. Park, K. Hasegawa. Net-section limit load approach for failure strength estimates of pipes with local wall thinning // International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006, no. 83, pp. 546 – 555. DOI: [10.1016/j.ijpvp.2006.03.001](https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2006.03.001)
17. 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>

18. 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>
19. 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>
20. 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>
21. 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>
22. C.K. Lee, J.J. Scholey, P.D. Wilcox, M.R. Wisnom, M.I. Friswell, B.W. Drinkwater. Guided Wave Acoustic Emission from Fatigue crack growth in Aluminium Plate' // Advanced Material Research, 2006, vol. 13 - 14, pp. 23 - 28.