

Прогнозирование предельных состояний трубопроводов высокого давления гидрогазовых систем на этапе ввода в эксплуатацию

Кузнецов Е.А.*, Сысоев О.Е.***, Колыхалов Д.Г.***

*Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, проспект
Ленина, 27, г. Комсомольск-на-Амуре, 681013, Россия*

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

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

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

Аннотация

В статье рассматривается проблема прогнозирования долговечности трубопроводов гидрогазовых систем летательных аппаратов, а также поиска критериев, учитывающих механические характеристики материалов при сложном напряженном состоянии. Рассмотрено решение данной проблемы с учетом использования методов акустической эмиссии при различных траекториях циклического нагружения. Установлено, что долговечность материала зависит от формы и параметров циклов изменения интенсивности напряжений, а также от вида напряженно-деформированного состояния. Выявлена зависимость минимальной интенсивности скорости счета сигналов акустической эмиссии от траектории нагружения. Сделан вывод о высокой степени достоверности прогнозирования долговечности трубопроводов летательных аппаратов на начальных этапах эксплуатации при сравнительно небольшом числе предварительных экспериментов.

Ключевые слова: долговечность, конструкционные материалы, циклические нагружения, траектории нагружений.

Введение

При изготовлении и эксплуатации трубопроводов гидрогазовых систем высокого давления различного диаметра в авиа-и ракетостроении, существует проблема прогнозирования безопасных сроков их службы. При этом трубопроводы высокого давления испытывают циклические воздействия от сил внутреннего давления жидкости или газа, температурного расширения и сжатия, и других сил создающих изгибающие и крутящие моменты, действующие не пропорционально относительно времени. Конструкционный материал трубопроводов находится в сложном напряженно-деформированном состоянии. Статистические методы расчета долговечности от воздействия циклических нагрузок дают большой разброс данных и предполагают применение неоправданно больших запасов прочности. Также в расчетах на прочность не учитывается дефектность микроструктуры исходного материала деталей, которая оказывает значительное влияние на длительную прочность конструкций.

Поэтому возникает необходимость в проведении исследований и разработке критериев, учитывающих механические характеристики материалов при сложном напряженном состоянии и дефектность структуры конструкционного материала, сложившуюся в процессе изготовления и монтажа деталей. Это возможно при использовании методов акустической эмиссии (АЭ).

Исследование долговечности материалов трубопроводов в условиях плоского напряженного состояния

Акустическая эмиссия возникает в конструкционном материале, находящемся под механическим напряжением, от освобождения энергии в результате микро- и макроскопических явлений вызванных локальной динамической перестройкой внутренней структуры материала [1-4]. Обычно перед вводом гидрогазовых систем в эксплуатацию их испытывают давлением на 25% превышающим максимальное рабочее $P_{исп}=1,25 P_{раб}$, эта нагрузка вызывает упруго-пластическую деформацию первого цикла нагружения конструкционного материала и акустическую эмиссию (эффект Кайзера) рис.1.

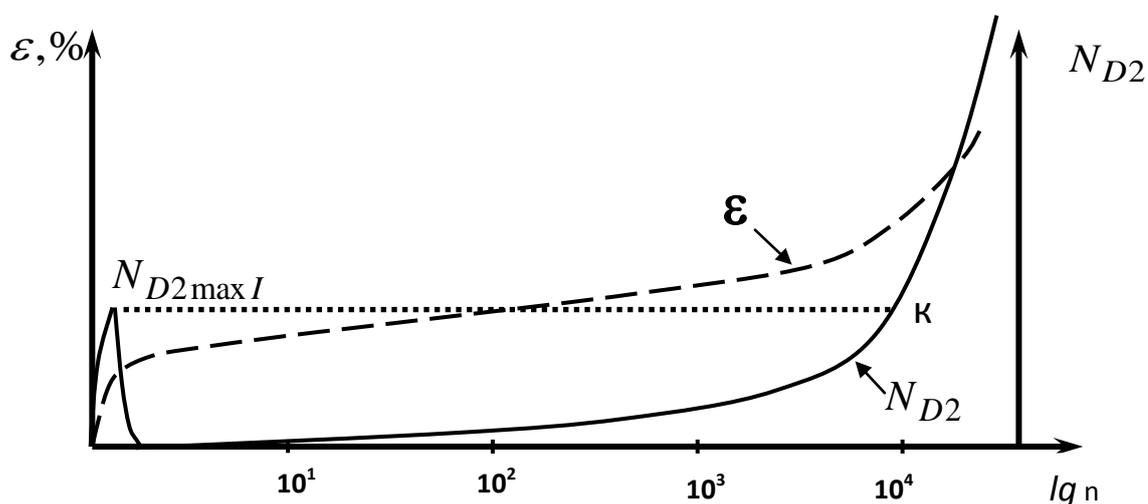


Рис. 1. Схема активности сигналов акустической эмиссии

Здесь ε – циклически накопленная деформация конструкционного материала %, N_{D2} – количество сигналов АЭ (с фрактальной размерностью аттрактора $1 \leq$

$D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$) в каждом цикле нагружения, $lg n$ – число циклов нагружения в логарифмических координатах.

Если при этом испытании зафиксировать параметры акустической эмиссии и обработать по методике [5], то можно установить дефектность микроструктуры конструкционного материала, из которого изготовлены детали гидрогазовой системы, и по описанной ниже методике, рассчитать долговечность испытываемых деталей.

Для разработки и проверки предлагаемой методики в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете была разработана комплексная программа исследований долговечности материалов при программном нагружении по различным траекториям механического малоциклового нагружения в условиях плоского напряженного состояния [6]. Процесс нагружения в точке тела, подвергаемого упругопластической деформации, происходит в первой четверти плоскости двумерного вектора напряжений (рис. 2). Уравнение такой траектории нагружения имеет вид:

$$\vec{S} = S_1 \cdot \vec{i}_1 + S_3 \cdot \vec{i}_3 = S(t), \quad (1)$$

где S_1, S_3 -компоненты вектора напряжений.

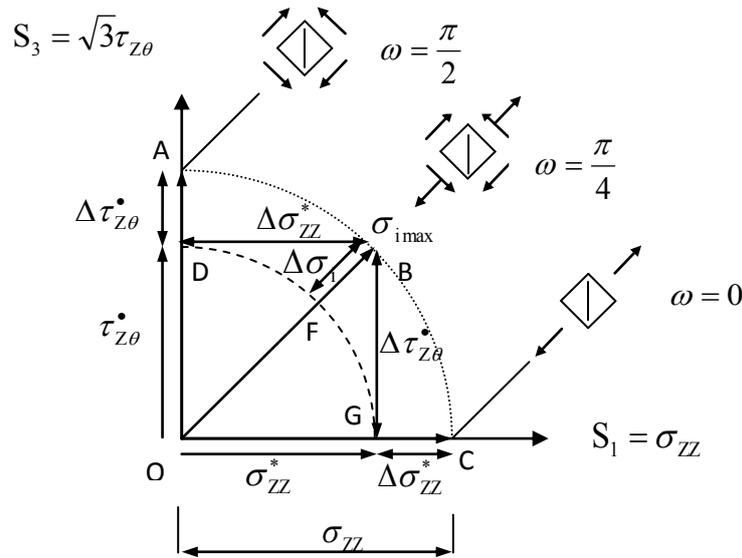


Рис. 2. Траектории циклического нагружения при плоском напряженно-деформированном состоянии.

Такое напряженное состояние, характеризуемое компонентами тензора напряжений $\sigma_{ZZ}(t) \neq 0$ и $\tau_{z\theta}(t) \neq 0$ создается в тонкостенном цилиндрическом образце, который подвергался растяжению и кручению ($N=N(t)$; $M_{KP}=M_{KP}(t)$).

Данная программа исследования позволяет создавать в материале плосконапряженное состояние при пропорциональном (по траектории $0 \rightarrow G \leftrightarrow C$, $0 \rightarrow D \leftrightarrow A$, $0 \rightarrow F \leftrightarrow B$ рис.2) и сложном (по траектории $0 \rightarrow G \leftrightarrow B$, $0 \rightarrow D \leftrightarrow B$ рис.2) циклическом нагружении ($\Delta\sigma_i = \sigma_{i\min} \leftrightarrow \sigma_{i\max}$, где $\sigma_{i\max}$ ограничено поверхностью ABC , $\sigma_{i\min}$ ограничено поверхностью DFG). При этом вектор напряжений $S(t)$ в каждую единицу времени совпадает с вектором $\vec{\sigma}_i(t)$

$$\vec{\sigma}_i(t) = \sqrt{3}\tau_{z\theta}(t) \cdot \vec{i}_3 + \sigma_{ZZ}(t) \cdot \vec{i}_1 = S(t), \quad (2)$$

конец которого описывает соответствующую траекторию нагружения в пространстве напряжений. При этом установлено, что долговечность материала при

данных ω^* и α зависит от формы и параметров циклов изменения интенсивности напряжений, а при данной программе циклического нагружения — от вида напряженно-деформированного состояния (пропорциональное нагружение $\omega^* = \alpha$ рис. 3 траектория $0 \rightarrow Q \leftrightarrow Z$) и сложности траекторий нагружения (сложное нагружение $\omega^* \neq \alpha$ рис. 3 траектория $0 \rightarrow Q \leftrightarrow H$). Здесь ω^* и α — соответственно углы, характеризующие направление вектора напряжений $\sigma_i(t)$ до и после его излома.

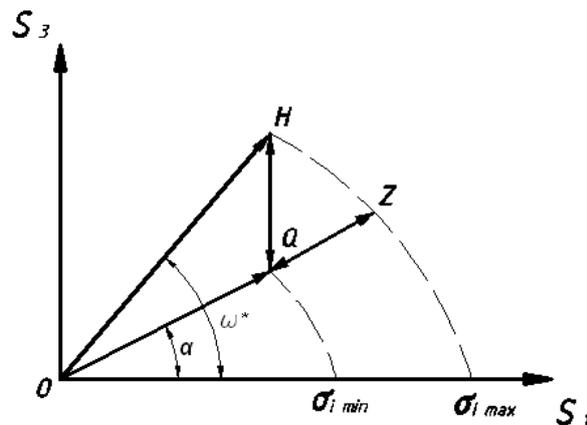


Рис. 3 Зависимость углов ω^* и α от направления вектора напряжений $\sigma_i(t)$ в пространстве напряжений.

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

$$\omega(t) = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \omega^* + \frac{\Delta \sigma_i(t) \cdot \sin \alpha}{\sigma_i^* \cdot \cos \omega^*}}{1 + \frac{\Delta \sigma_i(t) \cdot \cos \alpha}{\sigma_i^* \cdot \cos \omega^*}} \quad (3)$$

Циклическое нагружение трубчатого образца [6,7] по выбранной траектории производилось до его разрушения при $\sigma_{i \max} = 0,95 \sigma_T$ и одновременно

фиксируются сигналы АЭ. Сигналы АЭ в процессе анализа были разделены по степени опасности генерирующих их источников. Каждый зафиксированный сигнал АЭ рассматривался как временной ряд, образованный некой динамической системой, и с точки зрения нелинейной динамики задача заключается в определении степеней свободы динамической системы по одномерной проекции ее эволюций в фазовом пространстве. При этом каждый равномасштабный источник (дефект микроструктуры материала), участвующий в формировании импульса АЭ, рассматривается как отдельная степень свободы, а источники меньшего масштаба не учитываются в силу их существенно низкой (на несколько порядков) величины вклада в суммарную энергию сигнала.

Анализ результатов экспериментов

Используя современные методы нелинейной динамики по одномерному временному ряду был реконструирован многомерный аттрактор, метрические свойства которого очень близки к эволюциям исследуемой динамической системы [5]. При этом с большой степенью достоверности определялась размерность D_0 фазового пространства исследуемого процесса, и количество m его степеней свободы. В качестве m берется ближайшее к D_0 целое число при $m \leq D_0$. Наиболее опасные дефекты (микро-и макротрещины, которые не залечиваются) - источники АЭ, обладающие $m = 1 \div 6$ степенями свободы (и фрактальной размерностью аттрактора $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$). При этом можно определить минимальную интенсивность скорости счета акустических сигналов с фрактальной размерностью

аттрактора $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$, на установившемся участке кривой циклической ползучести рис.1. Минимальная интенсивность скорости счета акустических сигналов $\dot{N}_{D2 \text{ mini}}(\gamma; \omega)$ определялась исходя из соотношений:

$$\text{при } \omega = 0 \left\{ \begin{array}{l} \dot{N}_{D2 \text{ mini}}(\bar{\gamma} = 1, \omega = 0) = \frac{N_{D2}(\bar{\gamma} = 1, \omega = 0)}{N_{D2 \text{ maxI}}(\bar{\gamma} = 1, \omega = 0)} \\ \dot{N}_{D2 \text{ mini}}(\tilde{\gamma} = 1, \omega = 0) = \frac{N_{D2}(\tilde{\gamma} = 1, \omega = 0)}{N_{D2 \text{ maxI}}(\tilde{\gamma} = 1, \omega = 0)} \\ \dot{N}_{D2 \text{ mini}}(\bar{\bar{\gamma}} = 1, \omega = 0) = \frac{N_{D2}(\bar{\bar{\gamma}} = 1, \omega = 0)}{N_{D2 \text{ maxI}}(\bar{\bar{\gamma}} = 1, \omega = 0)} \end{array} \right. ; \quad (4)$$

$$\text{при } \omega = \frac{\pi}{2} \left\{ \begin{array}{l} \dot{N}_{D2 \text{ mini}}(\bar{\gamma} = 1, \omega = \frac{\pi}{2}) = \frac{N_{D2}(\bar{\gamma} = 1, \omega = \frac{\pi}{2})}{N_{D2 \text{ maxI}}(\bar{\gamma} = 1, \omega = \frac{\pi}{2})} \\ \dot{N}_{D2 \text{ mini}}(\tilde{\gamma} = 1, \omega = \frac{\pi}{2}) = \frac{N_{D2}(\tilde{\gamma} = 1, \omega = \frac{\pi}{2})}{N_{D2 \text{ maxI}}(\tilde{\gamma} = 1, \omega = \frac{\pi}{2})} \\ \dot{N}_{D2 \text{ mini}}(\bar{\bar{\gamma}} = 1, \omega = \frac{\pi}{2}) = \frac{N_{D2}(\bar{\bar{\gamma}} = 1, \omega = \frac{\pi}{2})}{N_{D2 \text{ maxI}}(\bar{\bar{\gamma}} = 1, \omega = \frac{\pi}{2})} \end{array} \right. , \quad (5)$$

где $N_{D2}(\gamma, \omega)$ – интенсивность скорости счета сигналов АЭ с фрактальной размерностью аттрактора $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$; $N_{D2 \text{ maxI}}(\gamma, \omega)$ – количество акустических сигналов с фрактальной размерностью аттрактора $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$ в первом цикле нагружения при $\sigma_{i \text{ max}}$. Форма цикла нагружения характеризуется уравнением $\bar{\gamma} + \bar{\bar{\gamma}} + \tilde{\gamma} = 1$. Здесь $\bar{\gamma}, \bar{\bar{\gamma}}$ – соответственно относительное время пребывания образца за цикл при максимальной и минимальной интенсивности напряжений цикла, $\tilde{\gamma}$ – относительное время пребывания образца за цикл, когда происходит изменение интенсивности напряжений ($\sigma_{i \text{ min}} \leftrightarrow \sigma_{i \text{ max}}$) без выдержек при

$\sigma_{i\min}$ и $\sigma_{i\max}$. Интенсивность скорости счета акустических сигналов с фрактальной размерностью аттрактора $1 \leq D_{2\text{ аттр.}} \leq 6$ находят по формуле

$$N_{D2}(\gamma, \omega) = \frac{N_{D2\Delta t}}{\Delta T_{\text{ц}}}; \quad (6)$$

где $N_{D2\Delta t}$ – количество акустических сигналов с фрактальной размерностью аттрактора $1 \leq D_{2\text{ аттр.}} \leq 6$ за один цикл нагружения на установившемся участке циклической ползучести (см. рис. 1); $\Delta T_{\text{ц}}$ – время одного цикла нагружения.

Можно отметить, что минимальная интенсивность скорости счета акустических сигналов $\dot{N}_{D2\min i}(\gamma; \omega)$ тесно связана с временем до разрушения конструкционного материала уравнением:

$$N_{D2\max I}(\gamma, \omega) = t_p \cdot \dot{N}_{D2\min i}(\gamma, \omega); \quad (7)$$

Произведение времени $t_i(\gamma, \omega)$ нахождения материала под нагрузкой $\sigma_i(\gamma; \omega)$ на минимальную интенсивность скорости счета акустических сигналов $\dot{N}_{D2\min i}(\gamma; \omega)$ приведет к достижению количества АС за цикл нагружения, равного количеству в первом цикле нагружения $N_{D2\max I}(\gamma, \omega)$ при $\sigma_{i\max}$ в точке **К** рис. 1, когда происходит зарождение магистральной усталостной трещины, материал становится не работоспособным и разрушается. Тогда:

$$t_p = \frac{N_{D2\max I}(\gamma, \omega)}{\dot{N}_{D2\min i}(\gamma, \omega)}; \quad (8)$$

То есть время до разрушения определяется степенью повреждения материала. Следовательно, выявление зависимостей минимальной интенсивности скорости

счета сигналов АЭ $\dot{N}_{D2\text{mini}}(\gamma, \omega)$ от траектории нагружения получает важное значение. По результатам проведенных экспериментов получена зависимость времени до разрушения для сплава Д20 от минимальной интенсивности скорости счета сигналов АЭ (рис. 4).

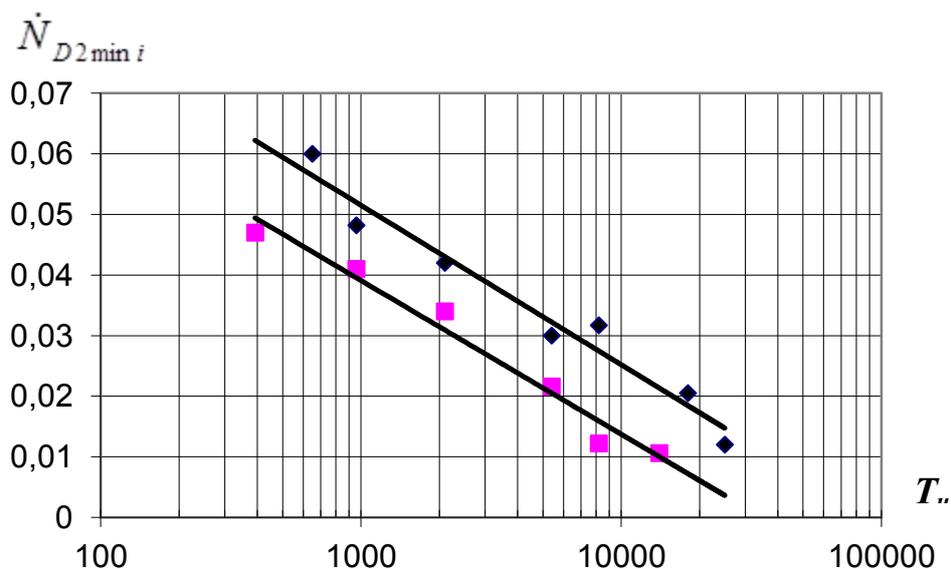


Рис. 4. Зависимость времени до разрушения для сплава Д20 от минимальной интенсивности скорости счета сигналов АЭ при циклическом изменении напряжений:

- ◆ при $\omega^* = \alpha = 0$ по траектории OGC рис.2;
- при $\omega^* = \frac{\pi}{2}$ по траектории OGB рис.2.

На рис. 4 видно, что вид напряженно-деформированного состояния оказывает значительное влияние на срок службы конструкционных материалов. При $\omega^* = 0$ длительная прочность приблизительно на 20% больше, чем при $\omega^* = \frac{\pi}{2}$ рис.2.

По результатам проведенных экспериментов были построены поверхности предельных состояний в зависимости от изменения минимальной интенсивности

скорости счета акустических сигналов с фрактальной размерностью аттрактора $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$, вида напряженно-деформированного состояния и формы цикла нагружения для алюминиевого сплава Д20 (рис. 5), где все множество точек между поверхностями, есть различные возможные траектории циклического нагружения.

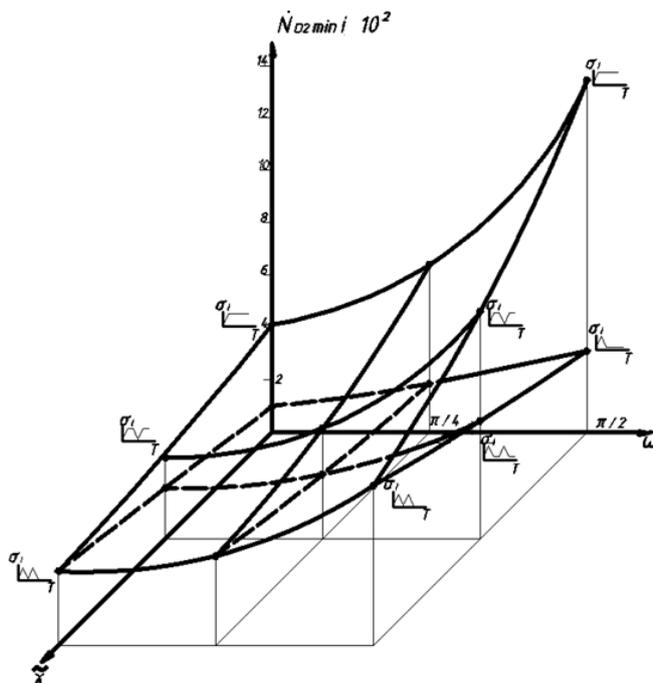


Рис. 5. Зависимость изменения минимальной интенсивности скорости счета акустических сигналов с фрактальной размерностью аттрактора $1 \leq D_{2 \text{ аттр.}} \leq 6$ от траектории нагружения для алюминиевого сплава Д20 при $\Delta\sigma_i = 400 \Leftrightarrow 200 \text{ МПа} =$

const

Зная общие закономерности изменения параметров сигналов АС для определенных величин напряжений σ_i и $\Delta\sigma$, для данного конструкционного материала, можно построить поверхности предельных состояний по опорным точкам при $\bar{\gamma} = 1$; $\bar{\bar{\gamma}} = 1$; $\tilde{\gamma} = 1$; $\bar{\gamma} + \tilde{\gamma} = 1$; $\bar{\bar{\gamma}} + \tilde{\gamma} = 1$; для соответствующих видов

напряженно-деформированного состояния $\omega = 0$, $\omega = \frac{\pi}{4}$, $\omega = \frac{\pi}{2}$, при любых значениях величин напряжений σ_i и $\Delta\sigma$, и определить долговечность деталей испытывающих циклические нагрузки по любой траектории нагружения. Кроме того, следует отметить явление кавитации в трубопроводе, которое может возникать в местах стыков отдельных элементов как из-за падения давления в магистрали, так и по причине вибонагруженности трубопровода [8], что может привести к падению характеристик надежности. Таким образом, контроль работоспособности элементов и систем позволяет косвенно повысить классические надежность показатели, показатели безопасности и технической эффективности [9]. При вышеизложенном подходе это потребует постановки минимального числа трудоемких экспериментов.

Заключение

Таким образом, прогнозирование долговечности деталей трубопроводов гидрогазовых систем в авиа-и ракетостроении возможно проводить на начальных этапах эксплуатации по параметрам сигналов АС с высокой степенью достоверности по сравнительно небольшому числу предварительных экспериментов.

Библиографический список

1. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии / Под ред. Л.Н. Степановой, В.В. Муравьева.- М.: Машиностроение-Полет, 2004. - 368 с.
2. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении / Под ред.

Н.А. Семашко. - М.: Машиностроение, 2002. 240 с.

3. Сысоев О.Е. Мониторинг изменения структуры материалов при циклических нагружениях по сигналам акустической эмиссии // Научно-технические ведомости Санкт_Петербургского государственного политехнического университета. 2009. № 74. С. 83-89.

4. Иванов В.И., Быков С.П. Классификация источников акустической эмиссии // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. 1985. № I. С. 67-74.

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. 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.

7. Аннин Б.Д. Поведение материалов в условиях сложного нагружения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 342 с.

8. Бобарика И.О., Демидов А.И. Совершенствование всасывающих линий гидросистем с учетом кавитации // Труды МАИ, 2016, №85:
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=65646>

9. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ, 2016, № 85:
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=67501>