

УДК 621.81

*Встановлено, що їх довговічність визначається локальною напругою стану матеріалу, пов'язаною з параметрами АЕ при фіксованій нарузі, а також його жорсткістю, яка визначається особливостями АЕ характеристиками*

*Ключові слова: рухомий склад, електро-транспорт, акустична емісія*

*Установлено, что их долговечность определяется локальным напряжением состояния материала, связанным с параметрами АЭ при фиксированном напряжении, а также его жесткостью, определяемой особенностями АЭ характеристиками*

*Ключевые слова: подвижной состав, электро-транспорт, акустическая эмиссия*

*It has been found that their longevity is determined by the local stress state of the material associated with the parameters of AE at a fixed voltage, as well as its stiffness is determined by features of AE characteristics*

*Key words: rolling stock, electric, acoustic emission*

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПС ЭТ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

**Д. Ю. Зубенко**

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра "Електротранспорт"

Харківська національна академія міського

господарства

вул. Революції 12 м., Харків 61002

Контактний тел.: (057) 735-23-85, 050-520-21-01

E-mail: Denis04@ukr.net

### Введение

Основной задачей конструктора является создание конкурентоспособного изделия, выполняющего предназначенные ему функции в течение заданного срока. Ее успешное решение возможно при умении оценить техническое состояние элементов изделия (на любом этапе производства и эксплуатации) и предвидеть возможность его разрушения. Обычно при проектировании конструкции стремятся не допустить предельных состояний ее элементов. Однако практика изготовления и эксплуатации машин показывает, что детали, изготовленные по единой технологии, имеют большой разброс механических свойств, особенно долговечности. Поскольку ресурс изделия определяется минимальной долговечностью входящих в него деталей, актуальной является разработка простых и надежных методов НК технического состояния каждой конкретной детали. Одним из эффективных методов такого контроля является метод акустической эмиссии (АЭ), который основан на регистрации излучаемых материалом механических волн, вызванных внутренней динамической локальной перестройкой структуры материала, определяющей его механические свойства.

### Последние достижения

В работах [1,2] показано, что в процессе деформирования вязких материалов интенсивность потока сигналов АЭ изменяется по выпуклой кривой Гаусса, особенности которой характеризуют механические свойства материала. В статьях [3, 4] описан разрабо-

танный метод ее коррекции, исключающий искажение сигналов АЭ при высокой интенсивности потока актов АЭ, что существенно повышает точность и достоверность результатов АЭ контроля и позволяет более достоверно изучать кинетику деформации и разрушения материала. В работах [5-7] приводятся результаты исследования зависимости характеристик сопротивления усталости от параметров АЭ при неоднородном напряженном состоянии материала деталей машин, а также методики их АЭ диагностики. Таким образом, данные проведенных исследований свидетельствуют о высокой информативности и эффективности метода АЭ при разработке методов НК технического состояния материала деталей и прогнозирования их долговечности.

### Цель статьи

Исследовать взаимосвязи механических и акустических характеристик лопаток насоса гидроусилителя руля троллейбуса. Определить их долговечность и рассмотреть методики прогнозирования долговечности лопаток на заданном уровне напряжений не разрушающим методом АЭ.

### Материалы исследований

Обычно все поле разброса данных усталостной долговечности при разных амплитудах напряжений испытываемого объекта представляется с позиций математической статистики как семейство кривых,

характерным параметром которых служит величина вероятности разрушения, - так называемые кривые усталости равной вероятности разрушения [5, 7]. В результате проведенных ранее исследований [2] установлено, что в подавляющем большинстве случаев для участка левой ветви кривой усталости при напряжениях, не превышающих предел текучести, между  $\lg\sigma_a$  и  $\lg N$  наблюдается линейная зависимость. Это позволяет представить в виде уравнения:

$$\sigma_a^m N = C = \text{const}, \quad (1)$$

где  $\sigma_a$  - амплитуда циклических напряжений, Па;  $N$  - количество циклов до разрушения;  $m$  - показатель степени;  $C$  - постоянная.

Исходя из физической природы разброса значений долговечности, полную диаграмму усталостного разрушения исследуемых деталей можно рассматривать как семейство диаграмм усталости деталей, имеющих одинаковое техническое состояние. Иными словами, каждой конкретной детали соответствует определенная кривая усталости, описываемая уравнением (1), где показатель степени и коэффициент  $C$  определяются опытным путем. При таком подходе случайными будут свойства конкретной детали, а ее долговечность уже становится величиной детерминированной, обусловленной пред историей детали. Тогда левая часть уравнения (1) представляет собой уровень энергетики воздействия на испытываемую деталь, а коэффициент  $C$  — уровень ее сопротивления усталости. Разрушение наступает при равенстве этих параметров. Поскольку усталостная прочность — это свойство конкретного изделия, обусловленное его техническим состоянием, то коэффициенты  $C$  и  $m$  для конкретного изделия неизменны на каждом уровне напряжений и, очевидно, связаны с параметрами АЭ при его погружении. Такой подход позволяет реализовать не разрушающий метод определения долговечности конкретной детали по параметрам ДЭ на заданном уровне напряжений, для чего достаточно согласовать параметры АЭ с уровнем напряжений в материале детали и с ее долговечностью.

Из этого следует, что интенсивность потока АЭ в материале лопатки при фиксированном уровне напряжения, характеризующая интенсивность деформационных процессов в материале, обуславливает усталостную прочность детали, в частности, ее долговечность сигналов на определенном уровне напряжений. Экспериментальные точки, соответствующие лопаткам без кадра с разной технологической наследственностью, хорошо укладываются на разные прямые, исходящие из одной точки - полюса, причем для лопаток после точки располагаются на разных прямых.

Расположение экспериментальных точек на разных прямых свидетельствует о действии разных механизмов усталостного разрушения. Согласно структурно-энергетической теории, разрушение материала происходит после преодоления определенного энергетического барьера, уровень которого определяется жесткостью его локального напряженного состояния. При этом переход от одного энергетического уровня к другому определяется законом дискретности параметров разрушения.

Коэффициент  $C$  характеризует энергетический уровень разрушения материала с определенной жест-

костью его напряженного состояния и представляет собой долговечность лопаток.

Разная жесткость напряженного состояния материала лопаток после проверки, очевидно, обусловлена действием разных механизмов усталостного разрушения. При интенсивных нагрузках происходит насыщение поверхностного слоя материала одновременно углеродом и азотом, причем азотом поверхность насыщается в большей степени, чем углеродом. При этом усталостные характеристики сплава изменяются за счет, во-первых, усадочных напряжений, возникающих при действии высоких градиентов температур; во-вторых, соединения азота и углерода с другими элементами и связанного с этим объемного расширения материала, вызывающего возникновение остаточных напряжений; в-третьих, образования твердых нитридов и карбидов в поверхностном слое материала.

При неоднородном напряженном состоянии материала в процессе его нагружения действуют изменяющиеся по глубине внутренние остаточные и растягивающие напряжения от внешней нагрузки. Поэтому механизм распространения трещины, существенно влияющий на долговечность детали, определяется суммарным напряжением, зависящим от соотношения градиентов рассмотренных напряжений. Если имеют место сжимающие остаточные напряжения, то трещина, зарождающаяся на некоторой глубине поверхностного слоя, распространяется к поверхности с увеличивающейся скоростью, так как размах коэффициента интенсивности напряжения. К при росте трещины в этом направлении растет. Толщину поверхностного слоя трещина при этом проходит достаточно быстро, а при сжимающих остаточных напряжениях скорость роста трещины к поверхности уменьшается, так как размах при этом уменьшается. Времени для прохождения трещиной такого упрочненного слоя требуется больше, а долговечность такой детали выше.

При каждом механизме разрушения разный уровень пластически деформированных микрообъемов обуславливает разную скорость процесса усталостного разрушения. Поскольку метод АЭ основан на регистрации излучаемых материалом механических волн, вызванных внутренней локальной динамической перестройкой структуры твердого тела, то скорость счета сигналов ЛЭ пропорциональна объему пластически деформированного материала. Это объясняет связь интенсивности потока при фиксированном напряжении с долговечностью детали на определенном уровне напряжения.

Специфика долговечности лопаток с надрезом состоит в том, что под действием растягивающих напряжений от внешней нагрузки неравномерно проявляются напряжения в области концентратора, напряжения превосходят предел текучести в очень ограниченных зонах, где происходит пластическая деформация. После снятия нагрузки пластически деформированные участки в области максимальных напряжений не могут восстановиться до своих первоначальных размеров. Вследствие этого они оказываются под действием сжимающих напряжений и могут существенно уменьшить максимальные результирующие растягивающие напряжения при последующих циклах нагружения, а следовательно, и увеличить свою долговечность. Если же растягивающие напряжения от внешней нагрузки

не вызывают пластической деформации материала в области концентратора напряжения, то материал постоянно находится под действием повышенных напряжений, и долговечность его будет пониженной. В любом случае концентратор напряжений локализует область повышенного уровня напряжений, что снижает объемы пластически деформированного материала, а следовательно, и уровень скорости счета сигналов АЭ в начале нагружения материала, но при этом изменяется его жесткость локального напряженного состояния. Высокая степень приближения зависимостей для некоторых лопаток без надреза к лопаткам с надрезом свидетельствует о том, что в материале этих лопаток без явно выраженного концентратора напряжений последний фактически присутствует. Это могут быть различные включения, несплошности материала или просто крупные неблагоприятно ориентированные зерна, что снижает характеристики сопротивления усталости.

Результаты проведенного исследования показали наличие достаточно тесной связи между долговечностью лопаток и скоростью счета сигналов АЭ на определенном уровне их нагружения. Однако эта зависимость неоднозначна и определяется жесткостью напряженного состояния микрообъемов поверхностного слоя, обуславливающего действие разных механизмов усталостного разрушения лопаток. Следовательно, для прогнозирования долговечности последних на заданном уровне напряжений необходимо определить не только действительное локальное напряженное состояние материала, но и его жесткость, которая обусловлена объемом пластически деформированной его части и может определяться по параметрам АЭ.

Уровень локального напряженного состояния конкретной детали - величина перманентная, определяемая уровнем  $N_t$ . Жесткость напряженного состояния является величиной дискретной и может быть определена по особенностям АЭ характеристик. В работе [13] показано, что АЭ характеристики лопаток компрессора из сплава титана без надреза имеют вид Э-образных кривых, но у лопаток после МГЦ наблюдается задержка появления АЭ, что объясняется упрочнением поверхностного слоя.

Тот факт, что зависимости (1) представляют собой одинаковые функции разных аргументов, свидетель-

ствует о подобии процессов, которые они описывают, что позволяет прогнозировать долговечность конкретной детали на заданном уровне усталостных испытаний методом АЭ.

Зависимость скорости счета сигналов АЭ на фиксированном уровне напряжения, меньшем предела усталости, от долговечности лопаток  $N$  на фиксированном уровне напряжении в области многоциклового усталости, дает возможность по скорости счета сигналов и особенностям ЛЭ-характеристики определить долговечность конкретной лопатки  $N$  при напряжении. Тогда прямая, проведенная из полюса диаграммы усталости генеральной выборки через точку с координатами, является диаграммой усталости выборки лопаток одинаковой усталостной прочностью с исследуемой лопаткой. Она позволяет прогнозировать долговечность последней на любом уровне напряжений в области много цикловой усталости.

Следует отметить, что даже незначительное изменение в технологии изготовления детали может существенно изменить жесткость напряженного состояния ее материала, а следовательно, и ее долговечность.

---

### Выводы

---

1. Деформационные процессы, проходящие в микрообъемах материала при действии монотонных макронапряжений, меньших предела выносливости, и переменных напряжений в области многоциклового усталости описываются одинаковыми уравнениями, что свидетельствует о их подобии.

2. Долговечность детали определяется локальным напряженным состоянием материала и его жесткостью, причем первый параметр материала определяется интенсивностью потока АЭ на фиксированном уровне макронапряжения, а второй - особенностями ЛЭ характеристик.

3. Результаты проведенных исследований дают возможность прогнозировать неразрушающим методом ЛЭ долговечность конкретных деталей в области многоциклового усталости.

---

### Литература

1. Александров А.А. Вибрация и вибродиагностика судового оборудования. – Л.: Судостроение, 1996. – 273с.
2. Балицкий Ф.Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. – М.: Наука, 1984. – 129с.
3. Григорьева Н.В. Вибрация энергетических машин: Справочное пособие.- Л.: Машиностроение, 1983.- 464с.
4. Карасев В.А. Доводка эксплуатируемых машин: Вибродиагностические методы. – М.: Машиностроение, 1986. – 192с.
5. Каталог приборов для анализа звука, вибраций и обработки данных.- Нэрум: Дания, фирма "Брюль и Кьер", 1989-90 гг.
6. Ключева В.В. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник. В 2-х кн. - М.: Машиностроение, 1978. - Кн.1. - 448с. - Кн.2 - 439с.
7. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. - М.: Издательский центр "Академия", 1996. – 317с.