

**Algorithm of cardiac arrhythmias analysis using the linguistic and sequential analysis and COBWEB clustering algorithm**

*The paper considers cardiac arrhythmias analysis algorithms beginning from electrocardiogram (ECG) signal splitting into cycles up to generation of the sequence of arrhythmias types. It is proposed to create the arrhythmias dictionary basing on sequential analysis of ECG signal rhythm code sequence. After that it is offered to use the linguistic analysis algorithm for classification of arrhythmia type. It is proposed to apply the modification of Cobweb conceptual clustering algorithm for ECG signals QRS complexes. The example of the analysis of ECG signal record fragment is given.*

**Keywords:** cardiac arrhythmias, linguistic analysis, sequential analysis, Cobweb clustering algorithm

Получено: 11.04.13

УДК 620.17:658.56

*В. В. Муравьев*, доктор технических наук, профессор  
Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова

**АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СТЕНДОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ  
ТЕЛЕЖЕК ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ\***

*Приводятся результаты десятилетней эксплуатации акустико-эмиссионных стенов для неразрушающего контроля литых деталей грузовых вагонов. Доказывается малоцикловый механизм развития трещин в боковых рамах нового изготовления при наличии концентраторов напряжений заданных размеров. Обосновывается эффективность использования стенов для выявления трещин на ранней стадии эксплуатации боковых рам в связи с большим количеством металлургических дефектов, не обнаруженных на заводах-изготовителях.*

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, усталость, изломы боковых рам грузовых вагонов, ресурс

**Введение**

На сети железных дорог России к 2001 году сложилось критическое положение с литыми элементами тележек грузовых вагонов, вызванное острой нехваткой новых деталей из-за снижения их выпуска металлургическими заводами. Такая ситуация сложилась вследствие резкого падения производства на металлургических заводах в 1990-е годы. Речь идет о боковых рамах и надрессорных балках тележки модели 18-100, нормативный срок службы которых составляет 30 лет. Департамент вагонного хозяйства ОАО «РЖД» принял решение о продлении срока службы по результатам индивидуальных испытаний каждой детали с истекшим сроком эксплуатации.

Основой методики продления срока службы явился метод акустической эмиссии (АЭ), дополняющий магнитные методы. Основанием для внедрения метода АЭ послужили исследования [1–8], проведенные в Сибирском государственном университете путей сообщения (СГУПС) в 1994–1999 гг. под руководством автора. Сравнительные испытания метода АЭ с электромагнитными методами неразрушающего контроля в вагонном депо Нижнеудинск (2001 г.) показали его значительно более высокую вероятность обнаружения дефектов по сравнению с феррозондовым и особенно вихретоковым методами.

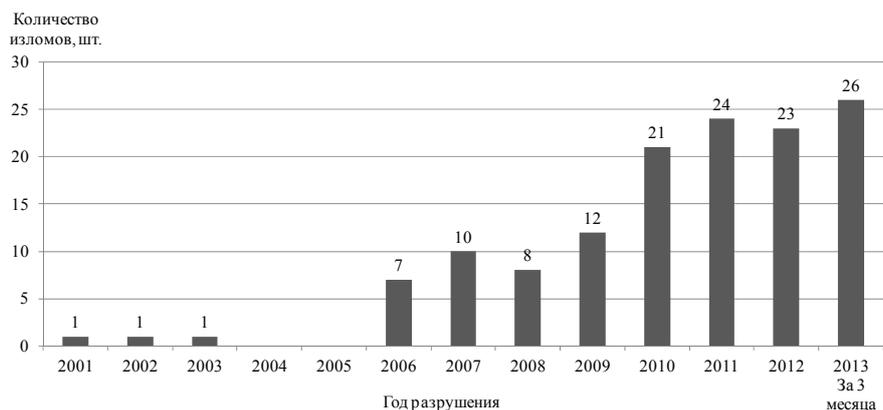
В настоящее время более 110 вагонных ремонтных депо оснащены АЭ-стендами, разработанными двумя коллективами: СГУПС совместно с Сибирским НИИ авиации (СЦАД-16) [1, 2, 5, 9, 10] и ПКБ ЦВ ОАО «РЖД» совместно с ООО «Интерюнис»

(A-Line). Общая концепция продления срока службы боковых рам тележек грузовых вагонов модели 18-100 методом АЭ производится в настоящее время по утвержденному технологическому процессу в соответствии с методикой № 682-2005 ПКБ ЦВ. Методика продления срока службы литых деталей внедрена во всех железнодорожных администрациях, входящих в состав СНГ. Разработка и использование метода АЭ для других объектов железнодорожного транспорта подтвердили его эффективность [11–17].

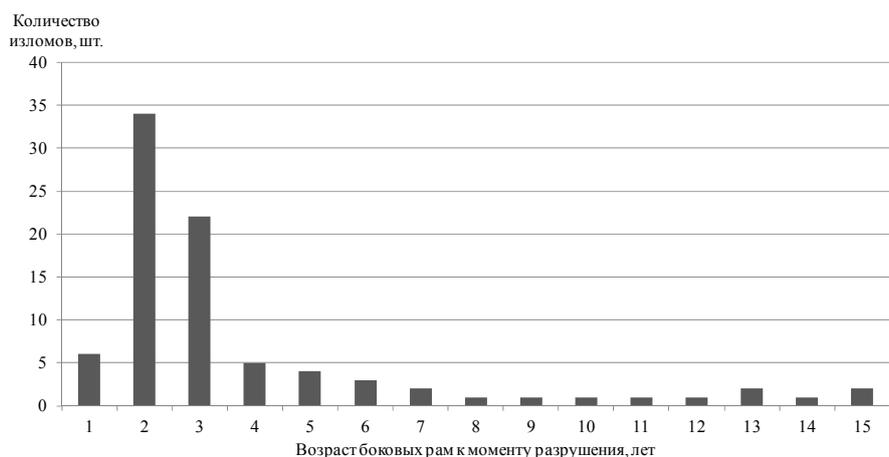
По результатам АЭ-диагностики к 2012 г. продлен срок службы более 700 000 боковым рамам и около 200 000 надрессорным балкам с 30 лет до 38 лет полезного использования. Ни одна из деталей с продленным сроком службы после АЭ-контроля не отказала в процессе эксплуатации. За время эксплуатации АЭ-стендов в вагонных ремонтных депо реальная экономия от продления срока службы литых деталей грузовых вагонов составила более 12 млрд руб.

**Статистика изломов и крушений**

Однако, начиная с 2006 г., происходит резкое увеличение числа сходов и крушений из-за изломов боковых рам. В основном ломаются боковые рамы коробчатого сечения нового изготовления. Качество литых деталей с каждым годом ухудшается, что подтверждается статистикой изломов боковых рам тележки грузовых вагонов в движении на рис. 1, а. Большинство изломов боковых рам в пути следования с гарантийным сроком эксплуатации до 5 лет приходится на первые 2–3 года эксплуатации (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Количество изломов боковых рам в пути следования до истечения срока службы по годам (а), в зависимости от возраста изделий с 2006 по 2013 год (б)

В 2006–2013 гг. изломалось 102 шт. (рис. 1, б) новых боковых рам (с гарантийным сроком эксплуатации до 5 лет). Статистика разрушений по заводам-изготовителям распределяется следующим образом:

- 33 шт. ОАО НПК «Уралвагонзавод»;
- 28 шт. ЧАО «Азовэлектросталь»;
- 13 шт. ПАО «Кременчугский сталелитейный завод»;
- 11 шт. ОАО «Алтайвагон»;
- 11 шт. ООО «Промтрактор-Промлит»;
- 4 шт. ОАО «Мариупольский ЗТМ»;
- 1 шт. ООО ПК «Бежицкий сталелитейный завод»;
- 1 шт. Китай (приемка ОАО «Азовобщемаш»).

Рис. 2 демонстрирует сход вагона и типичные изломы в области буксового проема по радиусам  $r55$ , где присутствуют скопления металлургических дефектов усадочного происхождения с наличием рыхлот и газовой пористости.

Следует отметить, что дефектоскопия на заводах-изготовителях проводится визуальным, магнитным и вихретоковым методами неразрушающего контроля. Магнитная и вихретоковая дефектоскопия, так же, как и визуальный осмотр, обеспечивают обнаружение лишь поверхностных дефектов определенной ориентации и размеров.



а



б

Рис. 2. Излом боковой рамы коробчатого сечения в пути следования. Сход вагона (а), усталостный излом с наличием металлургических дефектов (б)

Ультразвуковой метод практически неприменим при высокой шероховатости поверхности и сильном затухании волн в металле, в частности, для контроля литых деталей. Отсутствие в неэксплуатировавшемся литье острых трещин, характерных для усталости, не позволяет применить на заводах-изготовителях метод акустической эмиссии.

**Особенности метода акустической эмиссии**

Метод АЭ состоит в регистрации упругих волн, возникающих в твердых телах в процессе локальной динамической перестройки структуры материала (ГОСТ 27655–88). Как следует из определения, для появления акустических колебаний среды необходимо, чтобы процесс перестройки проходил с высокой скоростью в ограниченном объеме среды. Наиболее характерными примерами таких процессов являются образование и рост трещин. Поэтому основной областью применения АЭ является обнаружение развивающихся в объекте контроля дефектов [18, 19]. Суть метода АЭ материала иллюстрирует рис. 3.

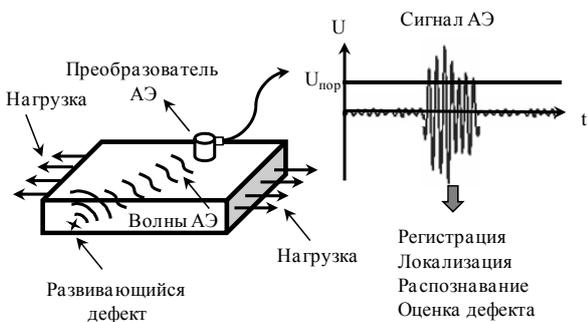


Рис. 3. Суть метода АЭ

Под влиянием внешней нагрузки (механического нагружения) в объекте контроля формируются механические напряжения, приводящие к росту трещин в некоторой локальной области. Известно, что наличие дефектов в объекте при его механическом нагружении приводит к появлению концентрации напряжений в окрестности этих дефектов (рис. 4).

При растяжении напряжением  $\sigma_0$  плоскости, имеющей эллиптический вырез с полуосями  $l$  и  $b$  ( $l > b$ ) (рис. 4, а), максимальные напряжения на концах поперечного выреза определяются формулой [20]:

$$\sigma_{y \max} = \sigma_0 (1 + 2l/b). \tag{1}$$

Напряжения в вершине острой трещины с радиусом кривизны  $\rho = b^2 / l$  рассчитываются по формуле

$$\sigma_{y \max} = \sigma_0 (1 + 2\sqrt{l/\rho}). \tag{2}$$

Тогда коэффициент концентрации напряжений  $K = \sigma_{y \max} / \sigma_0$  может быть найден по формуле

$$K = \sigma_{y \max} / \sigma_0 = 1 + 2l/b = 1 + 2\sqrt{l/\rho}. \tag{3}$$

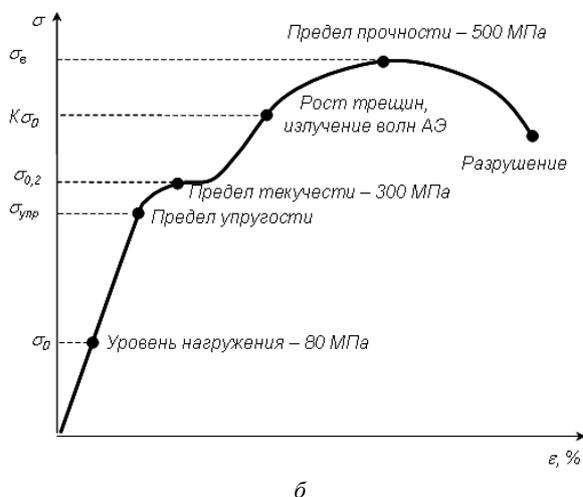
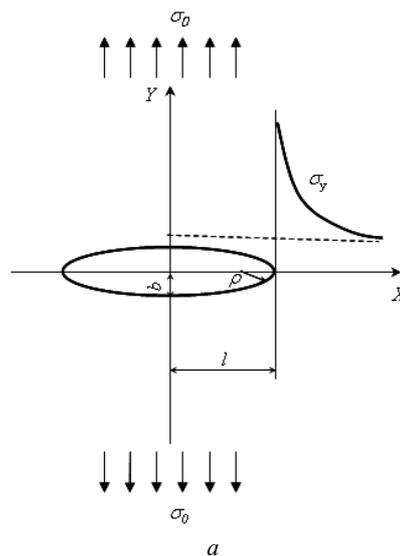


Рис. 4. Концентрация напряжений  $\sigma_y$  при одноосном растяжении пластины с эллиптическим вырезом (а), диаграмма механического нагружения образца из стали 20Л при наличии дефекта (б)

При этом основной (бездефектный) материал детали работает в упругой области  $\sigma_0$ , а напряжения в зоне дефекта с высокой концентрацией напряжений могут находиться за пределом текучести  $K\sigma_0$  (рис. 4, б), вследствие чего происходит рост трещин и излучение АЭ-волн.

Обработка сигналов АЭ с использованием специализированного программного обеспечения позволяет определить его местоположение, т. е. локализовать дефект, оценить его основные параметры и классифицировать обнаруженный дефект по степени опасности [18].

- Основные задачи АЭ-контроля включают в себя:
- обнаружение источника и регистрацию сигналов АЭ;
  - определение координат источника АЭ;
  - определение класса источника АЭ.

К основным преимуществам метода АЭ относят следующие.

1. Высокая чувствительность метода АЭ к дефектам [19]. Предельная чувствительность акустико-эмиссионной аппаратуры по расчетным оценкам составляет порядка  $1 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>2</sup>, что соответствует выявлению скачка трещины протяженностью 1 мкм на 1 мкм.

2. Метод АЭ обеспечивает обнаружение и регистрацию развивающихся или склонных к росту дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени опасности [18, 19]. В отличие от других методов контроля, АЭ обнаруживает только развивающиеся (растущие) дефекты.

3. Свойство дистанционности обеспечивает обнаружение дефектов и определение их координат в недоступных для сканирования областях и на больших расстояниях от ОК до аппаратуры АЭ [4, 21].

4. Свойство интегральности обеспечивает контроль всего объекта без сканирования с использованием одного или нескольких преобразователей, неподвижно установленных на поверхности объекта [8].

5. Метод АЭ позволяет обнаруживать как поверхностные, так и внутренние дефекты в материале объекта вне зависимости от их ориентации [19].

6. Меньшее количество ограничений, связанных со структурой и свойствами материала (меньшие требования по контроледоступности и контролепригодности) [19].

7. Комплексный характер метода АЭ, включающий подходы с позиций металловедения, механики разрушения, теории колебаний и волн, теории сигналов, теории случайных процессов [20, 22].

8. Возможность проведения контроля в реальном масштабе времени опасных производственных объектов в процессе эксплуатации [17].

9. Высокое отношение эффективности/стоимость контроля.

К ограничениям метода АЭ относят:

1. Необходимость механического нагружения конструкции [10].

2. Сложность выделения полезных сигналов АЭ на фоне высокого уровня механических шумов и электрических помех и необходимость использования специальных методов борьбы с шумами и помехами [6].

3. Невозможность обнаружения дефектов в областях с недостаточным уровнем механического нагружения [3].

4. Сложность интерпретации сигналов АЭ при оценке степени опасности источников [22].

5. Метрологической особенностью метода является невозможность воспроизведения результатов контроля при повторных испытаниях (в частности, ограничения, связанные с эффектом Кайзера) [23].

На рис. 5 представлены результаты металлографического анализа литых деталей с дефектами, обнаруженными при проведении АЭ-контроля, но не выявленными традиционными методами НК: развивающиеся трещины в местах дефектов литья над опорной поверхностью буксового проема боковой рамы; усталостные трещины на поверхности радиуса R55 боковых рам.

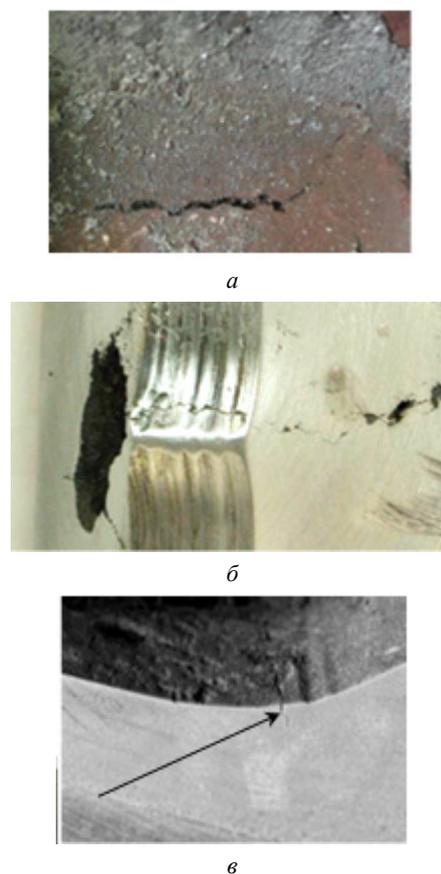


Рис. 5. Обнаруженные методом АЭ горячие трещины (а), трещины от раковины (б) и усталостные трещины (в) в буксовом проеме боковой рамы

### Рост усталостных трещин

Зависимость скорости роста усталостной трещины  $dl/dN$  от размаха коэффициента интенсивности напряжений цикла  $\Delta K$  описывается диаграммой усталостного разрушения (рис. 6), состоящей из трех стадий.

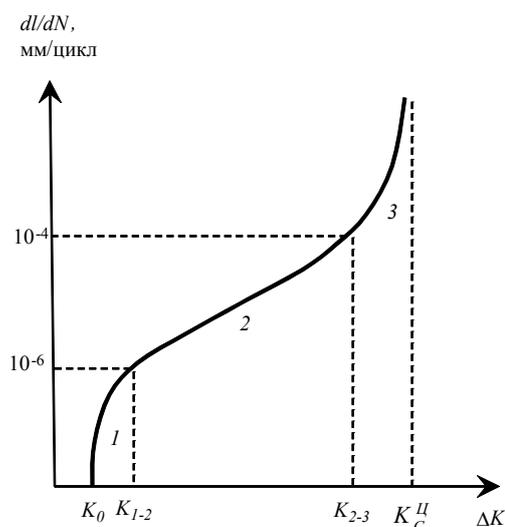


Рис. 6. Диаграмма усталостного разрушения: 1 – низкая скорость роста трещины; 2 – средняя скорость (область Париса); 3 – высокая скорость роста

– первая стадия соответствует низким скоростям роста усталостных трещин (менее  $10^{-5}$  мм/цикл);

– вторая стадия – равномерный рост трещины – описывается уравнением Пэриса;

– третья стадия – область высоких скоростей роста трещины, где коэффициент интенсивности напряжений приближается к критическому значению  $K_C^{II}$  (циклическая вязкость разрушения), при котором образец разрушается.

Рассмотрим процесс развития усталостных трещин при эксплуатации боковой рамы, используя диаграмму усталостного разрушения в области Пэриса, описываемой формулой

$$dl/dN = B(\Delta K/A)^n. \quad (4)$$

Значения показателя степени  $n = 3,3$  и коэффициентов  $B = 1,03 \cdot 10^{-7}$  м/цикл,  $A = 27,2$  МПа·м<sup>1/2</sup> в формуле (4) соответствуют параметрам, характеризующим кинетику прироста усталостных трещин на втором участке диаграмм усталостного разрушения многих конструкционных сталей [20–24].

Коэффициент интенсивности напряжений зависит от уровня нагружения объекта, определяется геометрией образца и длиной начальной трещины, являющейся концентратором напряжений. В простейшем случае трещины аналогичной усталостной, нагружаемой растягивающей силой, может быть использована следующая формула для коэффициента интенсивности напряжений в направлении роста трещины:

$$\Delta K = 2\sigma\sqrt{l/\pi}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – приложенное напряжение;  $l$  – длина трещины.

На графике рис. 7, а представлена кривая усталостного разрушения боковой рамы, построенная с использованием формул (4) – (5). За максимальное значение напряжения во внутреннем угле буксового проема боковой рамы тележки модели 18-100 в условиях циклического нагружения принято значение  $\sigma_0 \approx 80$  МПа [20]. При этом максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений, соответствующее предельной длине трещины ( $l_{\max} = 25$  мм), составляет  $\Delta K \approx 13$  МПа м<sup>1/2</sup>. Рассчитанное значение удовлетворительно согласуется с пороговым значением коэффициента интенсивности напряжений, полученным другими авторами. Видно, что скорость роста трещины меняется от  $dl/dN = 10^{-10}$  м/цикл при  $\Delta K = 3$  МПа м<sup>1/2</sup> до  $dl/dN = 10^{-8}$  м/цикл при  $\Delta K = 13$  МПа м<sup>1/2</sup>.

На основании диаграммы усталостного разрушения (рис. 7, а) могут быть построены зависимости абсолютной длины и скорости роста усталостной трещины от числа циклов нагружения (рис. 7, б и 8, а). Указанные кривые роста усталостной трещины (рис. 7, б) описываются известной степенной зависимостью:

$$l = aN^k, \quad (6)$$

где  $l$  – длина трещины;  $N$  – число циклов;  $a$  и  $k$  – числовые коэффициенты.

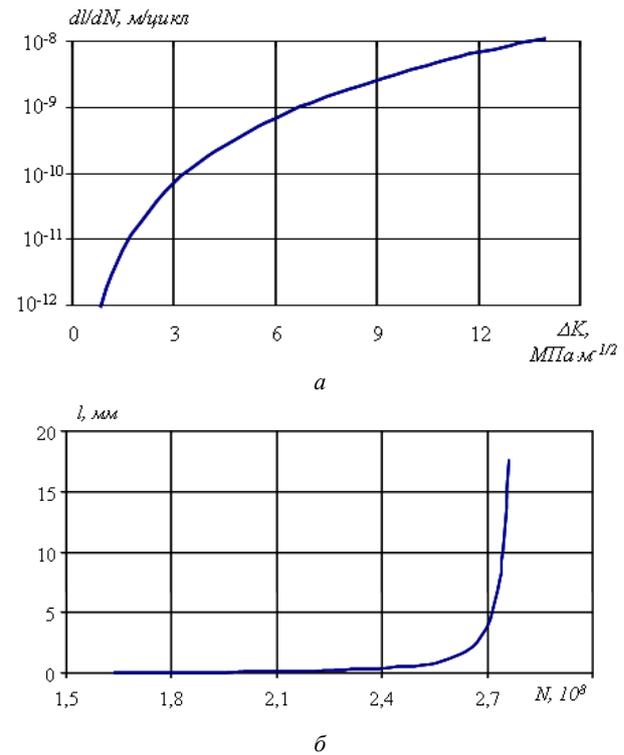


Рис. 7. Кинетическая диаграмма усталостного разрушения (а), зависимость длины усталостной трещины от числа циклов нагружения (б)

Кривые рис. 7, б и 8, а построены при условии минимальной начальной длины трещины ( $l_0$  составляет доли мкм). При этом максимальное число циклов нагружения до разрушения, когда абсолютная длина трещины достигает максимального значения  $l_0 = 25$  мм (выходит на внутреннюю поверхность коробчатого сечения), достигает значения  $\sim 2,7 \times 10^8$  циклов.

При начальной длине трещины в диапазоне  $l_0 = 0,5 \div 6$  мм коэффициент интенсивности напряжений принимает значения  $0,5 \div 5$  МПа·м<sup>1/2</sup> (рис. 7). При этом, согласно рис. 8, а, скорость роста трещины находится в диапазоне  $10^{-10} \div 10^{-9}$  м/цикл, что позволяет оценить количество циклов, накопленная энергия которых достаточна для скачка трещины на один шаг бороздки. В предположении, что средний шаг бороздки трещины составляет  $\sim 0,1$  мкм, прирост трещины на один скачок происходит за каждые  $\sim 1$  000 циклов на начальном этапе разрушения (для трещин с малой начальной длиной), за каждые 100 циклов для трещин больших размеров.

Рис. 8, б иллюстрирует характер уменьшения циклической долговечности боковых рам в случае наличия в объекте начальной трещины длиной  $l_0$ . Так, существование начальной трещины длиной  $l_0 = 0,5$  мм уменьшает число циклов до разрушения до значения  $0,4 \times 10^8$ , а трещина длиной 3 мм – более чем на порядок (до  $1,5 \times 10^7$ ).

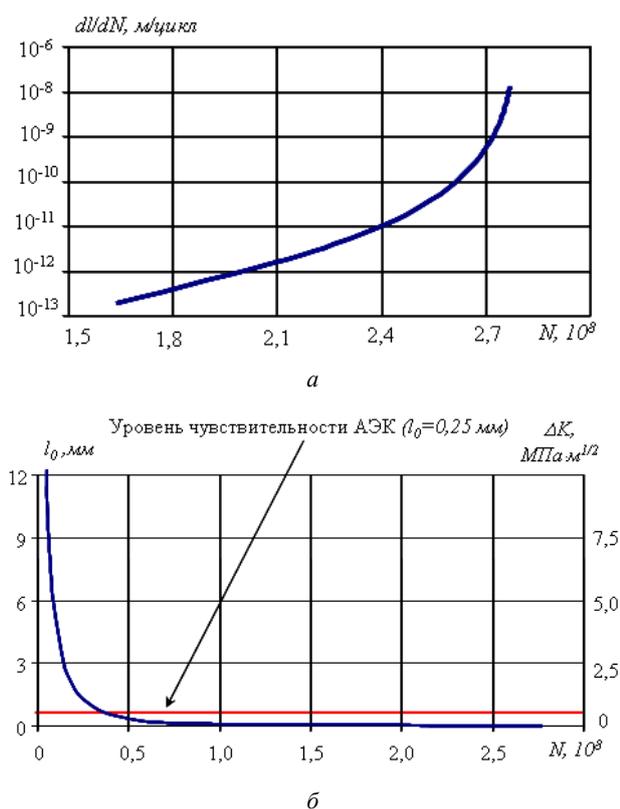


Рис. 8. Зависимость скорости роста усталостной трещины (а) и длины начальной трещины от числа циклов нагружения (б)

Рассмотрим возможности использования полученной зависимости для прогнозирования срока службы детали [25, 26]. Считая, что годовой пробег грузового вагона составляет  $\sim 100$  тыс. км, что соответствует средней годовой скорости движения состава 11 км/час, и каждый цикл нагружения соответствует длине рельса ( $\sim 25$  метров) или частоте  $\sim 0,12$  Гц, среднее число циклов для годового пробега составляет  $\sim 4 \times 10^6$  циклов или  $\sim 1 \times 10^7$  циклов до проведения ТО-3.

Согласно зависимости рис. 8, б, деталь с начальным очагом дефекта длиной 5 мм должна разрушиться по малоциковому механизму еще до проведения ТО-3. Предельная чувствительность АЭ-метода по длине трещины в  $l_0 = 0,25$  мм позволяет предсказать разрушение детали за  $\sim 4 \times 10^7$  циклов или за  $\sim 4$  года до разрушения. Ресурс детали может быть продлен еще на 2,5 года, т. е. до проведения следующего ТО, если в нем имеются начальные очаги разрушения с размером не более 2 мм.

Приведенные оценки предельной чувствительности акустико-эмиссионного контроля литых деталей тележки грузового вагона получены при ряде допущений и могут отличаться от действительных значений вследствие различных условий эксплуатации детали (уровень, характер, асимметрия нагружения, условия окружающей среды, характеристики пути и др.).

На основании изложенного для разрешения проблемы сходов и крушений в ОАО «РЖД» принято решение о расширении объемов использования

АЭ-метода диагностирования не только при продлении срока службы каждой детали с истекшим сроком эксплуатации, но и при техническом освидетельствовании после 240 тыс. км пробега, что соответствует 2-летнему сроку эксплуатации. Техническое освидетельствование и продление срока службы боковых рам и надрессорных балок тележек грузовых вагонов производится согласно схеме рис. 9.

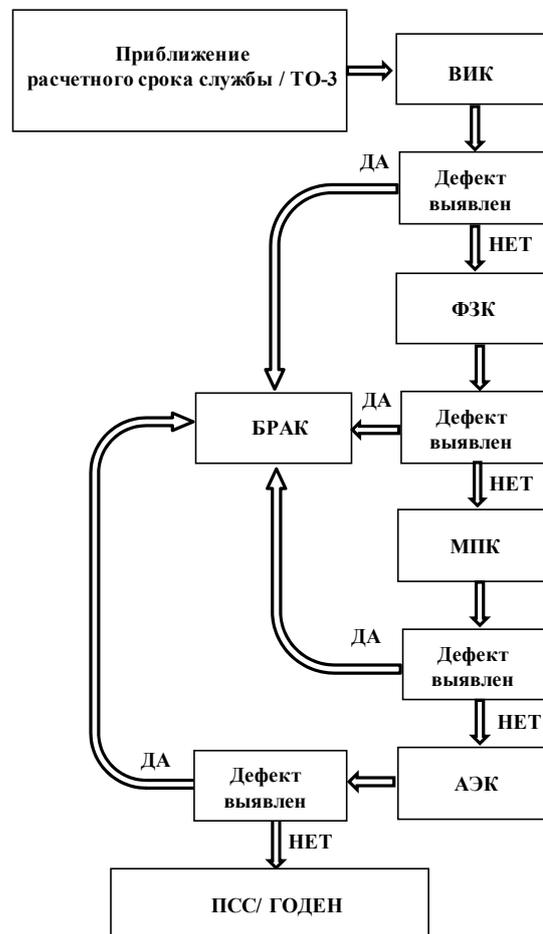


Рис. 9. Схема ресурсных испытаний литых деталей тележек грузовых вагонов

Для обеспечения технологического процесса ресурсных испытаний литых деталей тележек грузовых вагонов организована система сертификации специалистов по акустико-эмиссионному методу контроля на железнодорожном транспорте [27, 28].

### Выводы

Результаты десятилетней эксплуатации акустико-эмиссионных стендов для неразрушающего контроля литых деталей грузовых вагонов показали высокую эффективность и производительность АЭ-метода. Статистика ранних изломов говорит о низком качестве поставляемых литых деталей на железнодорожный транспорт. Быстрое развитие трещин по малоциковому механизму основано на наличии концентраторов напряжений металлургического происхождения. Обосновывается характер напряженного состояния вблизи вершины трещины

в области внутреннего угла буксового проема боковой рамы, а также размеры начальных очагов и уровень механических напряжений, достаточный для излучения волн АЭ. Приведены расчеты влияния начальной длины трещины в детали на ее циклическую долговечность. На основе анализа диаграммы усталостного разрушения с привлечением коэффициента концентрации напряжений в зоне дефектов и коэффициента интенсивности напряжений для детали с острой трещиной обоснована эффективность использования стенов для выявления трещин на ранней стадии эксплуатации деталей.

#### Библиографические ссылки

1. Малогабаритная многоканальная информационно-измерительная система / А. Н. Серьезнов, Е. Ю. Лебедев, С. И. Кабанов и др. // Дефектоскопия. – 1995. – № 11. – С. 82–85.
2. Мультиплицированная многоканальная акустико-эмиссионная система / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова и др. // Дефектоскопия. – 1996. – № 8. – С. 71–76.
3. Испытания боковых рам и наддресорных балок грузовых вагонов акустико-эмиссионным методом / К. Л. Комаров, А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев и др. // Дефектоскопия. – 1997. – № 1. – С. 41–45.
4. Локализация сигналов акустической эмиссии в металлических конструкциях / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова и др. // Дефектоскопия. – 1997. – № 10. – С. 79–84.
5. Быстродействующая диагностическая акустико-эмиссионная система / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова и др. // Дефектоскопия. – 1998. – № 7. – С. 8–14.
6. Экспериментальное установление связи спектра сигнала АЭ с длиной усталостной трещины в стальных образцах / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова и др. // Дефектоскопия. – 1999. – № 2. – С. 73–78.
7. Связь спектра сигналов АЭ с процессом усталостного развития трещин в металлических образцах / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова и др. // Контроль. Диагностика. – 1999. – № 2. – С. 5–8.
8. Расчетно-экспериментальный АЭ метод определения координат дефектов в металлических конструкциях / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова и др. // Дефектоскопия. – 2000. – № 6. – С. 71–79.
9. Многоканальная акустико-эмиссионная система диагностики конструкций : пат. 2217741 Рос. Федерация от 13.03.2001 / Степанова Л. Н., Серьезнов А. Н., Круглов В. М., Муравьев В. В. – Бюл. № 33 ; 27.11. 03. Москва, ФИПС. – 18 с.
10. Комаров К. Л., Муравьев В. В., Степанова Л. Н. Комплекс акустико-эмиссионного контроля // Железнодорожный транспорт. – 2002. – № 10. – С. 60–61.
11. Опыт применения акустико-эмиссионного метода для контроля серповидных подвесок локомотива / В. Н. Пустовой, В. А. Гапанович, В. В. Муравьев и др. // В мире неразрушающего контроля. – 2002. – № 1. – С. 57–60.
12. Акустико-эмиссионный комплекс для контроля колец подшипников локомотива / В. Н. Пустовой, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова и др. // Контроль. Диагностика. – 2002. – № 6. – С. 42–45.
13. Контроль продольных несущих балок мостовых пролетных строений / В. В. Муравьев, Е. В. Бояркин, К. В. Власов и др. // В мире неразрушающего контроля. – 2003. – № 4. – С. 22–24.
14. Акустико-эмиссионный контроль котлов железнодорожных цистерн / В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, А. Л. Бобров и др. // В мире неразрушающего контроля. – 2004. – № 4. – С. 69–72.
15. Акустико-эмиссионный контроль колесных пар грузовых вагонов / В. В. Ивлиев, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев и др. // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 1. – С. 15–20.
16. Муравьев В. В., Муравьев М. В., Муравьев Т. В. К возможности диагностирования рельсов в эксплуатации акустико-эмиссионным методом // Дефектоскопия. – 2008. – № 1. – С. 42–50.
17. Акустико-эмиссионный контроль тягового хомута автосцепного устройства грузового вагона / В. В. Муравьев, С. А. Грассман, В. В. Ивлиев и др. // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – № 3. – С. 76–78.
18. Муравьев В. В., Степанова Л. Н., Кареев А. Е. Оценка степени опасности усталостных трещин при акустико-эмиссионном контроле литых деталей тележки грузового вагона // Дефектоскопия. – 2003. – № 1. – С. 63–68.
19. Оценка возможностей метода акустической эмиссии при контроле магистральных трубопроводов / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, В. Н. Сергеев и др. // Дефектоскопия. – 2000. – № 2. – С. 29–36.
20. Муравьев В. В., Муравьева О. В. Чувствительность метода акустической эмиссии к развивающимся трещинам в боковых рамах тележек грузовых вагонов // В мире неразрушающего контроля. – 2011. – № 2. – С. 27–31.
21. Муравьев В. В., Муравьев М. В., Бехер С. А. Применение новой методики обработки сигналов АЭ для повышения точности локализации дефектов // Дефектоскопия. – 2002. – № 8. – С. 53–65.
22. Смирнов А. Н., Муравьев В. В., Васильев А. Г. Влияние структурно-механического состояния стали 12Х1МФ на параметры сигналов акустической эмиссии при высокотемпературном деформировании // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1997. – № 2. – С. 112–115.
23. Буденков Г. А., Недзвецкая О. В., Котоломов А. Ю. Количественные оценки процесса роста трещин на базе явления акустической эмиссии // В мире неразрушающего контроля. – 2001. – № 2. – С. 16–19.
24. К расчету акустического тракта при акустико-эмиссионном контроле днищ стальных вертикальных резервуаров / О. В. Недзвецкая, Г. А. Буденков, А. В. Соколкин и др. // Дефектоскопия. – 2003. – № 10. – С. 55–66.
25. Ультразвуковой контроль накопления усталостных повреждений и восстановление ресурса деталей / Л. Б. Зуев, В. Я. Целлермаер, В. Е. Громов и др. // Журнал техн. физики. – 1997. – Т. 67, № 9. – С. 123–125.
26. Зуев Л. Б., Муравьев В. В., Данилова Ю. С. О признаке усталостного разрушения сталей // Письма в Журнал техн. физики. – 1999. – Т. 25, № 9. – С. 31–34.
27. Муравьев В. В. Подготовка специалистов по НК в Сибирском государственном университете путей сообщения // В мире неразрушающего контроля. – 2001. – № 2. – С. 61.
28. Муравьев В. В., Кutowой В. П. Подготовка специалистов в области стандартизации, метрологии и сертификации в СГУПС // Стандартизация, метрология, сертификация на ж.-д. транспорте / Информационное издание ЦНИИТЭИ. Вып. 1. – М., 2002. – С. 82–86.

\* \* \*

V. V. Muravyev, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

#### Analysis of operation of acoustic emission stands to control cast parts of trucks of railway freight cars

The paper presents the results of 10-year operation of acoustic emission stands for non-destructive control of cast parts of freight cars. The mechanism of crack development is proved to be low-cycle for newly manufactured solebars when stress concentrators with assigned dimensions are present. The efficiency of applying stands is grounded to detect cracks at the early stage of solebars operation due to the large number of metallurgical defects undetected at manufacturing plants.

**Keywords:** acoustic emission, fatigue, breaks of freight cars solebars, lifetime

Получено: 25.04.13

УДК 620.183+620.179.16

V. V. Муравьев, доктор технических наук, профессор;  
O. B. Муравьева, доктор технических наук, профессор;  
A. B. Байтеряков, магистрант;  
A. И. Дедов, аспирант  
Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СТРУКТУРНЫХ ШУМОВ МЕТАЛЛА\*

Обоснована методика оценки акустических структурных шумов металла. Представлены экспериментальные результаты ее использования для определения размера зерен стали 45.

**Ключевые слова:** акустические структурные шумы, структуроскопия, рассеяние ультразвуковых волн, размер зерна

#### Введение

Большинство объектов неразрушающего контроля – поликристаллические твердые тела, каждое зерно которых представляет собой монокристалл (кристаллит), обладающий упругой анизотропией, которая вызывает рассеяние акустических волн в поликристаллическом твердом теле вследствие отражения, преломления и трансформации акустических волн на границах зерен. В процессе технологических операций при производстве изделия (литье, обработка давлением, термическая обработка и др.) и в процессе жизненного цикла структура металла может существенно изменяться вследствие появления неоднородностей, анизотропии, вызванной текстурой металла, повреждений структуры [1–3]. Последние могут служить индикатором необратимых изменений, накопленных в материале. Поэтому определение фактического структурного состояния материала изделий является одним из актуальных направлений структуроскопии в неразрушающем контроле.

Большинство методов оценки структурного состояния металла основано на измерении скорости распространения [4–6] или затухания ультразвуковых (УЗ) волн [7–9]. В последнее время для целей структуроскопии применяют электромагнитно-акустический метод возбуждения и регистрации ультразвуковых волн [10–13], имеющий существенное преимущество – бесконтактность в отличие от контактных методов [14–16]. Исследования влияния величины зерна на скорость распространения аку-

стических волн в разных металлах и сплавах представлены в [17, 18]. Особый интерес представляют исследования влияния структурных повреждений на акустические характеристики [19, 20]. Используемые методы имеют ряд ограничений в применении, обусловленных недостаточной чувствительностью, влиянием ряда мешающих факторов на результаты контроля [21, 22].

В статье представлен новый подход к структуроскопии металла, основанный на использовании в качестве информативного параметра усредненного значения амплитуды структурных шумов.

#### Используемые подходы

Структурный шум связан с рассеянием УЗ-волн на структурных неоднородностях, зернах материала. В отдельном кристалле упругие модули (а следовательно, скорости распространения волн) различаются в зависимости от кристаллографического направления. Так как кристаллические решетки зерен в поликристаллическом теле ориентированы хаотически друг относительно друга, то на границах зерен происходит частичное отражение, преломление и трансформация УЗ-волн. Акустическая волна, распространяясь в такой среде, порождает рассеянные волны, которые, распространяясь в произвольных направлениях, «не поддерживают» основной волновой поток (рис. 1, а).

Коэффициент затухания УЗ-волны, вызванный рассеянием  $\delta_a$ , зависит от соотношения между длиной волны  $\lambda$  и средним размером зерна  $D_g$  (рис. 1, б).

© Муравьев В. В., Муравьева О. В., Байтеряков А. В., Дедов А. И., 2013

\* Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН (проект № 12-У-2-1013), Программы стратегического развития ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» на 2012–2016 (проект ПСР/М2/Н2.5/МВВ).