

# **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ (АПМАЭ-2018)**

**Всероссийская конференция с международным участием**

**Тольятти, 28 мая – 1 июня 2018 года**

**Сборник материалов**



Министерство образования и науки Российской Федерации

Межгосударственный координационный совет  
по физике прочности и пластичности материалов

Российское общество по неразрушающему контролю  
и технической диагностике

Объединенный экспертный совет по проблемам  
метода акустической эмиссии

Научно-исследовательский отдел «Физика прочности  
и интеллектуальные диагностические системы»  
НИИПТ Тольяттинского государственного университета

**«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТОДА  
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ»  
(АПМАЭ-2018)**

Всероссийская конференция с международным участием

(Тольятти, 28 мая – 1 июня 2018 года)

Сборник материалов

Тольятти  
Издательство ТГУ  
2018

УДК 620.179.17  
ББК 34.44  
А437

Рецензенты:  
д-р техн. наук *В.И. Иванов*;  
канд. техн. наук *С.В. Елизаров*.

Редакционная коллегия:  
д-р физ.-мат. наук, профессор Д.Л. Мерсон,  
канд. физ.-мат. наук, Dr. Eng. А.Ю. Виноградов – отв. редакторы;  
канд. техн. наук Е.В. Черняева – отв. за выпуск сборника.

**А437** Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018) : Всероссийская конференция с международным участием (Тольятти, 28 мая – 1 июня 2018 года) : сборник материалов / отв. ред. Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2018. – 181 с. : обл.

В сборнике опубликованы материалы, представленные на Всероссийскую конференцию с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии», посвященные вопросам явления акустической эмиссии (АЭ) при пластической деформации и разрушении различных материалов; методическим вопросам регистрации и обработки акустико-эмиссионной информации; неразрушающему контролю ответственных конструкций и их элементов с помощью метода АЭ; нормативной документации и подготовке специалистов в области метода акустической эмиссии.

Предназначен для специалистов в области метода АЭ, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

УДК 620.179.17  
ББК 34.44

Проведение конференции поддержано Российским фондом фундаментальных исследований, Грант № 18-08-20035.

Рекомендовано к изданию Научно-исследовательским институтом прогрессивных технологий Тольяттинского государственного университета.

ISBN 978-5-8259-1268-4

© Мерсон Д.Л. – научный  
руководитель конференции, 2018  
© ФГБОУ ВО «Тольяттинский  
государственный университет», 2018

# МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И МОДЕЛИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ - ОСНОВЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА

**Махутов Н.А.**

*РАН, ИМАШ РАН, ООО «НИИ Транснефть», Москва, Россия,  
[kei51@mail.ru](mailto:kei51@mail.ru)*

## **1. Постановка проблем**

Техническая диагностика объектов техносферы высокой потенциальной опасности становится важным составным элементом количественного анализа прочности, ресурса, надежности, живучести несущих элементов этих объектов. Принципиально новые требования к безопасности и рискам критически важных объектов техносферы будут становиться мониторинг их состояния по комплексу указанных выше критериев.

Использование представлений и моделей линейной и нелинейной механики разрушения при создании методик и критериев оценки результатов акустико-эмиссионного диагностирования и мониторинга позволяет получить важную информацию о техническом состоянии и техногенной безопасности диагностируемого критического элемента и объекта в целом. Ни один из существующих методов неразрушающего контроля, технической диагностики и мониторинга не дает пока всей необходимой информации о развивающихся деформациях, повреждениях и дефектах в реальном времени.

Фундаментальные соотношения, связывающие параметры акустической эмиссии с параметрами механики разрушения, представляет уникальную возможность объединить методики неразрушающего контроля, технической диагностики и мониторинга и подходы инженерной механики разрушения. В результате этого синергетического взаимодействия возникает новое качество, выражающееся в том, что появляется возможность непосредственно в реальном времени получить информацию о возникновении и развитии опасных состояний объекта и количественно оценить возможность его разрушения и сопутствующие ущербы, являющимися ключевыми параметрами риска и безопасности.

Однако достигнутые к настоящему времени возможности метода акустической эмиссии пока недостаточны для полномасштабного использования всех преимуществ и прогностических возможностей метода при расчетно-экспериментальной оценке промышленной безопасности. При этом важно указать на необходимость получения совокупных показателей достоверности контроля, диагностирования и мониторинга для определения, нормирования количественных показателей фактических и приемлемых рисков аварии при обосновании работоспособности наиболее сложных и ответственных объектов и предотвращения их внезапного разрушения, ведущего к тяжелым авариям и катастрофам.

Настоящая конференция, подводя итоги ряда научных исследований и практических разработок, имеет своей целью наметить пути дальнейшего развития как самого метода акустической эмиссии, так и его приложений в современных отраслях промышленности гражданского и оборонного назначения.

## **2. Основы акусто-эмиссионной технической диагностики состояния и безопасности объектов**

В проблемах анализа, регулирования, обеспечения и повышения промышленной безопасности вопросы технической диагностики состояний опасных производственных объектов имеют исключительно важное значение. В отечественной и мировой практике к настоящему времени созданы, разработаны десятки фундаментальных методов тех-

нической диагностики на различных механических, физических, оптических, акустических, электрических, электронных, электромагнитных, радиационных принципах.

В рамках практической реализации этих методов созданы сотни систем и тысячи средств проведения диагностических многопараметрических измерений.

С позиций промышленной безопасности первостепенную роль играют те методы, системы и средства диагностики состояния  $D_s(\tau)$ , которые позволяют решать три исходные основные задачи:

- оценить и установить параметры возникшего в данный момент  $\tau_i$  техническое состояние критических элементов объекта (напряжения  $\sigma(\tau_i)$ , деформации  $e(\tau_i)$ );
- измерить и оценить параметры дефектов  $\ell(\tau_i)$ , существующих в несущих сечениях критического элемента в этот момент;
- учесть и оценить влияние характеристик механических свойств конструкционных материалов – прочности  $\sigma_{\tau}(\tau_i)$ ,  $\sigma_{\text{в}}(\tau_i)$  и пластичности  $\psi_K(\tau_i)$  на техническое состояние.

Тогда диагностический параметр состояния  $D_s(\tau_i)$  будет выражен в форме

$$P_{ds}(\tau_i) = F\{\sigma(\tau_i), e(\tau_i), \ell(\tau_i), \sigma_{\tau}(\tau_i), \psi_K(\tau_i)\} \quad (1)$$

Для перехода от диагностического параметра к диагностике безопасности объекта  $S_d(\tau)$  необходимо непрерывное или дискретное проведение измерений параметров в  $P_{ds}$  во времени  $\tau$  по (1)

$$S_d(\tau) = F_s\{P_{ds}(\tau)\} \quad (2)$$

Реализация перехода от диагностики состояний по (1) к диагностике безопасности по (2) осуществляется по мере приближения состояния объекта и времени его эксплуатации к критическому значению

$$P_{ds}(\tau) \rightarrow P_{ds}(\tau_K) \text{ и } \tau \rightarrow \tau_K \quad (3)$$

Из указанных выше методов, систем и средств диагностики по выражениям (1) – (3) очень немногие (измеряемые единицами) способны дать в определенной степени интегральную информацию о состоянии и безопасности объектов.

К таким методам в нашей стране можно отнести:

- натурную тензо-термо-вибро-дефектометрию (фундаментальные разработки ИМАШ РАН);
- голографию и термовидение (фундаментальные разработки НПО «Спектр»);
- акустическую эмиссию (фундаментальные разработки НИЦ КИ, НПО «Спектр», ЦНИИТМАШ).

Результаты комплексных исследований и разработок указанных проблем с учетом (1) – (3) нашли своё отражение в обобщающих материалах [1 - 2].

Область теоретических и практических разработок акусто-эмиссионной диагностики состояний и безопасности вынесена как основной предмет настоящей конференции.

## Список литературы

1. Махутов Н.А., Гаденин М.М. Техническая диагностика остаточного ресурса и безопасности: учебное пособие / под общ. ред. В.В. Клюева. - М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 187 с.: ил. – (Диагностика безопасности).
2. Труды I – IV Международных промышленных форумов «Территория NTD», Москва, Россия.

# ТОЛЬЯТТИНСКАЯ ШКОЛА МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ: ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Мерсон Д.Л.

ТГУ, г. Тольятти, Россия,  
[d.merson@tltu.ru](mailto:d.merson@tltu.ru)

Начало зарождения тольяттинской научной школы в области метода акустической эмиссии (далее ТШАЭ), можно отнести к 1980 г., когда по инициативе ученого мирового уровня М.А. Криштала был приобретен один из самых современных на тот момент приборов для регистрации акустической эмиссии (АЭ): АВН-3 производства Хабаровского НИИФТРИ. Изначально метод АЭ предполагалось использовать, главным образом, в качестве тонкого инструмента для изучения структурных преобразований в материалах, контролируемых движением дислокаций. И уже буквально через год в престижном журнале ДАН СССР в 3-м номере за 1982 году была опубликована статья, посвященная АЭ в процессе растекания поверхностно-активных веществ по железу (эффект Ребиндера) [1].

С тех пор в Тольяттинском политехническом институте (ныне Университете, ТГУ) это научное направление, в основном, благодаря стараниям Д. Мерсона, непрерывно и активно развивается, а еще большее ускорение оно получило в 2010 году, когда в связи с победой в мегагранте по Постановлению Правительства РФ № 220 на работу в ТГУ вернулся А. Виноградов, проработавший почти 20 лет в ведущих университетах Японии.

За прошедшие без малого 40 лет представителями ТШАЭ по тематике, связанной с АЭ, защищены десятки диссертаций и опубликованы сотни научных работ. Приведем некоторые, на наш взгляд, наиболее важные результаты, которые можно сгруппировать в несколько блоков.

1). Работы фундаментального плана, направленные на установление природы АЭ при деформационных процессах в металлах и сплавах:

- установлено, что отрыв дислокаций от точек закрепления не вносит существенный вклад в АЭ [2];

- экспериментально доказано и подтверждено теоретическими расчетами, что пик АЭ, наблюдаемый при деформировании металлических материалов в области перехода упругой стадии к пластической, связан с выходом дислокаций на поверхность [3-5], в частности, показано, что высота мощность указанного пика пропорциональна площади поверхности, а не площади сечения (объема), образцов;

- на экспериментах с моно- и бикристаллами установлено, что граница зерен может выступать не только барьером для движущихся дислокаций, но и служить источником свежих дислокаций, тем самым, повышая уровень АЭ [6-7];

- установлено, что в процессе царапания поликристаллов меди при последовательном пересечении индентором случайно ориентированных зерен, сигналы АЭ связаны с рождением полос скольжения перед индентором, а их энергоспектральные характеристики индивидуальны для каждого зерна и определяются их кристаллографической ориентацией [8-9];

- показано, что распределение амплитуд сигналов АЭ, связанных с образованием двойников, коррелирует с распределением зерен по размерам [10].

- на модельных материалах установлено влияние энергии образования дефектов упаковки на параметры АЭ [11-12];

2). Работы, направленные, на исследование природы деформационных процессов в металлических материалах:

- с помощью анализа АЭ показано, что при деформировании сплавов АМг в условиях проявления прерывистой текучести зубцы типа А и В имеют одинаковую природу [13-14];

- установлено влияние содержания углерода и режимов отпуска на особенности проявления пика АЭ в закаленных сталях [15-16];

- с помощью метода кластерного анализа в модельных сталях с ТРИП/ТВИП эффектом установлена стадийность работы различных источников АЭ: скольжение дислокаций, двойникование, деформационный мартенсит [17];

- с помощью метода АЭ установлены влияние химического состава и структуры магниевых сплавов на их поведение при статическом и циклическом нагружении [18-19].

### 3). Работы, посвященные оценке водородной повреждаемости сталей:

- установлено, что выдержка стальных материалов в сероводородсодержащих средах приводит к снижению пика АЭ в квазиупругой области деформаций, что объясняется наклепом материала под действием водорода [20];

- показано, что с помощью метода АЭ можно определять стадийность накопления повреждений в процессе наводороживания [21] и деформирования наводороженных высокопрочных сталей [22];

### 4). Работы по применению метода АЭ для решения трибологических задач:

- показано, что с помощью метода АЭ можно устанавливать механизмы износа в реальном времени, определять критически точки, соответствующие смене механизма износа, восстанавливать хронологию повреждаемости контактирующих материалов, резко сократить время испытаний и др. [23-25].

5). Работы, направленные на разработку методики регистрации АЭ при индентировании. Такая методика претендует на создание стандарта по испытанию материалов с записью АЭ, поскольку позволяет исключить влияние на АЭ геометрии испытуемых образцов и даже перейти на безобразцовые испытания, т.е. осуществлять испытания металла непосредственно на объекте контроля:

- определены оптимальные режимы индентирования: влияние скорости нагружения, типа индентора, АЧХ датчика АЭ и др. [26];

- показано, что спектральные характеристики сигналов АЭ при одноосном растяжении и индентировании принципиально не отличаются [27];

- установлена связь сигналов АЭ при индентировании различных материалов с содержанием водорода [28-29].

6). Работы по разработке алгоритмов обработки АЭ-информации и распознавания источников АЭ:

- разработана методика кластеризации сигналов АЭ по форме кривой мощности спектральной плотности [11, 30] и классификации источников АЭ адаптивным последовательным алгоритмом k-средних [31];

- разработаны методики детектирования АЭ событий в непрерывном случайном временном ряду: алгоритм «ф-функции» [32] и алгоритм «Phase Picker» [33], а также Байесовский подход к анализу сигналов АЭ, позволяющий автоматически определять моменты изменения динамики источников АЭ [34];

- отработаны методики спектрального шумоподавления (выделения «полезных» сигналов из шума) на базе алгоритмов: «Noise Gating» и «FFT-Filter» [35-36];

### 7). Работы, направленные на совершенствование техники АЭ-контроля:

- разработаны датчик АЭ повышенной надежности [37] и волновод с высокими теплорассеивающими характеристиками [38];

- разработан бесконтактный датчик, позволяющий регистрировать сигналы АЭ во вращающихся деталях [39];

- разработан и изготовлен универсальный стенд, содержащий основные типы опасных объектов, в которых физически смоделированы все основные виды дефектов, для изучения процессов генерации и распространения волн АЭ [40].

### Список литературы

1. Криштал М.А., Боргардт А. А., Лошкарев П.В. [ДАН СССР](#) (1982). Т. 267. № 3. С. 626.
2. Криштал М.А., Мерсон Д.Л. и др. ФММ (1988) Т. 66. Вып. 3 С. 599.
3. Криштал М.А., Мерсон Д.Л. и др. ФММ (1987). Т. 63. Вып. 5. С. 1011.
4. Merson D., Vinogradov A. and atc. *Materials science & engineering* (1997), A-234. P.587.
5. Мерсон Д.Л. Известия РАН. Серия физическая (2004) т.68, № 10. С.1477
6. A. Vinogradov, M. Nadochiy, and atc. *Materials Transactions JIM* 36(4) (1995) 496.
7. K. Kitagawa, Y. Kaneko, A. Vinogradov, *Materials Transactions Jim* 38(7) (1997) 607.
8. Danyuk A., Merson D., Vinogradov A. *Journal of Acoustic Emission*. (2014). 32. P. 68
9. Vinogradov A, Danyuk A, Merson D, Yasnikov I. *Scripta Materialia* 151 (2018) 53.
10. [Vinogradov A](#), [Vasilev](#), [Merson D](#), Estrin Yu. *Advanced Engineering Materials*. 2017. 19 (1).
11. Vinogradov A, Merson D. and atc. *Materials Science and Engineering*. (2003). A341. P. 57.
12. [Danyuk A.](#), [Merson D.](#) and atc. [Letters on Materials](#) (2017). № 4, , P. 437.
13. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. ФММ (1991) №10. С.187
14. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. ФММ (1996) т.81, Вып.1, С.156.
15. Ильина С.Г., Забильский В.В., Мерсон Д.Л. ФММ (1997). Т.83.-№5.-С.143.
16. Мерсон Д.Л., Черняева Е.В. Деформация и разрушение (2005). №5. С. 24-28.
17. Linderov M. and atc.. *Materials Science and Engineering: A*. (2014). Vol. 597. P. 183.
18. Vinogradov A., Vasilev E. and atc. *Materials Science and Engineering A* 2016. 676. P. 351.
19. [Vinogradov A](#), [Vasilev E](#), [Linderov M](#), [Merson D](#). *Metals*. 2016. 6 (12), 304
20. Мерсон Д.Л., Разуваев А.А., Тетюева Т.В. Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки (2000). Т.5. Вып. 2-3. С.365.
21. Merson D. and atc. *ISIJ International*, (2011), Vol. 51, No. 10, P. 1682.
22. Мерсон Е.Д. и др. Деформация и разрушение материалов (2012), № 9. С. 41.
23. Мерсон Д.Л. и др. Трение и смазка в машинах и механизмах (2007). №8. С.9.
24. [Rastegaev I.A.](#), [Merson D.L.](#), [Vinogradov A.](#) [International Journal of Microstructure and Materials Properties](#) (2014), 9, N. 3/4/5. P. 360.
25. Растегаев И.А., Мерсон Д.Л., Виноградов А.Ю., Данюк А.В. Заводская лаборатория. Диагностика материалов (2016), Том 82, № 3. С. 60.
26. Мещеряков Д.Е. Разработка основ методики неразрушающего контроля состояния металла, сочетающей методы индентирования и акустической эмиссии. Автор канд. диссертации Тольятти. 2009.
27. Мерсон Д.Л., Черняева Е.В., Мещеряков Д.Е. Известия Самарского научного центра РАН, спец. выпуск (2008) Вып.6. С.91.
28. Merson D., Mesheryakov D., Vinogradov A. *Progress in acoustic emission XIV*. The Japanese Society for NDI (2008). P. 115.
29. Черняева Е.В., Хаймович П.А. и др. ЖТФ (2011), том 81, вып. 4. С. 131.
30. Мерсон Д.Л., Разуваев А.А., Виноградов А.Ю. Дефектоскопия (2002), №7. С.37.
31. Pomponi E., Vinogradov A. *Mechanical Systems and Signal Processing* (2013). №2. С.791.
32. Аглетдинов Э.А., Виноградов А.Ю. «Вектор науки ТГУ». (2013). №3. С.23.
33. E. Pomponi, A. Vinogradov, A. Danyuk // *Signal Processing*.: – 2015. - №115. – С.110–119.
34. Agletdinov E., Pomponi E., Merson D., Vinogradov A. *Ultrasonics* 72 (2016) С.89.
35. Растегаев И.А., Данюк А.В. и др. Контроль. Диагностика (2014). № 8. С. 49.
36. Danyuk A., [Merson D.](#), [Vinogradov A.](#) *Journal of Acoustic Emission* (2014). 32. P. 68
37. Danyuk A, Rastegaev I, and atc. *Russian Journal of Nondestruct. Testing*. (2017) 53 (1). P.32.
38. Растегаев И.А., Мерсон Д.Л. и др. Дефектоскопия (2018), № 3, С. 20.
39. Патент № 119457 от 30.03.2012 г.
40. Растегаев И.А., Данюк А.В, Мерсон Д.Л., Виноградов А.Ю. Заводская лаборатория. Диагностика материалов (2016), т. 82. №7. С.56.

## АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДИАГНОСТИКА. ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ

**Иванов В.И.**

*НИИИИИ МНПО «Спектр», Москва, Россия,  
[ivi444@mail.ru](mailto:ivi444@mail.ru)*

Вопрос о статусе метода Акустической Эмиссии (АЭ) возник в нашей стране в 70-х XX века, когда в нескольких организациях началось интенсивное исследование АЭ при испытании лабораторных образцов применительно к анализу процессов разрушения. Достаточно быстро мы начали считать этот метод в качестве метода неразрушающего контроля (НК). Этому способствовали две основные причины. Первая связана с тем, что практическое применение в промышленности, а, следовательно, и максимальная поддержка ожидалась от промышленности. Вторая причина заключалась в том, что методы НК, которые также развивались через влияние промышленности, были лучше организованы. Повлияло также то, что в начале 90-х годов в стране была введена международная 3-х уровневая система квалификации контролеров и это помогало лучше и быстрее скоординировать усилия специалистов в общественных организациях. Отраслевые исследования были направлены на исследование возможности применения метода АЭ в промышленности. И это послужило интенсивным импульсом развития метода АЭ и применения его для контроля производственных объектов.

Метод АЭ развивается в двух основных направлениях:

I. Метод исследования физики и механики динамических процессов в твердом теле (а также потоках жидкости и газа).

II. Метод акустико-эмиссионного неразрушающего контроля (АЭ-НК).

Наше предложение - относить метод АЭ к методу технической диагностики (АЭ-ТД). Мы номинируем ТД как метод определения технического состояния объекта с целью оценки техногенной безопасности. Квалификация метода АЭ как метод АЭ-ТД позволяет уйти от уничижительного определения метода АЭ в качестве просто «пассивного» метода НК [1].

Метод АЭ является в настоящее время самым перспективным методом неразрушающего контроля и технической диагностики, поскольку непосредственно объединяет модели механики разрушения и методики неразрушающего контроля. Это синергетическое единство дает новое качество, делая метод АЭ наиболее мощным инструментом познания динамики физических процессов в механике разрушения, кроме того трансформирует его в метод ТД, что позволяет оценить состояние объекта в реальном времени, определить степень опасности дефектов и предотвратить разрушение объекта контроля.

В традиционных методах НК до недавнего времени задачи заключались в обнаружении дефектов и оценки их допустимости путем сравнения с нормами браковки. Т.е., выполнялась двухступенчатая операция при оценке состояния объекта: предварительный расчет нормы браковки и оценка его допустимости путем сравнения параметров дефекта после его обнаружения с нормами браковки. На каждой ступени неизбежно возникают ошибки, которые складываясь, создают достаточно большую неопределенность. В нормы браковки закладывались большие запасы прочности, поскольку неизбежные ошибки в моделях расчетов прочности, в отсутствии знания свойств материалов объекта. Однако в настоящее время благодаря развитию моделей МР и методик измерения параметров дефектов в НК (в особенности УЗК) появилась возможность расчетов вероятности разрушения, что явилось вызовом для АЭ-ТД.

В методе АЭ критерии оценки параметров источников АЭ основаны непосредственно на моделях механики разрушения, при этом также непосредственно в параметрах сигналов АЭ содержится информация о состоянии материалов контролируемого объекта. Однако развитие метода АЭК приостановилось и в настоящее время в большинстве методических документов на выполнение АЭК отсутствуют количественные критерии оценки состояния объекта. Примерами могут служить стандарт ASTM E569/E569M –13, где в течение более 20 лет источники АЭ делятся на три класса: неактивный, активный и критически активный. При этом, активный источник – тот, активность которого непрерывно увеличивается при увеличении параметра нагружения. А критически активен источник, скорость изменения активности которого увеличивается при увеличении параметра нагружения. Аналогичные критерии применяются в других стандартах ASTM.

В отечественных документах, применяемых в промышленности, используются количественные критерии, которые позволяют более точно определить степень опасности развивающегося дефекта. Несомненно, эти критерии еще будут корректироваться и уточняться в направлении, позволяющем получить численное значение вероятности разрушения в момент контроля и сделать прогноз развития дефектов, позволяющий предотвратить катастрофические разрушения.

В докладе рассматриваются архитектура проблем Акустико-Эмиссионной Технической Диагностики, разрешение которых позволит в максимально возможной в мере реализовать потенциальные возможности метода АЭ в его промышленном применении. Выделено и сформулировано 10 основных направлений исследований и разработок, которые позволяют развивать метод АЭ в них включены: модели АЭ источника (микроскопические и акустические); акустический канал; преобразование акустического сигнала в электрический; аппаратура АЭ; шумы и помехи; методы обработки сигнала с выделением из помех и шумов; методики контроля; критерии оценки источников АЭ; прогнозирование; принятие решения и оценка риска; выполнение требований методических документов и стандартов.

Представляется, что залогом успешности дальнейшего развития метода АЭ в области применения метода АЭ в промышленности является активное продвижение в решении задач оценок степени опасности источников АЭ. Должны быть уточнены критерии этих оценок, с указанием вероятности разрушения объекта в период проведения диагностирования и в последующие моменты времени, должны быть разработаны методики оценки достоверности критериев, возможности прогнозирования ресурса с заданной степенью неопределенности. Требуется разработать методики оценки риска аварии с использованием результатов анализа сигналов АЭ.

Отдельное внимание необходимо обратить на повышение квалификации операторов АЭ контроля.

### **Список литературы**

1. В.И. Иванов, В.А. Барат. Акустико-эмиссионная диагностика: справ. М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 368 с.: ил.
2. E569/E569M – 13. Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled Stimulation.
3. ISO 18249:2015 -Non-destructive testing -- Acoustic emission testing -- Specific methodology and general evaluation criteria for testing of fibre-reinforced polymers.

## ОБЗОР НОВЫХ АППАРАТНЫХ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ СЕМЕЙСТВА A-LINE

Елизаров С.В., Алякритский А.Л., Трофимов П.Н.,  
Шиманский А.Г., Буганков А.А.

*ООО «Интерюнис-ИТ»,  
Москва, РФ*

Совершенство и техническая грамотность применяемых в акустической эмиссии (АЭ) программно-аппаратных решений напрямую влияют на достоверность и качество контроля. Постоянный прогресс технических средств АЭ диагностики обуславливает расширение области применения метода и постепенно сужает ряд его ограничений. В докладе приводятся описания и технические характеристики трех современных разработок компании «Интерюнис-ИТ» в области АЭ: новое поколение АЭ-систем с цифровой передачей данных A-Line DDM-2, новая модификация систем традиционной архитектуры A-Line PCI и принципиально новое решение в области регистрации и передачи АЭ-данных система A-Line DS (“Digital Sensor”).

Новая модульная АЭ система с высокоскоростным последовательным цифровым каналом передачи данных A-Line DDM-2 сочетает в себе улучшенные по сравнению с ранее предлагаемыми аналогами технические характеристики и уникальную гибкость применения для задач промышленного АЭ-контроля и мониторинга. Так, например, уменьшены вес и габариты модулей, повышена их степень защиты от внешних воздействий, а передача данных осуществляется теперь по коаксиальным кабельным линиям. Доступно, также, взрывозащищенное исполнение комплекса вида искробезопасная цепь.

Новая модификация систем традиционной архитектуры A-Line PCI предназначена для проведения углубленных исследований природы АЭ и отличается от предшествующих аналогов повышенным быстродействием и возможностью регистрации непрерывного цифрового АЭ-потoka.

Новый тип АЭ-систем A-Line DS совмещает в себе централизованную схему обработки данных и цифровую передачу первичной информации на блок сбора и обработки данных. Сигнал от преобразователя АЭ усиливается и оцифровывается в конвертере DS, в непосредственной близости от преобразователя, а затем первичная АЭ информация в виде непрерывного цифрового потока передается по отдельному коаксиальному кабелю на центральный компьютер. Это позволяет, наряду с возможностью сохранить весь первичный АЭ-поток, избежать потери качества данных, вызванной их прохождением в аналоговом виде по длинной линии, и тем самым повысить достоверность и надежность контроля или мониторинга. Вычисления АЭ параметров, при этом, производятся компьютерными платами сбора и обработки данных в центральном блоке аналогично тому, как это производится в системах традиционной архитектуры.

## АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Елизаров С.В., Барат В.А., Бардаков В.В., Чернов Д.В.,  
Терентьев Д.А.

ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ», Москва, Россия,  
[tyev@interunis-it.ru](mailto:tyev@interunis-it.ru)

Традиционно АЭ контроль проводится для объектов, выведенных из эксплуатации. Такое требование связано как эффектом Кайзера, приводящим к необходимости превышения тестовой нагрузки над рабочей, так и с увеличенным уровнем шумов при работе объекта. Однако проведение АЭ контроля в режиме эксплуатации допустимо при условии увеличения периода сбора АЭ данных и разработки специализированной методики, учитывающей влияние различных технологических и внешних акустических шумов, особенности нагружения объекта в рабочем режиме, действие повреждающих факторов и возможные механизмы разрушения объекта. В работе представлены исследования по оценке возможности организации непрерывного АЭ мониторинга несущих элементов металлоконструкций шагающего экскаватора типа драглайн, а также роликовых опор вращающейся печи.

Работа драглайнов осуществляется круглый год, непрерывно в 3 смены. Большая часть используемых шагающих экскаваторов отработала свой нормативный срок службы, однако, продолжает активно использоваться. Наиболее нагруженными и, как следствие, максимально подверженными образованию дефектов элементами являются подкосы. В соответствии с рекомендацией заводов-изготовителей 2 раза в год проводятся периодические диагностические обследования металлоконструкций методом УЗК. Однако подобного рода контроль является трудоемким, а также не позволяет фиксировать резкие изменения в состоянии конструкции в период между проверками.

Для определения возможности организации непрерывного АЭ мониторинга были проведены работы по предварительной АЭ диагностике стрелы и подкосов ЭШ-20.90 (емкость ковша – 20 м<sup>3</sup>, длина стрелы – 90 м), ранее имевшего повреждение левого подкоса вблизи сварного шва. ПАЭ были установлены на основные несущие элементы: по 3 на левый и правый подкосы, 8 на верхний пояс стрелы и 4 на нижний пояс стрелы, 4 на нижние подкосы и 3 на колонну. Кроме того, 5 ПАЭ было установлено на серьги. Дистанции между ПАЭ, как правило, составляли от 5 до 15 м. Измеренные значения скорости и затухания составили 3200-3700 м/с и 1.5–2.8 м/с, рекомендуемые максимальные расстояния между ПАЭ – от 4.5 до 9 м. При работе драглайна наблюдался высокий уровень шума. Лишь при использовании частотного фильтра 150–500 кГц и порога 50 дБ активность АЭ приобрела циклический характер, синхронизированный с циклом работы экскаватора. Наибольшая активность, достигавшая 200 имп./с, наблюдалась при снятии грунта и при разгрузке ковша, т.е., соответственно, при нагружении конструкции, когда может идти подрастание трещин, и при разгрузке конструкции, когда может возникать трение берегов дефекта.

В течение 2 суток непосредственно во время работы драглайна проводился сбор АЭ данных. Результаты анализа линейной локации были следующими [1]. На нижнем поясе стрелы не выявлено источников АЭ. На колонне и верхнем поясе стрелы выявлено несколько источников, которые оказались шумовыми, поскольку лоцировались вблизи мест крепления лебедки, либо малоактивными. На левом и правом подкосах линейной локацией было выявлено по 3 источника АЭ, вблизи которых отсутствовали потенциальные источники шумов. Сигналы появлялись на стадиях нагружения и разгрузки. В выявленных АЭ контролем точках на подкосах был проведен дополнительный

УЗК. На левом подкосе была выявлена 1 трещина размером 20 мм, на правом – 1 трещина размером 30 мм.

На территории глиноземного комбината в цехах спекания и кальцинации исследовалась возможность проведения АЭ контроля роликовых опор вращающейся печи в режиме эксплуатации. Объектом контроля являлась роликовая опора вращающейся печи. Печь представляет собой цилиндр диаметром до 5 м и длиной до 185 м, который опирается на 7-8 парных роликовых опор. Каждая опора состоит из вала, опорного ролика и подшипниковых узлов. Время оборота печи равно 50 с, время оборота ролика опоры – 12.5 с. Срок эксплуатации контролируемых опор составлял от 1 года до 13 лет. Из 200 опорных блоков на комбинате в среднем за год 5 шт. выходит из строя из-за поломки подшипников и еще 1 – из-за разрушения вала. Поскольку вал является монолитной цельнометаллической конструкцией с многочисленными выступами и перепадами толщины, проведение неразрушающего контроля вала традиционными сканирующими методами оказывается затруднительным. Из-за низкой угловой скорости для контроля подшипников роликовых опор не вполне подходит хорошо известный метод виброметрии. В то же время, ряд лабораторных исследований и известные случаи успешного проведения АЭ мониторинга показывают, что метод АЭ применительно к контролю роликовых опор может использоваться в режиме эксплуатации, позволяя обнаруживать дефекты вне зависимости от их вида и формы, а от также скорости вращения.

В ходе исследований выявлено, что в диапазоне частот выше 50 кГц внешние шумы составляют не более 32 дБ, за исключением сигналов, связанных с задирами и шероховатости на поверхности ролика или бандажа печи, которые регистрируются со строго определенной периодичностью, вследствие чего легко могут быть отфильтрованы. Выявлено, что при контроле подшипников соотношения значений амплитуд на различных ПАЭ позволяют определить места повреждения с точностью до узла конструкции. В пределах вала оказалась возможна линейная локация источников АЭ.

Был обнаружен ряд дефектов вала, которые можно разделить на 2 типа [2]. Дефекты первого типа соответствовали усталостным трещинам и лоцировались в местах с наибольшей концентрацией напряжений – галтельных переходах. Второй тип, предположительно, соответствовал износу поверхности вала при фрикционном контакте. Параметры амплитудного распределения импульсов, характеризующих данный процесс, коррелируют со сроком эксплуатации опор. Дефекты подшипника были более разнообразными. На основании информации об известных дефектах по АЭ данным были идентифицированы такие дефекты, как трещины внутреннего кольца подшипника, бринеллирование, нарушение режима смазки.

## Список литературы

1. Крицкий Д.Ю., Мутыгуллин А.В., Шигин А.О., Бардаков В.В. Организация мониторинга экскаваторов-драглайнов в режиме эксплуатации. Горный журнал (в печати).
2. Елизаров С. В., Барат В. А., Бардаков В. В., Чернов Д. В., Терентьев Д. А. АЭ контроль динамического оборудования на примере роликовых опор вращающихся печей. Контроль. Диагностика, 2017, №7, с. 4-11.

# АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В МЕТАЛЛОВЕДЕНИИ

Ханжин В.Г.

НИТУ «МИСиС», Россия, г. Москва

[khanzhin\\_v@mail.ru](mailto:khanzhin_v@mail.ru)

Эффект излучения (эмиссии) звука (АЭ) при разрушении или деформации материалов был известен задолго до создания современных технологий неразрушающего контроля. Известен характерный треск при разрушении, а громкие щелчки при деформации олова двойникованием издавна получили специальное название «крик олова».

Высокая чувствительность метода АЭ обеспечивает широкий спектр его применений в лабораторных исследованиях экспериментального металловедения: позволяет регистрировать элементарные акты деформации и образование микротрещин; выделять и анализировать микромеханизмы разрушения; анализировать развитие процесса разрушения объекта контроля по изменению параметров импульсного потока АЭ.

Часто в экспериментальном металловедении АЭ является единственным методом наблюдения разрушения металлов в режиме реального времени (*in situ*). У томографии обычно недостаточно разрешение (и во времени, и в пространстве), а фрактография – это анализ *post mortem*. В отличие от традиционных методов, использующих ультразвуковые волны в качестве диагностических сигналов, например, таких, как ультразвуковая дефектоскопия, метод АЭ является «пассивным методом». Диагностические сигналы здесь являются следствием процессов, происходящих в материале. Контрольно-измерительная аппаратура работает только в режиме приема («прослушивания») сигналов АЭ. Оператор задает «наилучший» механический фильтр сигнала (выбрав датчик АЭ и звуковод), «наилучший» электрический фильтр: полосу частот АЭ, «мертвое время», усиление сигнала (то есть среднюю амплитуду импульсов АЭ), тактовую частоту цифрового преобразования аналоговых сигналов. После этого измерения АЭ эффективны как высокочувствительный индикатор процесса разрушения. Измерениями акустической эмиссии разрушения решают задачи двух классов:

- а) испытания, мониторинг и прогноз поведения объекта (конструкции);
- б) выявление законов повреждения вещества (в зависимости от структуры и условий испытания) – для прогноза поведения и оптимизации материала.

Первичная информация для них одна и та же: амплитуда и время поступления одиночных сигналов АЭ от упругих импульсов образования трещин. Электрический сигнал на выходе измерительного тракта есть интегральная свертка функции импульса источника, динамической функции Грина объекта и передаточной функции измерительного тракта. В принципе иногда возможно, решив динамическую задачу теории упругости, восстановить первичный импульс численным обращением свертки.

Но у задач двух классов различны и требования к способам регистрации, и приемы анализа. В мониторинге конструкции главное – для каждого импульса АЭ найти координаты трещины, ее ориентировку и размер скачка. Тогда используют многоканальную запись по трем осям; датчики калибруют от независимых источников механических импульсов. Решая обратную задачу, оптимизируют расстановку датчиков для обнаружения и триангуляции трещин. Так, для каждой крупной конструкции адаптируется «индивидуальная» сеть датчиков («акустическая антенна»), со своими алгоритмами диагностики событий, что подводит к разработкам интеллектуальных систем АЭ с «адаптивной логикой функционирования».

Напротив, при лабораторных испытаниях в металловедении поведение материала до макроразрушения анализируют по закономерностям в потоке большого числа импульсов АЭ от микротрещин. Необходимое исходное условие – доказать однозначное

соответствие: «один импульс  $\equiv$  одно событие разрушения структуры». Универсальные приборы АЭ измеряют такие параметры импульсного потока АЭ как: «суммарный счет» (число импульсов  $N$  выше некоторого порога), «скорость счета»  $N^*$  и «эффективное значение»  $A \times N^*$  (произведение скорости счета на среднюю амплитуду  $A$  – в микровольтах прибора при данном режиме регистрации). Эти измерения АЭ эффективны как высокочувствительный индикатор процесса разрушения.

Анализ процессов разрушения материалов методом АЭ требует количественного сопоставления сигналов с породившими их событиями. Уже простое измерение в реальном времени “пиковых” импульсов АЭ (“скорость счета”, “суммарный счет АЭ”) прямо дает кинетику процесса, пока все регистрируемые акты разрушения однотипны.

Пиковая амплитуда акустического смещения хрупкой внутренней трещины  $U_p$  пропорциональна площади зоны разрушения  $F \sim d^2$  (при неизменном механическом напряжении  $\sigma$ ). Однозначной связи  $U_p(d)$  следует ожидать, в первую очередь, для хрупких трещин  $U_p \sim C_{зв}$ . Скорость вязкой трещины много меньше звуковой и сама может сильно зависеть от размера трещины. Связь «импульс АЭ  $\equiv$  событие разрушения» в лабораторных испытаниях доказывают независимыми измерениями трещин и изломов.

Так, в условиях отпускной хрупкости мартенсит-аустенитной стали образец при растяжении расслаивался в шейке на сектора, а от их среза оставались радиальные гребни. В исследовании 288 образцов число 6...30 радиальных гребней в таком изломе «звездочкой» совпадало с числом сильных импульсов акустической эмиссии – на 5...20 мкс прежде полного разрушения. Соответствие импульсов АЭ предстартовым трещинам ( $d = 80 \dots 150$  мкм – от отсоя крупных сульфидов в стали) подтверждали согласием их триангуляции и фрактографии.

При большом числе  $N \gg 100$  малых импульсов акустической эмиссии информацию извлекают из их кумулятивного распределения  $N(A)$  – суммарного числа импульсов  $N$  с амплитудой менее  $A$  (в координатах  $\lg N - \lg A$ ).

Однозначное соответствие импульса акустической эмиссии элементарному акту разрушения в микроструктуре возможно только для медленной макротрещины (при ее средней скорости  $w \ll 1$  м/с). Его подтверждали в испытаниях на замедленное разрушение (под нагрузкой и от внутренних напряжений, коррозионное, водородное, термическое растрескивание), откол покрытий и окалины, предразрушение композитов.

## **ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ**

**Буйло С.И.**

*Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И.Воровича  
Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия,  
[sibuilo@yandex.ru](mailto:sibuilo@yandex.ru)*

Предложен принципиально новый междисциплинарный подход, позволяющий создание эффективных методов восстановления параметров процессов дефектообразования и накопления повреждений по регистрируемым сигналам сопутствующей акустической эмиссии (АЭ) [1-3]. Суть подхода состоит в использовании кинетической концепции прочности, пуассоновской модели процесса дефектообразования и обнаруженных экспериментально физико-механических особенностей явления АЭ (включая устойчивые в силу ряда предельных теорем статистические параметры случайного процесса АЭ).

Известно, что при деформировании материалов приложенным напряжением  $\sigma$  движущиеся дислокации скапливаются у препятствий, что приводит к появлению касательного напряжения, большего, чем активирующее источник.

Полагая, что каждая дислокация при пересечении границы в момент времени  $t_i$  излучает короткий экспоненциальный импульс амплитудой  $x_{oi}$  и, учитывая, что их суперпозиция дает регистрируемый импульс амплитудой  $X$ , нами получен следующий вид нормированной амплитуды излученного импульса АЭ [1-3]:

$$A(\lambda) = \frac{X}{nx_{oi}} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \exp\left(-\frac{\lambda k}{n}\right); \quad \lambda^{-1} \sim \bar{v}; \quad \dot{\epsilon} = M\rho_0 b\bar{v}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество дислокаций в скоплении;  $\lambda = t_r/\tau_a$  – отношение времени  $t_r = n(t_i - t_{i-1})$  пересечения границы скоплением к постоянной времени релаксации напряжения  $\tau_a$ ;  $\bar{v}$  – среднее значение скорости дислокаций;  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации;  $M$  – ориентационный фактор;  $\rho_0$  – плотность подвижных дислокаций;  $b$  – модуль вектора Бюргерса.

Экспериментальное подтверждение пуассоновского характера явления АЭ впервые было получено именно нами еще в конце 70-х годов. Установлено, что в большинстве случаев плотность распределения временных интервалов между соседними актами АЭ  $w(\Delta t)$  при различных процессах, включая фазовые переходы и накопление микроповреждений описывается экспоненциальной, а  $w_n(u/u_i)$  – нормированная плотность распределения амплитуд  $u$  – степенной зависимостью при монотонно-спадающем частотном спектре и восстановленной энергии акта излучения  $10^{-16} - 10^{-14}$  Дж при его длительности  $\tau_a = 10^{-7} - 10^{-6}$  с [1-3]

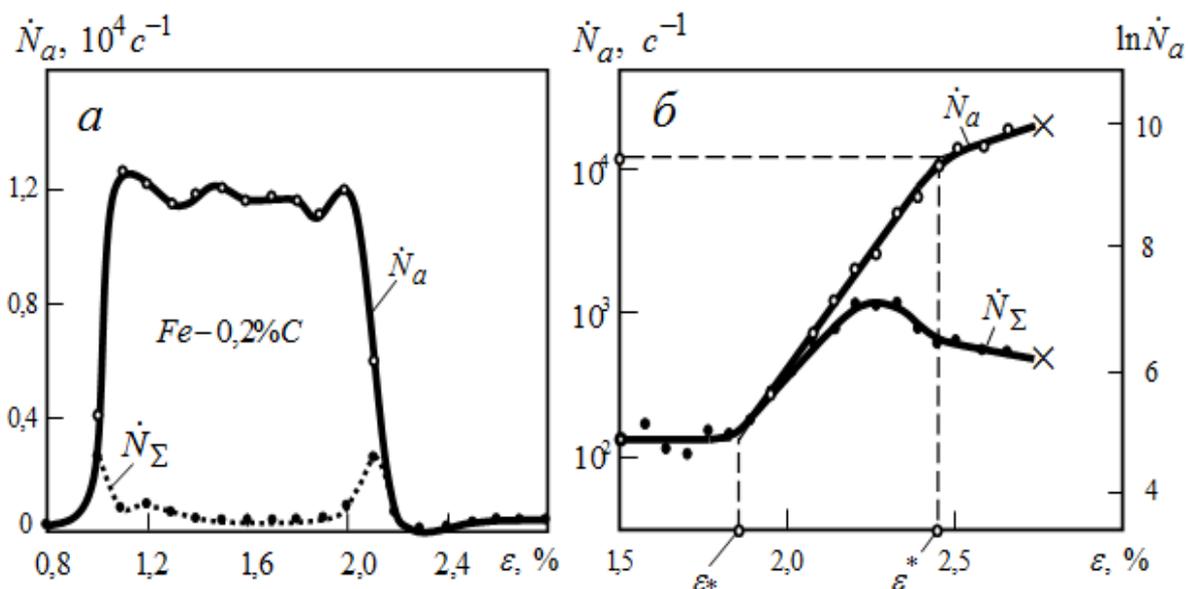
$$w(\Delta t) = \dot{N}_a \exp(-\dot{N}_a \Delta t); \quad w_n(u/u_i) = (m-1)(u/u_i)^{-m}, \quad 1 \leq m \leq 3. \quad (2)$$

Здесь  $\dot{N}_a$  – интенсивность излученного потока актов АЭ;  $u_i$  – порог дискриминации. Используя статистическую модель (2) получены следующие соотношения для восстановления интенсивности излученного потока актов АЭ по зарегистрированной интенсивности потока осцилляций  $\dot{N}$  и  $\dot{N}_\Sigma$  – интенсивности потока (активности) детектированных импульсов АЭ на поверхности тела [1-3]

$$\dot{N}_a = \dot{N}_\Sigma \exp[\Sigma t_0 / (T - \Sigma t_0)] \approx \dot{N} / (f - \dot{N})\tau \quad (3)$$

где  $\Sigma t_0$  – суммарная длительность сигналов АЭ на выходе регистрирующего тракта за время  $T$ ;  $T$  – временной интервал измерения интенсивности (например,  $T = 1$  с или  $T = 0,1$  с);  $f$  – частота заполнения сигналов АЭ (приблизительно равна резонансу датчика);  $\tau$  – постоянная времени послезвучания в теле и датчике. Легко оценивается по самим импульсам АЭ, либо по прохождению короткого калибровочного импульса (по определению,  $\tau$  равна длительности огибающей импульса АЭ на уровне падения его амплитуды в  $e$  раз).

Предложены и разработаны методы идентификации стадий процессов накопления повреждений, количественной оценки их концентрации и постоянных размножения по положению различных особых точек (локальных экстремумов, точек перелома  $\epsilon_*$  и  $\epsilon^*$ ) восстановленной интенсивности потока актов АЭ.



**Рис.1.** Оценка интенсивности потока актов пластической микродеформации на площадке текучести стали 20 (а) и особые точки потока микроповреждений перед разрушением стали 95X18 (б). Скорость деформации:  $\dot{\varepsilon} = 2 \cdot 10^{-4} c^{-1}$ ;  
Крестики – момент разрушения

Разработанные методы и алгоритмы дают существенное увеличение достоверности результатов диагностики прочности, а также повышение точности оценки параметров процессов различных структурных преобразований в материалах по данным АЭ испытаний.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (Проект № 9.4726.2017/8.9).*

## Список литературы

1. Буйло С.И. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2017. 184 с.
2. Буйло С.И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008, 192 с.
3. Builo S.I. Chapter 15 (pp. 171–184). Physical, Mechanical and Statistical Aspects of Acoustic Emission Diagnostics. In: Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. New York: Nova Science Publishers, 2013, 444 p.

# МЕТОД ИНВАРИАНТОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ ПРЕДРАЗРУШАЮЩЕГО СОСТОЯНИЯ

Буйло С.И.

*Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И.Воровича  
Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Россия,  
[sibuilo@yandex.ru](mailto:sibuilo@yandex.ru)*

К настоящему времени акустико-эмиссионный (АЭ) метод достаточно широко применяется в задачах контроля и диагностики [1]. Некоторое время назад нами был предложен новый подход, заключающийся в том, что связь регистрируемых сигналов АЭ с близостью разрушения определяется по отклонению от устойчивых (инвариантных) в силу ряда предельных теорем статистических распределений параметров АЭ [2]. Частным случаем такого подхода является метод, суть которого состоит в использовании в качестве критерия образования макродефекта факта отклонения параметров потока актов АЭ от пуассоновского вида [1-8].

Развиваемый подход часто называется *методом инвариантов* и все более широко используется в качестве метода диагностики предразрушающего состояния и определения точки деструкции конструкционных материалов [1-8].

Суть метода: В силу случайного характера потока микроповреждений, на ранних стадиях деформации и разрушения твердых тел ищутся устойчивые (инвариантные) соотношения  $I_r^* = inv$  между регистрируемыми параметрами АЭ. Тогда, появление отклонений регистрируемых значений  $I_r$  этих соотношений от их инвариантных значений  $I_r^*$  может служить критерием близости разрушения.

Для количественного описания степени отклонения  $I_r$  от  $I_r^*$  нами введен *информационный параметр*  $i_r$ , простейший вид которого [1, 4-8]:

$$i_r = i_r(I_r, I_r^*) = |(I_r - I_r^*)| / I_r^* \quad (1)$$

Отношение стандартного отклонения временных интервалов следования актов АЭ  $\sigma_{\Delta t}$  к их среднему значению  $\overline{\Delta t}$  (предложенный нами первый временной инвариант  $I_{1\Delta t}$ ) для пуассоновского потока актов АЭ имеет устойчивое (инвариантное) значение равное единице, а  $i_{1\Delta t}$  – информационный параметр инварианта временных интервалов следования актов АЭ равен нулю:

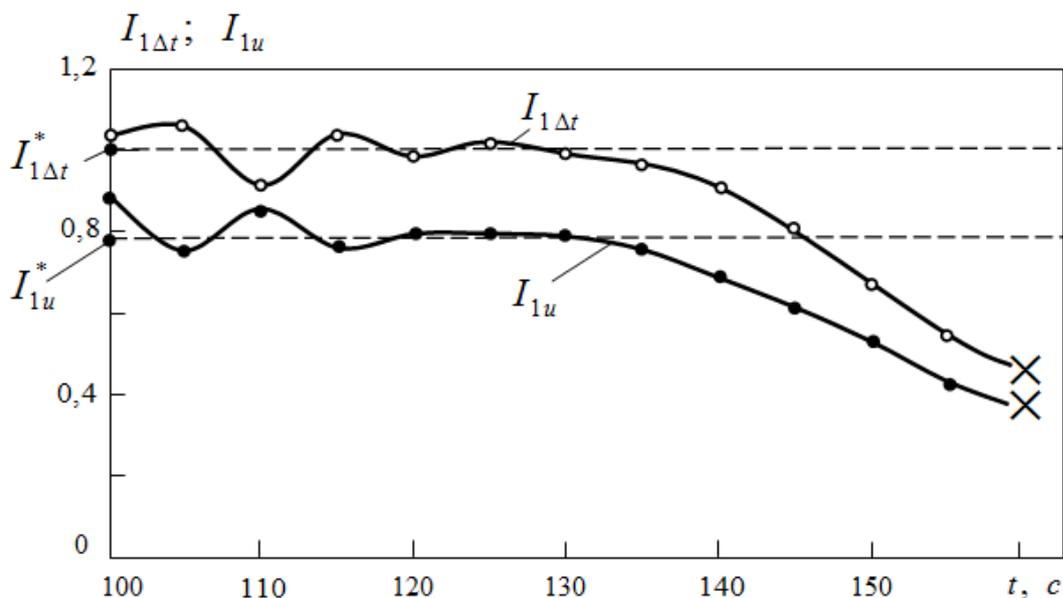
$$I_{1\Delta t} = \sigma_{\Delta t} / (\overline{\Delta t}) = I_{1\Delta t}^* = 1, \quad i_{1\Delta t} = \left| (\overline{\Delta t} - \sigma_{\Delta t}) \right| / (\overline{\Delta t}) = 0 \quad (2)$$

Аналогично нами предложен первый амплитудный инвариант  $I_{1u}$  и его амплитудный информационный параметр  $i_{1u}$ :

$$I_{1u} = \sigma_u / (\overline{u}) = I_{1u}^*; \quad i_{1u} = |(I_{1u} - I_{1u}^*)| / I_{1u}^* \quad (3)$$

где  $I_{1u}^*$  – устойчивое (часто близкое к 0,8) значение этого инварианта [1, 5].

На рисунке показано, что перед разрушением временные и амплитудные инвариантные соотношения действительно отклоняются от их инвариантов. Для «прореженных» же потоков АЭ метод инвариантов *малоинформативен* [1, 6, 8].



**Рис.** Графики изменения временных и амплитудных инвариантных соотношений в процессе нагружения образца стали 95X18; Крестиками обозначен момент разрушения

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (Проект № 9.4726.2017/8.9).*

### Список литературы

1. Буйло С.И. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2017. 184 с.
2. Буйло С.И. О связи кинетики деформации и микроразрушения твердых тел с параметрами сопутствующего акустического излучения. В кн.: Тез. докл. 14 конф. по тепловой микроскопии «Структура и прочность материалов в широком диапазоне температур», Воронеж: ВПИ, 1992, с. 49.
3. Буйло С.И., Попов А.В. Акустико-эмиссионный метод оценки параметров процесса накопления повреждений в задаче прогнозирования ресурса изделий ответственного назначения // Дефектоскопия. 2001. № 9. С. 45—53.
4. Буйло С.И. Использование инвариантных соотношений параметров потока сигналов акустической эмиссии для диагностики предразрушающего состояния твердых тел // Дефектоскопия. 2002. № 2. С. 48—53.
5. Буйло С.И. Диагностика предразрушающего состояния по амплитудным и временным инвариантам потока актов акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2004. № 8. С. 79—83.
6. Буйло С.И. Об информативности метода инвариантов при анализе прореженных потоков акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2009. № 11. С. 41—45.
7. Буйло С.И., Орлов С.В. Корреляционный анализ и метод инвариантов сигналов акустической эмиссии в диагностике предразрушающего состояния материалов // Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 36—41.
8. Буйло С.И. Об информативности метода инвариантов сигналов акустической эмиссии в задачах диагностики предразрушающего состояния материалов // Дефектоскопия. 2018. (В печати).

# АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДИАГНОСТИКА КИНЕТИКИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

<sup>1</sup>Буйло С.И., <sup>2</sup>Гапонов В.Л., <sup>2,3</sup>Кузнецов Д.М.

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия,  
[sibuildo@yandex.ru](mailto:sibuildo@yandex.ru)

<sup>2</sup>Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия,  
[v.gaponov6591@yandex.ru](mailto:v.gaponov6591@yandex.ru)

<sup>3</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет,  
Новочеркасск, Россия,  
[kuznetsovdm@mail.ru](mailto:kuznetsovdm@mail.ru)

К настоящему времени метод акустико-эмиссионной (АЭ) диагностики прочности и разрушения твердых тел достиг достаточно высокого уровня развития [1]. В данной работе приведены результаты *междисциплинарного практического применения* метода АЭ. Исследованы возможность и перспективность АЭ контроля и диагностики кинетики физико-химических процессов в жидких средах [2-7]. Рассмотрена динамика изменения параметров АЭ, генерируемой в процессе роста и растворении кристаллов. Предложено объяснение зарегистрированного излучения в рамках гипотезы биений при сложении большого количества колебаний с близкими частотами, источниками которых могут быть как супранадмолекулярные комплексы воды, так и отдельные молекулы [3]. Показана принципиальная возможность оценки кинетики процессов кристаллизации, растворения и плавления по данным АЭ исследований.

В предположении, что активность сигналов АЭ пропорциональна скорости изменения массы растворенного вещества, получен теоретический вид зависимости общего количества актов АЭ от массы, времени и постоянной времени растворения [4, 6]. Зарегистрировано хорошее (с точностью лучше 3...5%) соответствие теоретической кривой с экспериментальными данными. Экспериментально установлена температурная зависимость постоянной времени растворения. Предложен метод определения постоянной времени и оценки динамики процесса растворения кристаллов по данным АЭ измерений.

Исследованы параметры АЭ, зарегистрированной в процессе капиллярного движения жидкости в пористой среде [5, 6]. Установлено, что в процессе пропитки регистрируемая интенсивность потока актов АЭ падает по экспоненте, а суммарное количество актов АЭ описывается в рамках модели экспоненциально-затухающего во времени процесса. Используя полученные соотношения можно по графикам суммарного количества актов АЭ определить высоту поднятия, либо массу поглощенной жидкости в любой момент времени. Предложен метод контроля глубины и полноты пропитки материалов по данным АЭ измерений.

Установлено, что в процессе электролиза водных растворов различных солей в гальванической ячейке индуцируются сигналы АЭ в ультразвуковом диапазоне частот [7]. При этом динамика потока сигналов АЭ связана с количеством осажденного металла. Дальнейшие исследования явления АЭ в задачах электролиза должны быть направлены на получение количественных корреляций сигналов АЭ с толщиной осажденного металла и качеством покрытия. Полученные результаты позволяют предложить метод АЭ в качестве дистанционного метода проверки толщины покрытий в процессе электролиза.

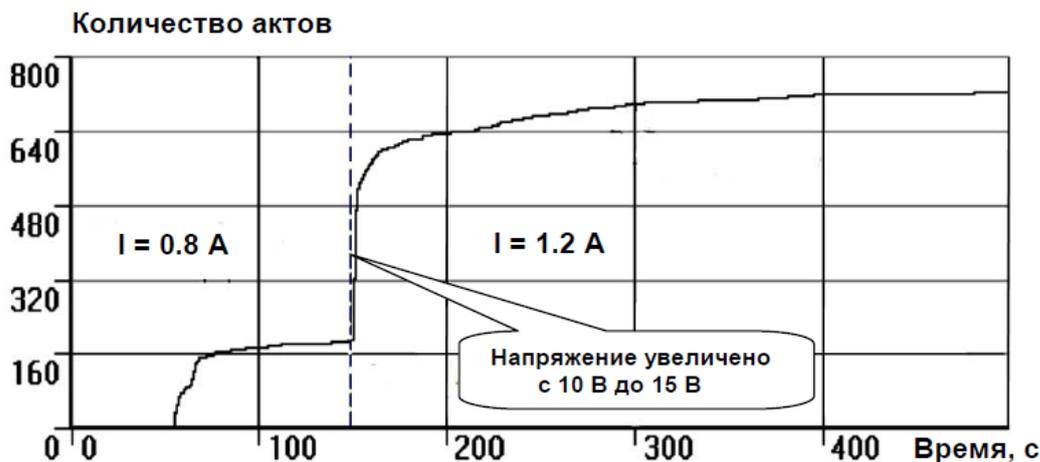


Рис. Акустическая эмиссия в процессе электролиза

Результаты работы могут быть использованы для диагностики физико-химических процессов в жидких средах, при контроле и диагностике динамики процессов электролиза, растворения и кристаллизации в печах по выращиванию монокристаллов, а также при создании неразрушающего метода контроля глубины и полноты пропитки материалов по параметрам сопутствующего акустического излучения.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (Проект № 9.4726.2017/8.9).*

### Список литературы

1. Буйло С.И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2008, 192 с.
2. Кузнецов Д.М., Гапонов В.Л., Смирнов А.Н. К вопросу о возможности исследования кинетики химических реакций в жидкой среде с помощью метода акустической эмиссии. – Инженерная физика, 2008, № 1, с. 16-21.
3. Буйло С.И., Кузнецов Д.М. Акустико-эмиссионный контроль и диагностика кинетики физико-химических процессов в жидких средах. – Дефектоскопия, 2010, № 9, с. 74-80.
4. Буйло С.И., Кузнецов Д.М., Гапонов В.Л., Трепачев В.В. Акустико-эмиссионный контроль и диагностика кинетики растворения кристаллических веществ. – Дефектоскопия, 2012, № 10, с.53-56.
5. Буйло С.И., Кузнецов Д.М., Гапонов В.Л. Акустико-эмиссионный мониторинг капиллярного движения жидкости в пористых средах. – Дефектоскопия, 2014, № 7, с.19-23.
6. Builo S.I., Kuznetsov D.M., Gaponov V.L. Acoustic Emission Diagnostics of the Kinetics of Physicochemical Processes in Liquid and Solid Media. Chapter 13 (pp. 193–208). In: Advanced Materials. Studies and Applications. New York: Nova Science Publishers, 2015, 527 p.
7. Builo, S.I.; Kuznetsov, D.M.; Gaponov, V.L. and Balakai, V.I. The Acoustic Emission Diagnostics of Galvanic Process Kinetics. Chapter 63 (pp. 457-462). In: Proceedings of the 2016 International Conference on Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. Nova Science Publishers, New York. 2017. - 688 p.

## ОРГАНИЗАЦИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ В РЕСПУБЛИКЕ ПОЛЬША

**Kaźmierczak A.**

*Acoustic Emission Diagnostic Polska Sp.,  
Варшава, Республика Польша*

Развитие металлургии, химической и нефтеперерабатывающей промышленности в Польше обуславливает необходимость повсеместного применения методов неразрушающего контроля и технической диагностики, в частности, метода акустической эмиссии. Акустико-эмиссионный контроль применяется для диагностики сосудов высокого давления, резервуаров, химических реакторов, магистральных и технологических трубопроводов, в том числе подводного и подземного исполнения.

### **Оборудование для АЭ-контроля**

Польские лаборатории неразрушающего контроля и экспертные организации используют акустико-эмиссионное оборудование различных производителей. На рынке представлены системы компаний PAC, Vallen-system, также используются акустико-эмиссионные комплексы A-Line DDM компании Интерюнис-ИТ.

### **Текущее состояние**

В настоящее время количество экспертиз опасных с производственных объектов с применением метода АЭ существенно выше, чем 10-15 лет назад. Преимущества метода АЭ признаны, как представителями промышленности, так и в структурах государственного технического надзора. Постоянно разрабатываются новые инструкции и методики применения АЭ контроля для конкретных промышленных объектов, создаются новые лаборатории.

### **Гармонизация стандартов ГОСТ и EN.**

Гармонизация стандартов ГОСТ и EN является важным элементом для применения метода АЭ, как в Польше, так и в Евросоюзе в целом. Также гармонизация необходима для применения диагностического оборудования, предлагаемого компаниями из Российской Федерации. Для применения систем АЭ требуется декларация CE, стандарт ATEX / Ex, паспорта преобразователей АЭ, а также программное обеспечение и инструкции на национальных языках стран Европейского Союза. Срок гарантийного обслуживания оборудования должен составлять не менее 24 месяцев.

### **Сертификация персонала специалистов АЭ в соответствии с EN 9712 - формальное требование.**

Прием в диагностическую работу специалистов требует соблюдения нескольких формальных требований, обязательным является наличие сертификата специалиста АЭ-III или II уровня в соответствии с EN-9712.

### **Перспективы сотрудничества в инновационных исследованиях с использованием диагностики и мониторинга АЭ.**

Разработка диагностических методов неразрушающего контроля и особенно АЭ создает прекрасную возможность участия специалистов - экспертов и исследователей в разработке технологии **V+R+I** в Польше.

Такие направления, как подготовка специалистов, разработка методик обучения, проведение инициативных исследований метода АЭ и АЭ мониторинга является приоритетным направлением развития промышленной безопасности, как в Польше, так и в Европейском Союзе в целом.

# ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ МЕТОДОМ АЭ ПРИ БЕСПОРОГОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ

Барат В.А., Чернов Д.В., Елизаров С.В.

НИУ «МЭИ», Москва, РФ, ООО «Интерюнис-ИТ»,  
Москва, РФ

Оценка достоверности обнаружения дефектов является актуальной задачей акустико-эмиссионного (АЭ) контроля. Несмотря на то, что АЭ контроль является наиболее чувствительным методом неразрушающего контроля, оценку размера минимального обнаруживаемого дефекта провести достаточно сложно. Вероятность обнаружения дефектов методом АЭ зависит от множества случайных факторов и не связана напрямую с размером дефекта. В настоящее время оценка достоверности результатов АЭ контроля исследуется рядом авторов [1,2], но методики оценки вероятности обнаружения дефектов до сих пор не разработаны.

В соответствии с нормативными документами [3] выявление дефектов и оценка степени их опасности методом АЭ осуществляется по отклику объекта на нагружение определенного вида с превышением рабочего давления на 10-15%. Дефект считается выявленным, если на локационной плоскости формируется кластер с определенным количеством индикаций. Степень опасности дефекта определяется по активности импульсов АЭ и их интенсивности при помощи ряда критериальных оценок.

Для выявления дефекта методом АЭ, необходимо, чтобы чувствительность аппаратуры АЭ контроля была достаточной для того, чтобы зарегистрировать импульсы, излученные дефектом, после диссипации энергии, вызванной походом АЭ сигналов по акустическому тракту.

$$s(t) = u_{source}(t) * h_{channel}(t) * h_{sensor}(t). \quad (1)$$

$$p = P(F(s(t) + noise(t)) > \lambda). \quad (2)$$

Сигнал АЭ, который регистрируется преобразователем, можно представить как результат свертки функции источника акустической эмиссии с импульсными характеристиками акустического тракта и преобразователя АЭ (ПАЭ) (1). С определенными допущениями для оценки вероятности выявления дефекта по одному каналу можно принять выражение (2), где  $F$  – функция обнаружения сигнала АЭ на фоне шума  $noise(t)$ . При пороговом детектировании импульсов АЭ параметр  $\lambda$  соответствует порогу амплитудной дискриминации, при беспороговом обнаружении  $\lambda$  определяется, на основании заданной вероятности ошибки обнаружения [4]. Для многомерных данных, полученных при помощи многоканальных АЭ систем, вероятность обнаружения может быть оценена на основании отношения правдоподобия, построенного для статистического параметра характеризующего распределение индикаций на плоскости локации.

Наиболее сложной для моделирования и оценивания является функция дефекта – источника АЭ. Известен ряд эмпирических моделей [3], позволяющих оценить активность источника в зависимости от приложенной нагрузки. Общим недостатком подобных моделей, ограничивающим возможность их применения, является наличие коэффициентов зависящих от механических свойств, значения которых, как правило, априори неизвестны.

Для устранения параметрической неопределенности теоретических моделей в рамках данной работы было проведено подробное экспериментальное исследование акустической эмиссии усталостных дефектов в низкоуглеродистых сталях. Образцы с усталостными дефектами, нагружались также, как при проведении промышленного АЭ контроля. Результаты, полученные в рамках экспериментов, соответствовали теорети-

ческим моделям, значения оцененных параметров согласовались с ранее опубликованными данными [3].

Передачная функция акустического тракта была оценена приближенно при помощи функции затухания волн АЭ от расстояния в полосе частот от 100 до 500 кГц. Параметр затухания был определен экспериментально при проведении калибровочных измерений на трубопроводах, как с жидкими, так и с газообразными средами. При измерениях был использован преобразователь GT 200 (ООО «ГлобалТест») и АЭ система A-Line 32D (ООО Интерюнис-ИТ).

Вероятность обнаружения дефектов оценивалась на фоне акустических шумов, создаваемых течью, вибрацией, шумами компрессорного оборудования в форме РОД-диаграмм, совмещенных со схемами планарной локации при определенном расположении преобразователей АЭ. При моделировании порогового способа регистрации данных, РОД диаграммы были рассчитаны при различных значениях порога. При беспороговой регистрации данных осуществлялась минимизация вероятности ошибки обнаружения дефекта. Следует отметить, что вне зависимости от стадии развития усталостного дефекта, вероятность его обнаружения беспороговым методом, оказывается существенно выше, чем пороговым.

В рамках данной работы была разработана методика, позволяющая оценить вероятность обнаружения усталостных дефектов методом АЭ. Несмотря на то, что в рамках данной работы не все факторы, влияющие на вероятность обнаружения дефектов, были исследованы в полной мере, полученные результаты имеют практическую значимость. Они позволяют оценить стадию развития, на которой может быть выявлен усталостный дефект, при определенной расстановке ПАЭ, скорректировать схему расстановки ПАЭ для обеспечения определенной вероятности обнаружения дефекта, оценить влияние шумов различного типа на результат обнаружения дефекта.

*Результаты получены в ходе выполнения Проекта государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации в сфере научной деятельности № 11.9879.2017/8.9*

## **Список литературы**

1. Pollock Probability of Detection for Acoustic Emission Journal of Acoustic Emission, V 25, 2007, pp.231-237
2. Быков С.П., Юрайдо Б.Ф., Иванов В.И. О достоверности акустико-эмиссионного контроля Контроль. Диагностика. 2013, №12, с. 53–60
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7т. Под общей ред. В.В.Клюева. Т.7: В 2 кн. Кн.1: В.И.Иванов, И.Э. Власов.
4. Шахтарин Б.И. Обнаружение сигналов: Учебное пособие. – М.: Гелиос АРВ 2006 - 448с
5. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. Москва ПИО ОБТ, 2003

# ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАПОРНОЙ И РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ

Барат В.А., Бардаков В.В., Кожевников А.В.

*«Интерюнис-ИТ»,  
Москва, РФ*

Одной из тенденций развития современных приборов акустической эмиссии (АЭ) является расширение их функциональных возможностей, одной из дополнительных функций приборов АЭ контроля, реализованной в автоматическом режиме, может быть проверка герметичности запорной арматуры. Главным требованием, предъявляемым к запорной и регулирующей арматуре (ЗРА) любого типа, является обеспечение герметичности. Нарушение герметичности запорной арматуры возникает из-за дефектов конструктивных элементов арматуры, их износа, неполадок в работе запорного органа и нарушения уплотнений.

Если дефектная арматура находится в эксплуатации, на входном и выходном патрубке создается разность давлений, при этом происходит истечение продукта из несплошностей. Малые размеры дефектов обуславливают турбулентный характер истечения продукта, даже при сравнительно небольших перепадах давления. Турбулентный поток создает акустический шум, который регистрируется акустическими преобразователями, установленными на корпусе ЗРА. Акустические сигналы, характеризующие течь, имеют определенные форму и спектр, позволяющие выделить их из общего потока данных.

Из теории турбулентных струй известно, что по мощности акустического излучения, зная параметры струи, можно определить расход жидкости или газа [1]. На практике размеры несплошности, через которые происходит истечение продукта, как правило, неизвестны. Поэтому, вместо теоретических моделей, для оценки расхода применяют эмпирические формулы, полученные в результате сопоставления уровня акустического сигнала при истечении продукта и значения соответствующего расхода, измеренного одним из гостированных способов [2].

Погрешность определения расхода утечки и чувствительность метода оказываются различными для разных типов ЗРА. Точность порядка 15-25% и чувствительность менее 1 л/мин достигается для запорной арматуры – шаровых кранов и клиновых задвижек. Более сложная конструкция корпусов регулирующей арматуры приводит к снижению чувствительности акустического метода увеличению погрешности метода в 1.5-2 раза.

Автоматизированная методика проверки герметичности запорной арматуры реализована в двухканальном многофункциональном приборе "UNISCOPE" («ИТЕРЮНИС-ИТ»). С помощью прибора UNISCOPE возможна экспресс-проверка герметичности различных видов запорной арматуры подземной и наземной установки в различных условиях эксплуатации.

## Список литературы

1. Кузнецов В.М. Основы теории шума турбулентных струй. 2008. 240 с
2. Барат В.А., Елизаров С.В., Щелаков Д.А. Проверка герметичности запорной арматуры при помощи портативного многофункционального прибора UNISCOPE./ В мире неразрушающего контроля.2012.- №1(55), с.22-24

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАДИЙ РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Чернов Д.В., Елизаров С.В., Барат В.А., Матюнин В.М., Марченков А.Ю.

ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ», Москва, Россия,

[chernovdv@interunis-it.ru](mailto:chernovdv@interunis-it.ru)

«НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Большая часть опасных промышленных объектов, находящихся в эксплуатации, подвержена различного рода циклическим нагрузкам. Воздействие таких факторов как температура, внутреннее давление, а также старение материалов может привести к образованию и накоплению усталостных повреждений, снижающих прочностные характеристики технических устройств. При этом чем больше срок эксплуатации объекта, тем выше интенсивность таких процессов.

Одним из способов обеспечения безаварийного режима работы промышленного оборудования является применение систем акустико-эмиссионного (АЭ) мониторинга, позволяющих вести наблюдение за возникновением и развитием усталостных повреждений в режиме реального времени. Необходимо отметить, что в настоящий момент не существует нормативных документов, регламентирующих проведение АЭ контроля технических устройств, находящихся в эксплуатации. В связи с этим, актуальной задачей является разработка и апробация способов фильтрации [1] и методик интерпретации акустических сигналов [2, 3], возникающих при контроле «на режиме».

Также актуальной задачей АЭ контроля является разработка критериальных параметров, по которым проводится оценка как степени опасности источников акустических сигналов, так и расчет остаточного ресурса. Для решения поставленной задачи была проведена серия лабораторных экспериментов по циклическому нагружению металлических образцов до разрушения. В работе определялось влияние на результаты АЭ диагностики таких параметров нагружения как максимальное напряжение цикла, скорость изменения нагрузки и коэффициент асимметрии цикла.

На начальном этапе исследования проведено построение кинетических диаграмм усталостного разрушения (КДУР). На рисунке 1 приведена её характерная форма.

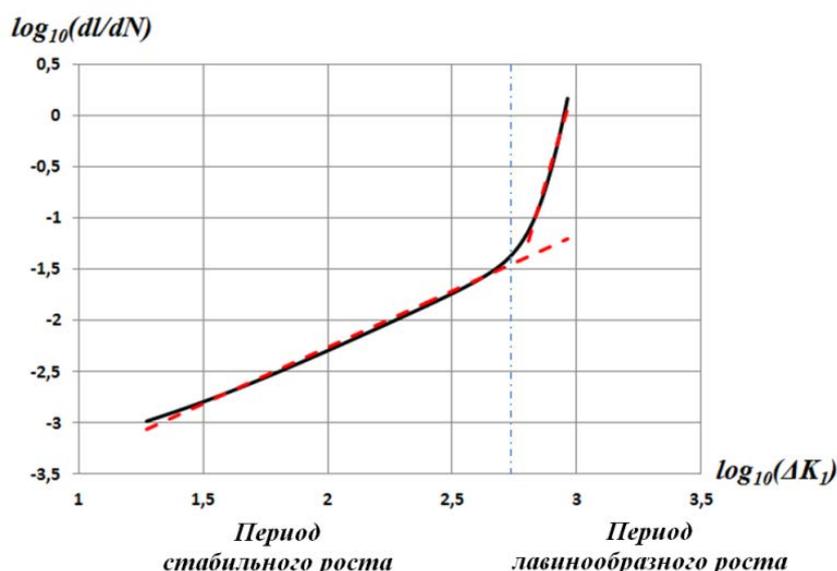
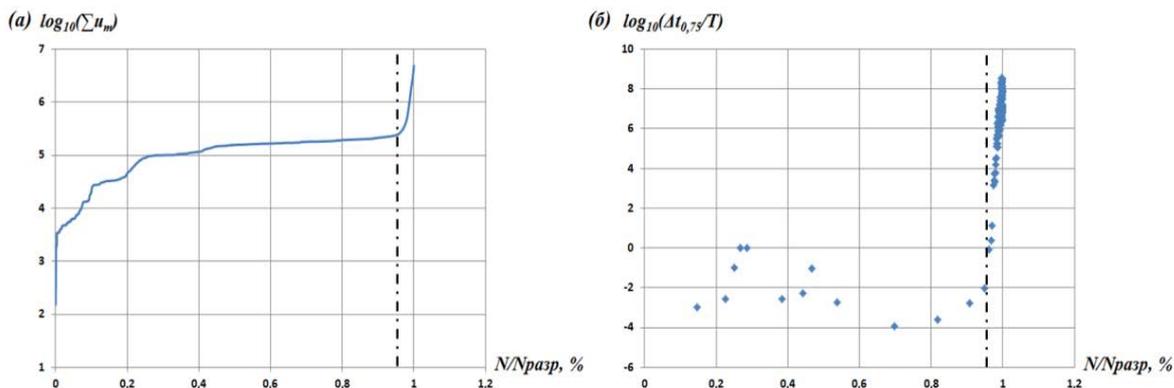


Рис. 1. Характерная форма КДУР, зарегистрированная при циклическом нагружении металлического образца до разрушения

Как показано на рис. 1, по значениям  $\log_{10}(\Delta K_I)$  КДУР можно разделить на две области. Первая область соответствует этапу устойчивого роста усталостной трещины. На нем отмечается низкая скорость приращения параметра  $\log_{10}(dl/dN)$ . Дальнейшее нагружение объекта приводит к этапу лавинообразного роста усталостной трещины, для которого характерно повышение скорости приращения параметра  $\log_{10}(dl/dN)$ .

Аналогичный переход был определен по АЭ параметрам – зависимостям кумулятивной амплитуды ( $\log_{10}(\sum u_m)$ ) и верхнего квартиля распределения временных интервалов ( $\log_{10}(T/\Delta t_{0,75})$ ) от параметра нагружения ( $N/N_{разр}$ ), где  $N$  – количество циклов нагружения;  $N_{разр}$  – общее количество циклов до разрушения образца;  $T$  – период следования циклов нагружения. На рис. 2 показаны формы этих зависимостей.



**Рис. 2.** Зависимости логарифма (а) кумулятивной амплитуды и (б) верхнего квартиля распределения временных интервалов от параметра нагрузки

На зависимостях, приведенных на рис. 2, можно отметить координату  $N/N_{разр} = 0,95$ , в которой регистрируется резкое повышение значений АЭ параметров. Необходимо отметить, что при таком значении параметра нагружения коэффициент интенсивности напряжений соответствует переходу между этапами устойчивого и лавинообразного роста усталостной трещины. Таким образом, при обработке акустических сигналов, зарегистрированных в процессе циклического нагружения образцов, были определены наиболее информативные АЭ параметры, при помощи которых возможно разделение основных стадий развития усталостных трещин.

*Результаты получены в ходе выполнения Проекта государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации в сфере научной деятельности № 11.9879.2017/8.9*

### Список литературы

1. V.A. Barat, D.V. Chernov, S.V. Elizarov Discovering data flow discords for enhancing noise immunity of acoustic-emission testing.//Russian Journal of Nondestructive Testing, June 2016, Volume 52, Issue 6, p.p. 347-356.
2. В. В. Бардаков, В. А. Барат, Д. А. Терентьев, Д. В. Чернов, К. О. Осипов. Особенности применения метода акустической эмиссии при мониторинге мостовых конструкций // Контроль. Диагностика. 2016. № 1(211). С. 32 - 39.
3. С. В. Елизаров, В. А. Барат, В. В. Бардаков, Д. В. Чернов, Д. А. Терентьев АЭ-контроль динамического оборудования на примере роликовых опор вращающихся печей // Контроль. Диагностика. 2017. № 7. С. 4 – 10.

## ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА И МОНИТОРИНГ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫМ МЕТОДОМ

Никулин С.А., Ханжин В.Г., Рожнов А.Б., Никитин А.В., Рогачев С.О.

НИТУ «МИСиС», Россия, г. Москва

[nikulin@misis.ru](mailto:nikulini@misis.ru)

Сегодня важной задачей экспериментального материаловедения является разработка методов высокочувствительной экспресс-диагностики материала при различных испытаниях и в процессе производства. Объектом исследования в данном случае могут выступать как малогабаритные лабораторные образцы, так и массивные изделия (например, тонкостенные оболочки ТВЭЛ, трубы нефте- и газопроводов, провода, боковые рамы вагонов и др.).

Измерение акустической эмиссии (АЭ) при испытаниях образцов и в процессе изготовления и эксплуатации изделий является одним из эффективных методов мониторинга качества материалов и технологий [1]. Цель измерений АЭ – прямое сопоставление импульсов АЭ с породившими их изменениями в структуре материала. Специальные методы измерения АЭ позволяют фиксировать момент образования и процесс развития единичных трещин в образцах или изделиях, а также измерять их размер [2, 3].

За последние 30 лет на кафедре металловедения и физики прочности НИТУ «МИСиС» созданы аппаратура и многочисленные специальные методики измерений АЭ, и накоплен большой опыт использования метода АЭ для решения целого ряда важнейших металловедческих задач:

- создание циркониевых сплавов с высоким сопротивлением разрушению (совершенствование технологии изготовления канальных и оболочечных труб из циркониевых сплавов для атомных реакторов; повышение сопротивления разрушению окисленных оболочек ТВЭЛ из циркониевых сплавов);
- повышение трещиностойкости упрочненных поверхностных слоев и защитных покрытий);
- разработка экономнолегированных хладостойких высокомарганцевых сталей;
- совершенствование технологии изготовления многожильных сверхпроводников для крупных магнитных систем и разработка технологии изготовления проводников из высокотемпературных сверхпроводящих керамик (ВТСП-керамик);
- повышение сопротивления водородному охрупчиванию высокопрочных сталей;
- разработка технологии термического упрочнения боковых рам железнодорожных вагонов;
- разработка методов получения сплавов с ультрамелкозернистой структурой;
- повышение сопротивления коррозионному растрескиванию под напряжением металлов и сплавов;
- оценка прочности зоны соединения слоев в многослойных гибридных материалах для сверхжестких условий эксплуатации;
- мониторинг разрушения сложных технических систем в металлургии, энергетике и транспорте [1, 4-8].

В докладе обобщены наиболее важные результаты этих работ, показывающие широчайший диапазон возможностей метода АЭ применительно к задачам изучения деформации материалов и мониторинга технологий, а также представлены новейшие методы и технологии измерения АЭ в материаловедческих экспериментах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор № RFMEFI57517X0124).*

## Список литературы

1. С.А. Никулин, В.Г. Ханжин. Мониторинг материалов, процессов и технологий методом акустической эмиссии // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1999. № 4. С. 40-48
2. Ханжин В.Г., Штремель М.А. Количественная информация о процессах разрушения, получаемая при измерениях акустической эмиссии // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2009. № 5. С. 53–59
3. Ханжин В.Г., Штремель М.А., Никулин С.А. и др. Оценка размеров внутренних трещин по пиковым амплитудам акустической эмиссии // *Дефектоскопия*. 1990. № 4. С. 35–40
4. S.A. Nikulin, S.O. Rogachev, A.B. Rozhnov, A.Yu. Gusev, A.G. Malgin, N.N. Abramov, K.S. Zharovtseva, V.M. Khatkevich, M.V. Koteneva, E.V. Li. The mechanism and kinetics of the fuel cladding failure during loading after high-temperature oxidation // *Journal of Nuclear Materials*.–2014.–V. 452.–P. 102-109
5. В.Г. Ханжин, С.А. Никулин, В.Ю. Турилина, В.А. Белов, А.М. Арсенкин. Водородное охрупчивание конструкционных сталей в зависимости от легирования карбидообразующими элементами и прочности // *Металловедение и термическая обработка металлов*.–2011.–№ 8.–С. 35-41
6. Никулин С.А., Ханжин В.Г., Никитин А.В., Турилина В.Ю., Заболотникова В.И. Анализ кинетики и механизмов разрушения стали 20ГЛ различной прочности по параметрам акустической эмиссии // *Деформация и разрушение материалов*. 2016. № 12. С. 41-45
7. S. Nikulin, A. Nikitin, V. Belov, A. Rozhnov, V. Turilina, V. Anikeenko, V. Khatkevich. Acoustic emission analysis of crack resistance and fracture behavior of 20GL steel having the gradient microstructure and strength // *Journal of Physics: Conference Series*.–2017.–V. 879.–P. 012009
8. С.А. Никулин, С.В. Добаткин, В.Г. Ханжин, С.О. Рогачев, С.А. Чакушин. Влияние субмикроструктурной структуры и включений на деформацию и разрушение алюминиевых сплавов и титана // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2009. № 5. С. 8-18.

## АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ АНАЛИЗ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

<sup>1</sup> Селезнев М. Н., <sup>2,3</sup> Виноградов А. Ю.

<sup>1</sup>*Технический университет Фрайбергская горная академия (TU Freiberg),  
Фрайберг, Германия,*

<sup>2</sup>*Норвежский технологический университет (NTNU),  
Тронхейм, Норвегия*

<sup>3</sup>*Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия*  
[Mikhail.Seleznev@iwt.tu-freiberg.de](mailto:Mikhail.Seleznev@iwt.tu-freiberg.de)

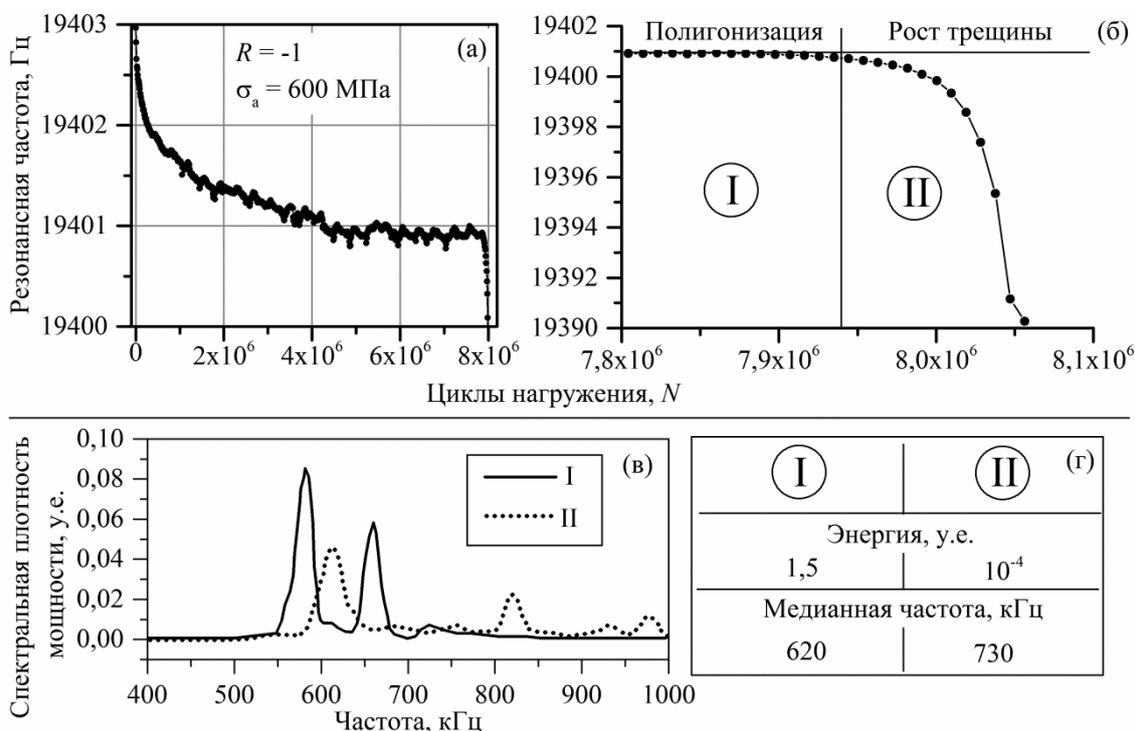
Разрушение деталей при эксплуатации выше условного предела усталостной прочности ( $10^7$  циклов) показало несостоятельность данного параметра применительно к узлам и механизмам, работающим в режиме гигацикловой ( $>10^9$ ) усталости (турбины, поезда, мосты, самолеты и т.д.). Повышенные требования к долговечности материалов требуют многоцикловых усталостных испытаний, которые не целесообразно проводить традиционными методами нагружения (электромеханический, гидравлический) по причине их чрезвычайной длительности (наработка  $10^9$  циклов с частотой 1 Гц займет около 32 лет).

В последнее время широкое распространение получил метод усталостных механических испытаний в режиме ультразвукового резонанса образца при частоте 20 кГц [1], что позволяет достичь  $10^9$  циклов за трое суток. Наиболее информативным параметром мониторинга метода USFT (ultra-sonic fatigue testing) является резонансная ча-

стота  $F_{\text{res}}$  образца, которая резко падает при возникновении усталостной трещины вплоть до разрушения. Однако, постоянные флуктуации  $F_{\text{res}}$  в ходе испытаний, вызванные метастабильностью процесса, флуктуациями температуры и т.д. не позволяют детектировать момент зарождения усталостной трещины (рис. 1а).

Для решения данной задачи был применен метод акустической эмиссии (АЭ). Цилиндрические образцы стали 42CrMo4 испытывались на ультразвуковой резонансной машине (Вена, Австрия) [2]. Широкополосный датчик АЭ «Piko» был установлен через волновод на центральное поперечное сечение резонирующего образца, которое являлось узловой точкой колебаний с нулевым смещением. Акустический контакт между образцом, волноводом и датчиком поддерживался консистентной смазкой и прорезиненными вибро-зажимами. Сигнал АЭ от образца регистрировался беспороговым образом («stream») датчиком и подавался через предусилитель «РАС» с встроенным фильтром частот 600-1200 кГц на плату АЦП с частотой дискретизации 2 МГц.

Резонансное испытание проводилось в режиме импульс/пауза длительностью 0,5 и 2 сек. соответственно, для охлаждения быстро нагревающегося образца. Каждый импульс вмещал около 9500 циклов нагружения и отмечен круглой точкой на графиках (рис. 1а, б). Спектральный анализ полученных сигналов производился при помощи адаптивного алгоритма ASK (Adaptive Sequential k-means) [3] в пределах выбранных импульсов в начале, середине и конце циклических испытаний. Было обнаружено, что характер сигналов остается практически неизменным на протяжении всего испытания (рис. 1, стадия I), в течение которого происходит полигонизация и образование мелкозернистой области (МЗО) вблизи концентратора напряжений [4]. В момент инициации усталостной трещины, сопровождаемой падением  $F_{\text{res}}$  (рис. 1, стадия II) частотный спектр (рис. 1в), энергия и медианная частота сигнала изменяется скачком (рис. 1з).



**Рис. 1.** Пример результатов акустико-эмиссионного анализа ультразвуковых резонансных усталостных испытаний образцов стали 42CrMo4: изменение резонансной частоты  $F_{\text{res}}$  в ходе симметричного нагружения с амплитудой в 600 МПа обнаруживает флуктуации значения  $F_{\text{res}}$  по ходу эксперимента (а), которые перерастают в падение на 10 Гц при возникновении усталостной трещины (б). Спектральный анализ сигналов АЭ до (стадия I) и после (стадия II) возникновения усталостной трещины обнаруживает явное различие в частотном распределении (в) энергии, и медианной частоте сигналов (з)

Таким образом, в настоящей работе впервые экспериментально осуществлено детектирование зарождения усталостной трещины методом АЭ при ультразвуковом резонансном усталостном испытании. Подтверждена принципиальная возможность применения метода АЭ к USFT, до сих пор находившаяся под вопросом. Полученный в работе метод может быть использован для преждевременной остановки усталостных испытаний непосредственно перед развитием трещины. Для развития метода требуются дальнейшие исследования.

#### **Список литературы**

1. Zimmermann M. Very High Cycle Fatigue // *Handb. Mech. Mater.* Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2018. P. 1–38.
2. Weidner A., Lippmann T., Biermann H. Crack initiation in the very high cycle fatigue regime of nitrided 42CrMo4 steel // *J. Mater. Res.* 2017. Vol. 32, № 23. P. 4305–4316.
3. Pomponi E., Vinogradov A. A real-time approach to acoustic emission clustering // *Mech. Syst. Signal Process.* Elsevier, 2013. Vol. 40, № 2. P. 791–804.
4. Sakai T. Review and Prospects for Current Studies on Very High Cycle Fatigue of Metallic Materials for Machine Structural Use // *J. Solid Mech. Mater. Eng.* 2009. Vol. 3, № 3. P. 425–439.

### **О ПРОБЛЕМАХ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АЭ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Разуваев И.В.**

*ЗАО «Научно-производственное объединение «Алькор»,  
г. Дзержинск, Россия  
[alcor@alcor.pro](mailto:alcor@alcor.pro)*

Комплексы интегрального мониторинга технического состояния опасных производственных объектов с применением метода акустической эмиссии активно используются для мониторинга структурной целостности различных технических устройств и сооружений в нефтепереработке, химии, энергетике и других отраслях промышленности. Цели их применения – обеспечение безопасной эксплуатации оборудования и оптимизация его технического обслуживания фактическому техническому состоянию. Основная оперативная задача КИМ – обнаружение опасных дефектов на ранних стадиях развития. Так как комплексы интегрального мониторинга применяются для контроля действующего оборудования, а не выведенного из эксплуатации для проведения диагностирования, то для применения метода акустической эмиссии возникает ряд проблем.

В докладе изложены некоторые результаты научных исследований и конструкторских разработок, выполненных в ЗАО «НПО «Алькор» для решения этих проблем.

Даны перспективные направления развития комплексов мониторинга, с датчиками на новых для метода АЭ физических принципах и современными средствами обработки больших массивов данных.

## ЭФФЕКТ СИНХРОНИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Пантелеев И.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б.

*Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия*  
[ria@icmm.ru](mailto:ria@icmm.ru)

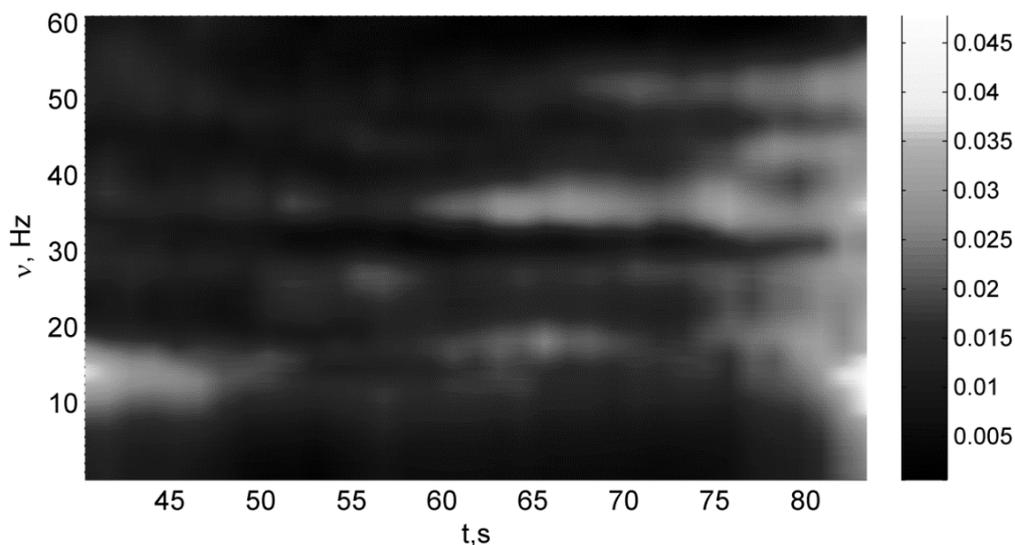
Представление о взаимодействии дефектов (в частности, трещин) в деформируемом материале как механизме формирования очага макроразрушения является в настоящее время общепризнанным и легло в основу ряда моделей деформирования и разрушения хрупких и квазипластичных материалов. Момент начала взаимодействия дефектов не зависит от режима нагружения, а зависит лишь от размеров образующихся микротрещин и характерного расстояния между ними. Для количественного описания степени взаимодействия дефектов в работах различных научных коллективов вводятся параметры, представляющие собой отношение этих двух характерных масштабов (концентрационный параметр в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, параметр структурного скейлинга в ИМСС УрО РАН). Мониторинг изменения этих параметров в процессе деформирования различных материалов и конструкций по данным акустической эмиссии (АЭ) показал их невысокую прогностическую эффективность, вызванную, прежде всего, большой вариативностью и большой погрешностью методов оценки величин среднего размера дефектов и среднего расстояния между ними в каждый момент времени. В связи с этим задача поиска предвестников перехода от дисперсного накопления повреждений к формированию макроразрыва, опирающихся на определение момента активизации взаимодействия дефектов (трещин), является по-прежнему актуальной.

В основе данного исследования лежит представление о том, что формирование очага макроразрушения в структурно-неоднородных квазихрупких материалах является следствием взаимодействия дефектов (микротрещин) различных масштабных уровней, приводящем к их слиянию и укрупнению. Была принята гипотеза о том, что коллективное поведение ансамбля дефектов (их взаимодействие) в структурно-неоднородных материалах при их деформировании должно проявляться в виде корреляции данных акустической эмиссии, зарегистрированной в различных частях деформируемого образца. Целью работы является поиск частотных корреляций в данных непрерывной акустической эмиссии, зарегистрированной в процессе квазистатического деформирования образцов двух различных структурно-неоднородных материалов: мрамора и стекловолоконного ламината.

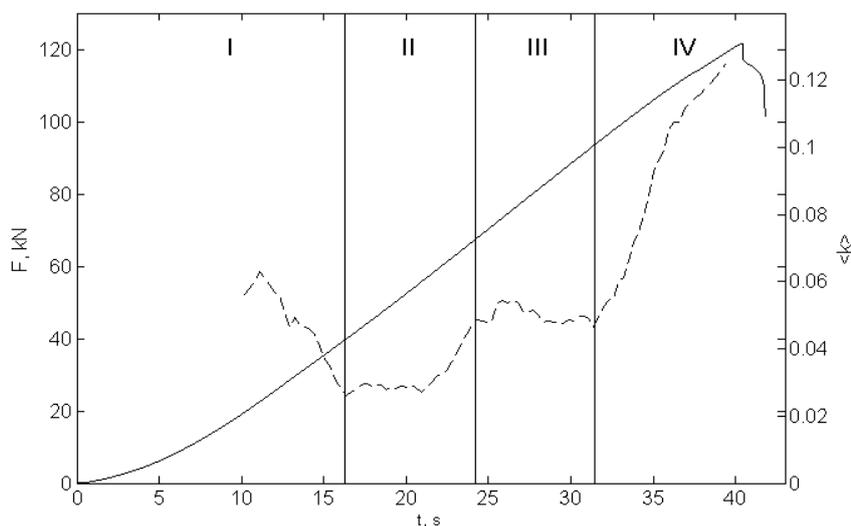
Для избавления от размерного эффекта в анализируемых данных поиск корреляций проводился не в исходных данных, а во временных зависимостях параметров, описывающих статистические свойства исходных данных. В качестве параметров непрерывной акустической эмиссии были выбраны два параметра спектра сингулярности: ширина спектра и величина обобщенного показателя Херста, реализующего его максимум. Оба параметра оценивались в бегущем временном окне отдельно по каждому из измерительных каналов с помощью метода MF-DFA. Для поиска частотных корреляций был использован формализм канонических когерентностей многомерных данных, развиваемый в работах А.А. Любушина. Для четырех (в случае стекловолоконного ламината) и шести (в случае мрамора) временных рядов (число рядов – количество параметров  $\times$  количество измерительных каналов) в бегущем временном окне оценивалась спектральная мера их когерентного поведения. Данная мера отражает степень корреляции многомерных данных на различных частотах.

В результате проведенных исследований показано, что процесс подготовки макроразрушения обоих материалов сопровождается синхронизацией параметров (ширины

спектра сингулярности и показателя, реализующего его максимум) непрерывной акустической эмиссии в выделенных частотных интервалах, ширина которых растет по мере приближения к моменту разрушения (рис. 1). На основе изменения усредненной по частотам спектральной меры когерентности выделено четыре характерных стадии накопления повреждений (рис. 2) и сформулирован критерий начала стадии взаимодействия дефектов при деформировании структурно-неоднородных материалов.



**Рис. 1.** Оценка эволюции спектральной меры когерентного поведения для параметров непрерывной акустической эмиссии, зарегистрированной при деформировании стекловолоконного ламината



**Рис. 2.** Совмещенные зависимости приложенной нагрузки (сплошная линия) и средней по частотам меры когерентности (пунктирная линия) от времени для образца мрамора

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-41-590779-р\_урал\_a).*

# ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ ВИБРАЦИЙ НА ПРОЦЕСС НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ДЕФОРМИРУЕМОМ ГРАНИТЕ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

<sup>1</sup>Пантелеев И.А., <sup>2</sup>Богомолов Л.М., <sup>1</sup>Наймарк О.Б.

<sup>1</sup>*Институт механики сплошных сред УрО РАН, ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия*

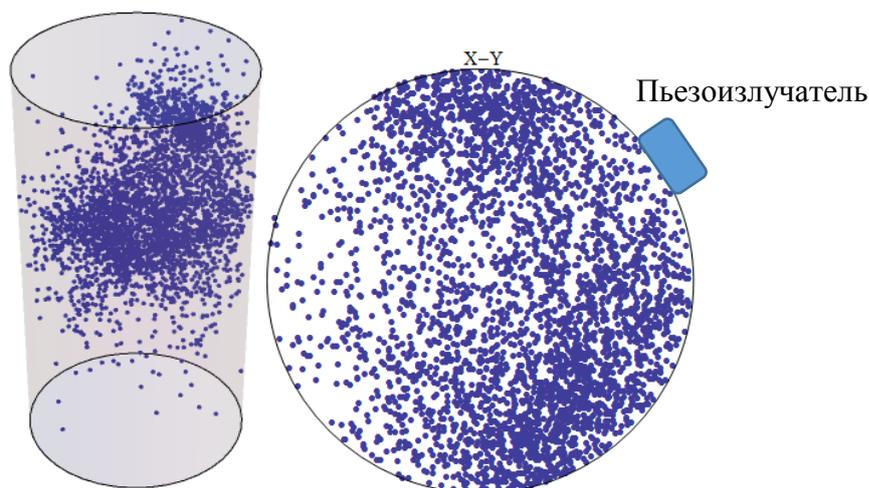
<sup>2</sup>*Институт морской геологии и геофизики ДвО РАН, Южно-Сахалинск, Россия*  
[pia@icmm.ru](mailto:pia@icmm.ru)

Исследованию триггерных эффектов при воздействии вибраций на нагруженную геосреду посвящено большое количество как российских, так и зарубежных работ. В зависимости от пространственного масштаба объекта воздействия этот эффект проявляется в виде мгновенного или отложенного во времени роста акустоэмиссионной или геоакустоэмиссионной активности с различным уровнем выделяемой энергии. Несмотря на большой накопленный объем экспериментальных данных о влиянии вибровоздействий на лабораторные образцы горных пород, вопрос о механизмах этого влияния, зависимости уровня выделяемой энергии от параметров воздействия до сих пор остается открытым.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния непрерывного и кратковременного воздействия вибраций на процесс накопления повреждений в граните, испытываемого на квазистатическое одноосное сжатие. Новизной работы является использование современных подходов к анализу данных акустической эмиссии (АЭ), таких как кластерный анализ многомерных данных, 3D-локация. Проведена серия экспериментов на образцах гранита месторождения Исетское (Свердловская область, Россия) по квазистатическому одноосному сжатию с кратковременным и непрерывным воздействием вибраций. Для инициирования вибраций с заданными параметрами использовался пьезоизлучатель, на который с генератора импульсов подавался сигнал заданной формы, частоты и амплитуды. В экспериментах с кратковременным и непрерывным воздействиями сигнал имел синусоидальную форму с частотой 12.84кГц и амплитудой (размах: +пик - пик) 3.75В, отдельно была проведена серия экспериментов по непрерывному воздействию вибраций треугольной формы с частотой 2.2 кГц и амплитудой (+пик - пик) 3 В.

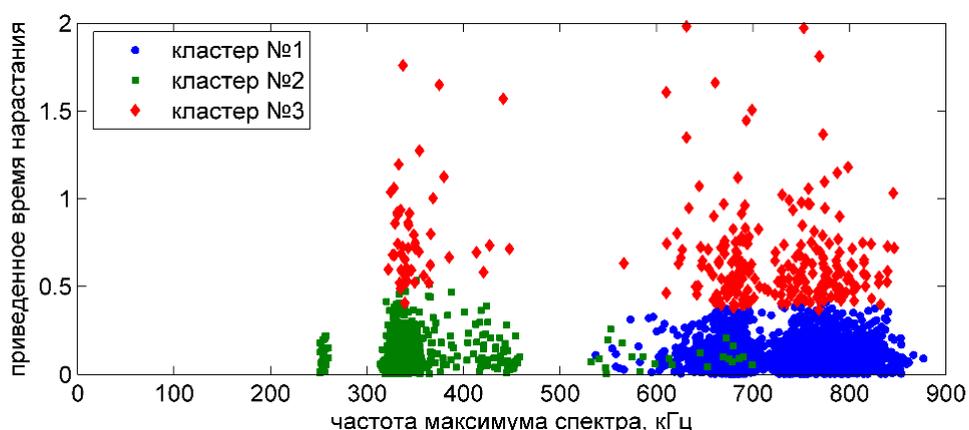
**Кратковременное вибровоздействие.** На основе проведенного анализа наклонов графика повторяемости для максимальной амплитуды и мощности импульсов АЭ, зарегистрированных во время сеансов вибровоздействия и между ними, показано, что для интервалов вибровоздействия наблюдается уменьшение наклона графика повторяемости для амплитуд импульсов АЭ и увеличение наклона графика повторяемости для мощности импульсов АЭ. Это означает, что во время сеанса вибровоздействия наблюдается увеличение низкоэнергетических высокоамплитудных сигналов АЭ. В результате решения задачи трехмерной локации показано, что до четвертого сеанса вибровоздействия источники АЭ равновероятно распределены по верхней половине образца. Во время четвертого сеанса (в конце которого образец разрушился) наблюдается локализация источников слева и справа (в плоскости xOy) от места расположения пьезоизлучателя. Установлено, что во время четвертого сеанса воздействия наблюдается периодическая активизация АЭ предшествующая разрушению. Кратковременный прирост активности АЭ происходит с периодичностью 12–14 с, наблюдалось около 40 циклов.

С использованием метода главных компонент показано, что параметрами событий АЭ, имеющими наибольшую вариативность, являются частота максимума спектра, медианная частота, приведенное время нарастания.



**Рис. 1.** Распределение источников АЭ, зарегистрированных в течение четвертого сеанса воздействия

Кластерный анализ событий АЭ по выделенным трем параметрам позволил разделить всю совокупность лоцированных событий АЭ на три кластера. Первый кластер составляют высокочастотные события АЭ, источниками которых являются микротрещины нормального отрыва. Второй кластер составляют низкочастотные события АЭ, источниками которых являются также микротрещины нормального отрыва. Третий кластер – слабо- и средне-энергетические события источниками которых являются микротрещины сдвига.



**Рис. 2.** Разделение событий АЭ по кластерам в плоскости «приведенное время нарастания – частота максимума спектра»

**Непрерывное воздействие.** На основе проведенного сравнительного анализа данных АЭ в экспериментах с непрерывным вибровоздействием синусоидальными и треугольными импульсами показано, что воздействие синусоидальными импульсами приводит к относительному увеличению высокочастотных импульсов АЭ на фоне уменьшения низкочастотных. В свою очередь воздействие треугольными импульсами приводит, наоборот, к относительному увеличению низкочастотных импульсов АЭ, на фоне уменьшения высокочастотных.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (грант № 17-05-00720-а).*

## ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АДГЕЗИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ

**Овчинников Е.В., Чекан Н.М., Акула И.П., Эйсымонт Е.И.,  
Шагойка А.Г., Кравченко В.И.**

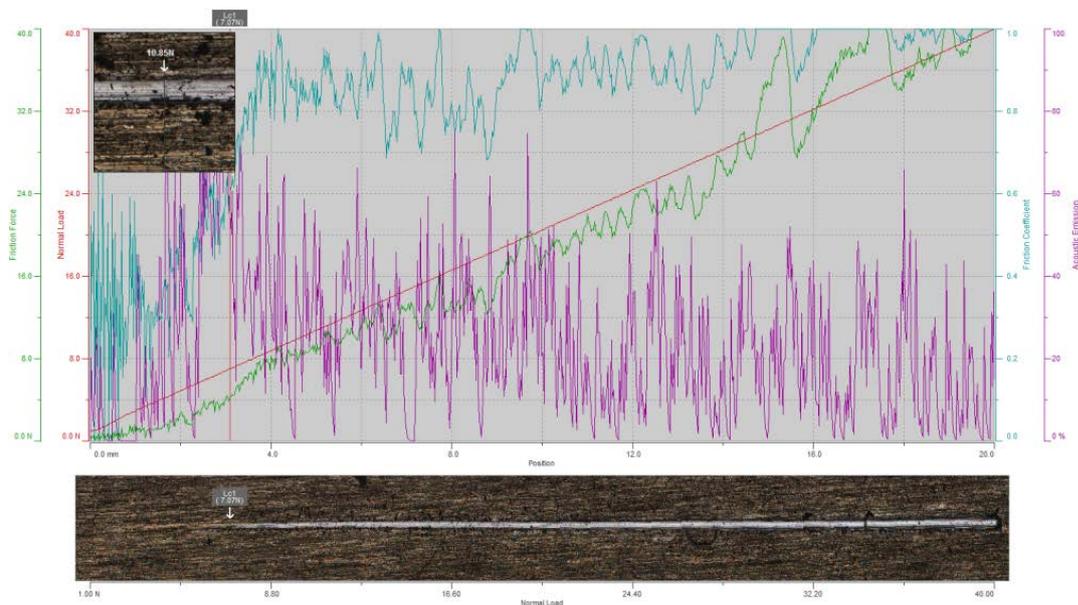
*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,  
Гродно, Беларусь  
Физико-технический институт НАН Беларуси,  
Минск, Беларусь  
[ovchin@grsu.by](mailto:ovchin@grsu.by)*

Адгезионные характеристики вакуумных покрытий определяли методом скретч-анализа. Стандартное оборудование, применяемое для индентирования, применяет модуль для проведения измерительного царапания, исследования износа и профилометрии. Применяется система обратной связи, контролирующая прикладываемую нагрузку, силу, действующую на образец, не зависящую от топографии поверхности. Процедура предварительного сканирования позволяет измерять реальную глубину проникновения при скретч-тесте для характеристики упругого восстановления, используя процедуру постсканирования [1]. Скретч-тестеры оснащены простым в использовании программным пакетом, который позволяет пользователю выполнять скретч-тест при самых разнообразных режимах тестирования, в том числе простое царапание, расширенный скретч-тест (с предварительным сканированием и постсканированием), простое скретч-картирование, скретч-картирование с различными режимами, определяемыми пользователем.

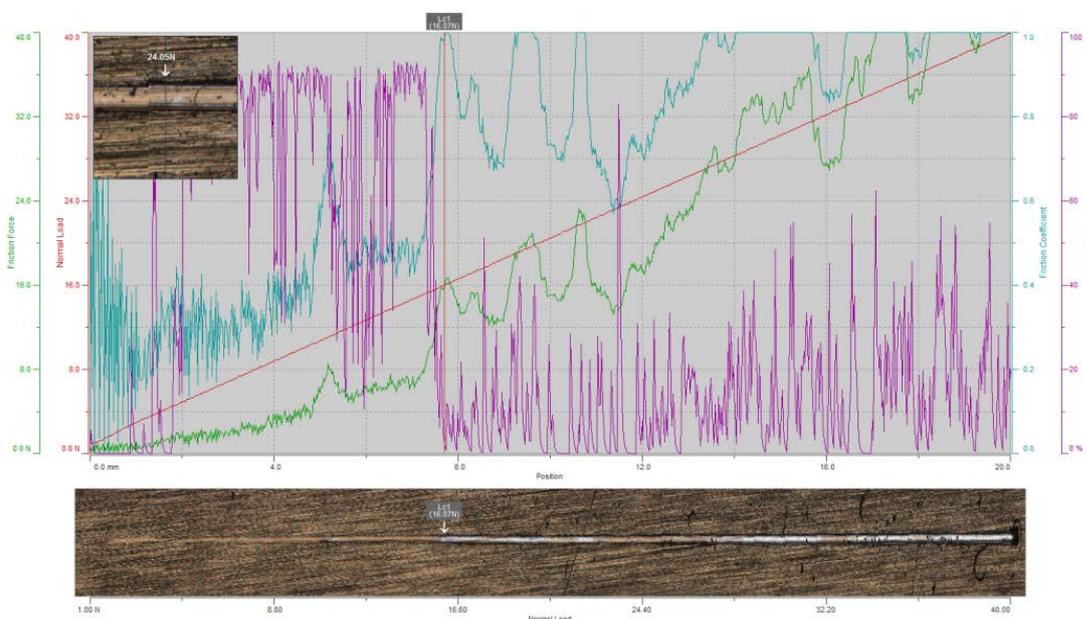
Коммерческие приборы скретч-тестирования имеют датчик силы и систему активной обратной связи по нагрузке. Конструкция измерительной головки включает в себя датчики силы и глубины проникновения (ход индентора по вертикали). Данные функции обеспечивают быстрое время отклика, с высокой точностью и большую гибкость для всех видов измерительного царапания. Вертикальная сила, прикладываемая к царапающему индентору контролируется во время проведения всего измерения [1].

Данное оборудование обычно применяется для исследований твердых и сверхтвердых покрытий, как правило, получаемых методами физического осаждения из паровой фазы (PVD), химического осаждения паров (CVD) или их комбинацией. Скретч-анализ применяется для контроля качества выпускаемых деталей или для оценки новых составов и технологий разработанных покрытий. Такие покрытия (PVD,CVD,PCVD) применяются во многих отраслях, начиная от автомобильных агрегатов (дизельных инжекторов) и заканчивая режущим инструментом и декоративными деталями.

На рисунках 1–2 представлены результаты исследований адгезионной прочности покрытий карбонитрида циркония, который формировался на поверхности стали Р6М5, в том числе предварительно обработанной при криогенной температуре [1]. Исходя из полученных данных видно, что наиболее оптимальными адгезионными характеристиками обладают покрытия, сформированные на образцах из стали Р6М5, предварительно обработанных в криогенной жидкости. Исходя из представленных данных (рис. 1–2), хорошо определяется изменение значений акустического сигнала при адгезионном отслаивании покрытия, что позволяет наряду с оптическими методами определить адгезионного взаимодействия покрытия, в том числе при различных видах модифицирования сверхтвердых вакуумных покрытий.



**Рис. 1.** Результаты скретч-тестирования покрытия ZrCN, сформированного на стали P6M5



**Рис. 2.** Результаты скретч-тестирования покрытия ZrCN, сформированного на стали P6M5, предварительно обработанной в жидком азоте в течение 30 мин

Наиболее оптимальными адгезионными характеристиками обладают покрытия сформированными на стали P6M5, обработанной в течение 30 минут в жидком азоте. Дальнейшая обработка холодом снижает адгезионные характеристики покрытий ZrCN. Однако они все равно остаются выше, чем у покрытий карбонитрида циркония сформированных на исходной стали P6M5.

### Список литературы

1. CSM INSTRUMENTS. Техническое описание. Микро Скретч Тестер (MST 2) [Электронный ресурс] / ООО «Ниеншанц-Сайнтифик». – Режим доступа: [http://lab-nnz.ru/wp-content/uploads/02-MST2\\_Technical-Features\\_2011-RUS.pdf](http://lab-nnz.ru/wp-content/uploads/02-MST2_Technical-Features_2011-RUS.pdf). – Дата доступа: 29.11.2016.

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭ СИГНАЛОВ В ТОНКОСТЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

Терентьев Д.А.<sup>1</sup>, Бардаков В.В.<sup>2</sup>

*ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ», Москва, Россия,*

[tyev@interunis-it.ru](mailto:tyev@interunis-it.ru)

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Москва, Россия*

В настоящее время акустико-эмиссионный (АЭ) метод широко и успешно применяется для оценки технического состояния различных объектов. Большинство АЭ систем работает в диапазоне частот от 30 до 500 кГц, поскольку лишь на нем одновременно удовлетворяются два следующих требования: во-первых, затухание акустического сигнала мало настолько, что полезный сигнал может распространяться на дистанции до нескольких десятков метров, во-вторых, уровень шумов низок по сравнению с полезными сигналами. Работа в указанном диапазоне привносит и сложности, и возможности, нехарактерные как для более низких частот, применяемых в виброскопии, так и для более высоких частот, применяемых в УЗК.

Так, при типичных значениях толщины стенки контролируемого объекта (3–50 мм) сигнал АЭ, как правило, регистрируется в виде комбинации нормальных волн, например, волн Лэмба нулевого порядка. Основной особенностью этого типа волн является наличие дисперсии – зависимости скорости распространения от частоты.

Это приводит к тому, что различные составляющие АЭ сигнала приходят на преобразователь акустической эмиссии (ПАЭ) с разбросом в десятки и сотни микросекунд. В результате используемые для локации источника значения разностей времен прихода зависят не только от координат источника, но и от выбранного оператором уровня порога, а также от амплитуды сигнала и степени затухания различных частотных составляющих.

В простейшем случае, когда объект контроля представляет собой достаточно большую пластину равномерной толщины без дефектов, зависимости скорости распространения волн Лэмба от частоты могут быть рассчитаны аналитически. В этой ситуации анализ спектрограммы сигнала, принятого широкополосным ПАЭ, позволяет извлечь из принятого сигнала такую информацию, как время излучения, дистанция между источником и приемником [1–3], а также толщина стенки контролируемого объекта [4].

В то же время, на форму АЭ сигнала влияют глубина залегания трещины, ее пространственная ориентация и тип, спектр и длительность излученного сигнала, затухание сигнала в объекте и его переизлучение в жидкую среду, контактирующую с объектом, отражения сигнала от краев и других неоднородностей объекта и дефектов. Все это, с одной стороны, еще более усложняет анализ осциллограммы принятого АЭ-импульса, с другой стороны, открывает возможность получать дополнительную информацию о параметрах трещины и акустического тракта. В частности, из литературных источников известны примеры оценки глубины залегания источника АЭ [5] и определения типа дефекта в композитах [6].

Для объектов со сложной геометрией или с наличием дефектов получение аналитического решения прямой и обратной задач распространения АЭ сигнала, как правило, является трудно реализуемым. Достаточно перспективным методом для решения данных задач является использование конечно-элементного моделирования [5, 7].

С целью исследования возможностей анализа АЭ сигналов в сложных объектах, а также для расширения сферы применения АЭ систем в область активных акустических методов, был поставлен ряд численных экспериментов, моделирующих излучение и

распространение АЭ сигнала по объекту контроля. Для ускорения расчетов использовалась двумерная геометрия.

Моделировались источники сигнала, ориентированные как в продольном, так и в поперечном направлении, и расположенные на различной глубине. В качестве геометрии самого источника рассматривались как сила, прикладываемая в одной точке, так и пара сил, приложенных в двух точках при различных дистанциях между ними. Для моделирования временной зависимости излученного сигнала использовались как треугольный импульс заданной длительности, так и участок синусоиды с заданным периодом.

Анализируются как форма колебаний пластины в динамике, так и осциллограмма и спектрограмма сигнала, который был бы принят ПАЭ, установленным в какой-либо точке объекта.

При анализе формы колебаний пластины обнаружено, что уже на дистанциях от источника порядка нескольких толщин стенки объекта и нескольких длин волн в объекте формируются симметричная и антисимметричная волны Лэмба. Анализ спектрограммы формы принятых в различных точках сигналов выявил наличие дисперсионных кривых волн Лэмба и совпадение их скоростей с известными из литературы, что подтверждает корректность выполнения численного моделирования.

Проанализированы вызванные дисперсией зависимость пиковой амплитуды от расстояния и изменение эффективной скорости с расстоянием при одном и том же пороге. Исследовано влияние глубины, местоположения и ориентации источника на сигнал АЭ. Изучено влияние затухания на распространение АЭ сигнала [8].

Выявлено, что влияние краев объекта, поворотов, волноводов, утолщений и утонений стенки, полостей и разнотолщинности (а также наличия слоев из различных материалов), как правило, сводится к отражению части сигнала от неоднородности, а также трансформации части симметричной волны в антисимметричную, либо наоборот.

## Список литературы

1. Suzuki H., Kinjo T., Hayashi Y., Takemoto M., Ono K., Appendix by Hayashi Y. Wavelet Transform of Acoustic Emission Signals, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 14, No.2 (1996, April-June), pp. 69-84
2. Быков С.П., Юшин А.В., Скрыбиков И.Н. Вейвлет анализ акустико-эмиссионных сигналов. XVII Российская научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и диагностика», Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2005 г.
3. Терентьев Д.А., Елизаров С.В. Вейвлет-анализ сигналов АЭ в тонкостенных объектах. - *Контроль. Диагностика*, 2008, №7, с. 51-54
4. Терентьев Д.А.. Интегральная толщинометрия. В мире неразрушающего контроля. 2014, №1. С. 59-62.
5. Hamstad M. A., O'Gallagher A., J. Gary. A Wavelet Transform Applied to Acoustic Emission. *J. Acoustic Emission*, 20 (2002), pp. 39-82.
6. Gallego A., Martinez-Jequier J., Suárez E., Juanes F. J., Valea A. Real-time Algorithm to Classify AE Events of Lamb Waves in CFRP. *Proceedings of the 31st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission*, Dresden, 2014
7. Сыч Т.В., Герасимов С.И., Кулешов В.К. Моделирование распространения акустических волн методом конечных элементов. *Дефектоскопия – 2012*. - №3. – С.3-9.
8. Овчинников А.Л. Особенности распространения сигналов акустической эмиссии утечек в трубопроводах с жидкостью и аппаратура контроля герметичности. Дис. ... канд. техн. наук. 15.11.13. Научно-исследовательский институт интроскопии. Томск, 2006. С. 55-64.

## UNISCOPE. РАСШИРЕНИЕ ГРАНИЦ МЕТОДА АЭ

Бардаков В.В., Елизаров С.В., Барат В.А., Терентьев Д.А.,  
Шиманский А.Г.

ООО «Интерюнис-ИТ», Москва, РФ  
[bardakovv@interunis-it.ru](mailto:bardakovv@interunis-it.ru)

Конкуренция и постоянное развитие технических средств диктуют высокие требования, предъявляемые к современным приборам неразрушающего контроля. Для ряда актуальных на данный момент технических приложений особый интерес представляют интегрированные, многофункциональные приборы, применение которых может охватывать целый ряд задач. Дополнительными требованиями к ним являются аккумуляторное питание, во время проведения измерений, высокая точность измерений и простота в обращении. Прибором, сочетающим в себе все вышеуказанные качества, является UNISCOPE, разработанный компанией «Интерюнис-ИТ».

Прибор UNISCOPE объединяет в себе на базе единой аппаратной платформы 2-х канальную АЭ систему, акустический течеискатель, тензоизмеритель, а также виброметр.

Помимо стандартного АЭ контроля, являющегося основной функцией прибора, UNISCOPE позволяет решать ряд дополнительных задач, актуальных и перспективных на сегодняшний день. Вот некоторые из них:

- контролировать герметичность запорно-регулирующей арматуры (ЗРА)
- оценивать интегральную толщину объекта контроля (ИТ)
- осуществлять контроль движения внутритрубного дефектоскопа (ВТД).

### **АЭ контроль**

В режиме АЭ контроля UNISCOPE может быть использован для контроля объектов, которые обычно контролируются методом АЭ при помощи многоканальных АЭ систем. Более того, данный список может быть расширен объектами, расположенными в труднодоступных районах и теми объектами, к которым, по ряду причин, не может быть подведено сетевое питание.

Помимо всего прочего, при выполнении АЭ контроля прибор может работать в двух режимах: стандартный АЭ режим (пороговый) и режим SMART (беспороговый).

SMART – это интеллектуальный алгоритм беспороговой регистрации данных. Алгоритм осуществляет регистрацию импульсных сигналов АЭ в условиях стационарных шумов. Такой алгоритм является максимально простым и не требует от оператора выбора порога и установки временных параметров регистрации данных. Помимо этого, алгоритм повышает точность локации т.к. время начала сигнала это не время пересечения порога, а его время его начала. При этом работа алгоритма осуществляется в режиме реального времени.

### **Контроль герметичности ЗРА**

Контроль герметичности ЗРА является автоматической функцией, реализованной в приборе UNISCOPE на базе метода АЭ [1]. В качестве объектов исследования при контроле герметичности могут выступать: краны, задвижки, клапаны и дисковые затворы как наземной, так и подземной установки с проходным диаметром от 15 до 1400 мм. Минимальный перепад давления на закрытом затворе при этом должен составлять 0,3 МПа.

Процедура определения герметичности/не герметичности ЗРА и определения величины утечки (в случае если арматура не герметична) является полностью автоматической и занимает от 1 до 15 минут. Минимально обнаруживаемая величина утечки – 1

л/мин для газообразных сред и от 0.2 до 0.5 л/мин для жидких сред в зависимости от проходного диаметра арматуры. Относительная погрешность определения величины утечки составляет порядка 20%.

### **Интегральная толщинометрия**

Одной из наиболее актуальных задач НК является обнаружение коррозионного повреждения объекта. Как правило, для решения данной задачи используются ультразвуковые толщинометры, позволяющие проводить локальное измерение толщины стенки. Недостатками такого способа контроля являются: высокая трудоемкость контроля больших по площади объектов, необходимость снятия изоляции на всей контролируемой области, невозможность контроля участков объекта, к которым по ряду причин затруднен или отсутствует физический доступ.

В целях усовершенствования традиционного ультразвукового метода компанией «Интерюнис-ИТ» был разработан метод интегральной толщинометрии [2]. Метод позволяет определять среднеарифметическое значение толщины стенки и ее дисперсию в области между двумя ПАЭ, установленными на объекте на некотором удалении друг от друга.

При этом в качестве объектов контроля могут выступать трубопроводы, сосуды, резервуары и другие тонкостенные объекты.

Максимальное расстояние между ПАЭ составляет 56 м для объектов без изоляции и 10–15 м с изоляцией. Относительная погрешность определения толщины от 1 до 10% в зависимости от сложности объекта.

### **Контроль движения ВТД**

К основным областям применения НК на сегодняшний день относится контроль трубопроводов. Большинство подобного рода объектов имеют значительную протяженность в осевом направлении, из-за чего ручной контроль всего объекта нецелесообразен как по временным, так и по финансовым затратам. Исходя из этого, большое распространение в данной отрасли получили внутритрубные дефектоскопы. Одной из проблем применения метода внутритрубной дефектоскопии является отсутствие информации о нахождении дефектоскопа в ходе контроля. В результате в случае остановки дефектоскопа, которая может случиться по ряду причин, его местоположение будет неизвестно. Поэтому актуальной задачей при внутритрубном контроле является мониторинг движения дефектоскопа, что может быть реализовано при помощи метода АЭ.

Для оценки эффективности применения метода АЭ для слежения за перемещением дефектоскопа был проведен ряд экспериментов. При этом была подтверждена возможность регистрации движения ВТД на дистанциях до 20 км, а также возможность определения скорости дефектоскопа и его положения (в случае остановки) с точностью до сварного шва.

### **Список литературы**

1. Елизаров, С.В. Проверка герметичности запорной арматуры при помощи портативного многофункционального прибора «UNISCOPE»//С.В. Елизаров, В.А. Барат, Д.А. Щелаков//В мире НК. – 2012. – №1(55). – С. 22-24.
2. Пат. 2540942 Российская Федерация. Способ контроля за динамикой изменения толщины стенки контролируемого объекта/Терентьев Д.А. – 2013.

# ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АЭ ИСПЫТАНИЙ

Комаров А.Г.

ООО «ИНТЕРЮНИС»

Анализ/обработка/оценка данных АЭ испытаний является важным этапом АЭ контроля. Представляемый в докладе программный пакет является развитием пакета AE Workbench, который достаточно широко применяется при оценки данных АЭ испытаний. В новом пакете предусмотрена «прозрачная» работа с данными наиболее распространенных АЭ систем (INTERUNIS-A-Line, PAC, Vallen Systeme). Пакет отличается следующими особенностями:

В пакете поддерживается безфильтрационная модель обработки – на основе оригинального файла данных создается структура анализа (см. рис. 1), включающая как визуальные элементы – таблицы, диаграммы, так и процессоры – фильтрации, математический, событий, процессор критериев. Все визуальные элементы и все процессоры могут использовать как АЭ данные, так и результаты работы процессоров.

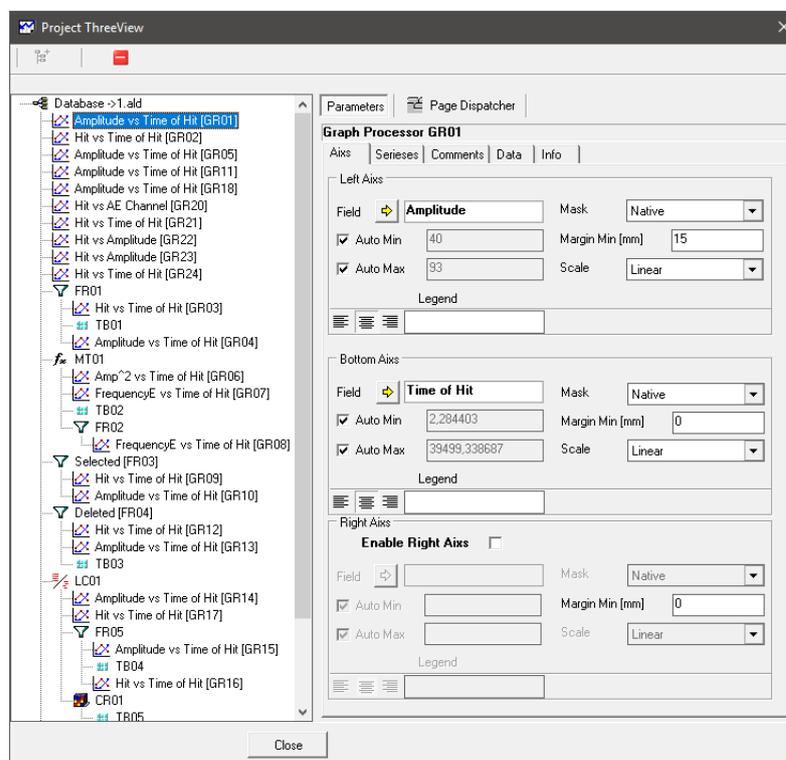


Рис. 1. Структура анализа данных

Пакет работает с нативными данными каждого типа АЭ систем, т.е. набор отображаемых данных соответствует АЭ системе, при этом возможно сохранение обработанной информации в файл аналогичного формата.

Визуальные элементы – диаграммы (см. рис. 2) и таблицы позволяют отображать данные в зависимости от используемой АЭ системы, а также информацию, формируемую процессорами. Для диаграмм доступно точечное, линейное представление, гистограммы, автоматические оси, левая, правая вертикальные оси логарифмического или линейного вида, несколько серий, каждая со своим представлением данных и фильтром.

Помимо «статической» структуры анализа, поддерживаются оперативные операции с данными, включающие выбор области, получение информации и удаление данных. Возможна отмена удаления, в том числе выборочная.

Процессоры фильтрации поддерживают как фильтрацию по всем (любым) параметрам АЭ записей, по результатам процессоров. Поддерживается как «включающая», так и «исключающая» фильтрация.

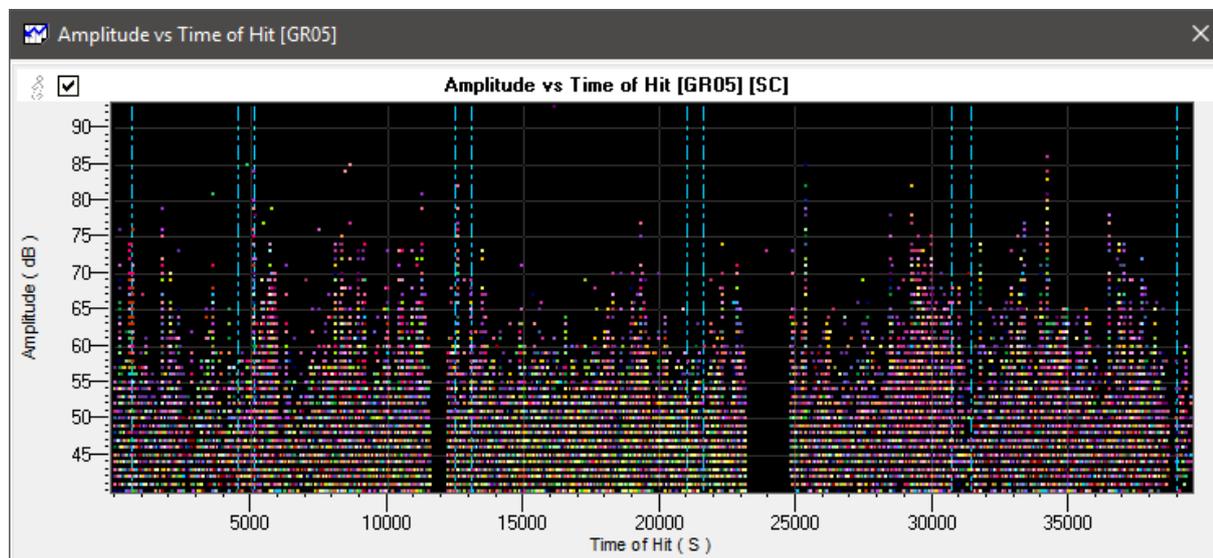


Рис. 2. Диаграмма Амплитуда/Время

Математический процессор, с помощью которого можно формировать новые типы данных из уже существующих, а также из данных других процессоров, группировать их по каналам. Поддерживается как набор стандартных функций, так и программные конструкции.

Процессор событий – позволяет разбить поток данных по событиям, с использованием задаваемых оператором параметров. При этом канал может принимать следующие роли – основной, блокирующий, комбинированный. Процессор добавляет к записи первого импульса события следующие параметры – количество импульсов в событии, канал, разница времени прихода, амплитуда 2-ого – 9-ого импульса в событии, другую важную информацию о событии. Процессоры и визуальные элементы после процессора событий могут использовать и отображать эту информацию.

Процессор критериев использует задаваемую оператором схему испытания, включающую области испытания и диаграмму нагружения. Процессор критериев поддерживает зонный тип локации, ориентируясь на первые импульсы событий. Результаты работы процессора группируются по каналам и приводятся в виде таблицы оценки (см. рис. 3). Одним из вариантов работы процесса критериев является диаграмма ZIP (Zonal Intensity Plot). Форма и численные значения границ зон ZIP, а также параметры, на основе которых определяется местоположение канала на диаграмме определяются оператором.

Использование пакета позволяет строить стандартные схемы анализа/оценки данных, с использованием существующих и вновь разрабатываемых критериев, улучшить качество обработки информации и ускорить процесс подготовки отчетных документов.

№	Num	Hold 1 Hits	Hold 2 Hits	Hold 3 Hits	Hold 4 Hits	Hold 5 Hits	Hold 6 Hits	Выдержки И
1	2							ВЫПОЛНЕНО
2	3							ВЫПОЛНЕНО
3	4			1				ВЫПОЛНЕНО
4	9	1	4					НЕ ВЫПОЛНЕНО
5		2						ВЫПОЛНЕНО
6	5					1		ВЫПОЛНЕНО
7	31	11	4	1				НЕ ВЫПОЛНЕНО
8	14	2	1					ВЫПОЛНЕНО
9								ВЫПОЛНЕНО
10								ВЫПОЛНЕНО
11								ВЫПОЛНЕНО
12					1			ВЫПОЛНЕНО
13								ВЫПОЛНЕНО
14	8	1		1				ВЫПОЛНЕНО

Рис. 3. Результаты работы процессора критериев

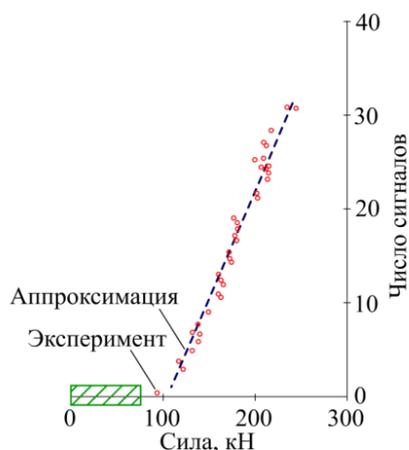
## ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ (АЭ) И ТЕНЗОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Бехер С.А., Коломеец А.О., Попков А.А.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Россия  
[behers@mail.ru](mailto:behers@mail.ru)

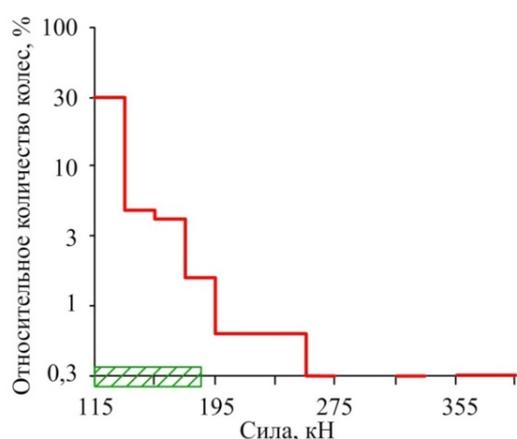
Безопасность объектов после АЭ-контроля может быть гарантирована только при условии, что механические напряжения в эксплуатации до и после контроля, по крайней мере, не превышают уровень напряжений, реализуемых в процессе испытаний. Стандарт рекомендует значение испытательной нагрузки на 5 – 10 % выше максимальной рабочей. Для динамически нагруженных деталей и элементов конструкций определение уровня напряжений является нетривиальной задачей, эффективное решение которой может быть получено только с использованием тензометрии [1]. Таким образом, для динамически нагруженных объектов необходимо комплексное применение нескольких пассивных методов контроля: АЭ при плановых периодических освидетельствованиях для обнаружения развивающихся дефектов (рис. 1) и тензометрии для мониторинга в процессе эксплуатации (рис. 2).

Экспериментальные исследования проводились с использованием цифровой диагностической АЭ-системы СЦАД-16.03 и быстродействующей тензометрической системы Динамика-3 [2] (ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», СГУПС), которые зарегистрированы в государственном реестре средств измерений по №18892-10 и № 66938-17. Объектами контроля являлись элементы ходовых частей вагонов: боковые рамы [3], оси колесных пар и кольца буксовых подшипников. Эти детали в процессе эксплуатации подвергаются динамическому нагружению, которое существенно зависит от таких факторов, как наличие дефектов поверхности катания, сезонные изменения жесткости рельсового пути, тип и распределение груза в вагоне. Динамические силы способны в несколько раз превышать статическую нагрузку 115 кН (см. рис. 2).



Акустико-эмиссионный контроль при ремонте

**Рис. 1.** Зависимость числа сигналов АЭ от испытательной силы при контроле оси с усталостной трещиной



Тензометрический контроль в эксплуатации

**Рис. 2.** Распределение относительного количества колесных пар по уровню динамической силы

В работе представлены методики и алгоритмы оценки информативности параметров сигналов, определения доверительных границ координат источников АЭ в условиях влияния многократных отражений в объекте контроля. Экспериментально установлены закономерности АЭ при развитии усталостных трещин в сталях: ОС, ШХ-4, 20ГЛ по результатам испытаний образцов [4] и реальных объектов.

Выполненные экспериментальные исследования и моделирование методом конечных элементов закономерностей деформирования рельсов под поездной нагрузкой позволили разработать методику измерения вертикальных динамических сил в системе «колесо–рельс» в процессе движения поезда. Методика [5] основана на регистрации деформаций [6] рельса под поездной нагрузкой. Разработана технология комплексного контроля при плановых видах ремонта в депо АЭ-методом и в эксплуатации с использованием тензометрии, критерии браковки в которой согласованы по уровню испытательной и динамической нагрузки.

### Список литературы

1. Тензометрия в транспортном машиностроении / Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И. и др. – Новосибирск: Наука, 2014. – 272 с.
2. Тензометрическая система для обнаружения дефектов поверхности катания колес грузового вагона / Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Бехер С.А., Коломеец А.О. // Датчики и системы. – 2013. – № 10 (173). – С. 38 – 44.
3. Оценка степени опасности усталостных трещин при акустико-эмиссионном контроле литых деталей тележки грузового вагона / Муравьев В.В., Степанова Л.Н., Кареев А.Е. // Дефектоскопия. 2003. № 1. С. 63 – 68.
4. Исследование образцов из материала боковых рам коробчатого сечения методом акустической эмиссии / Степанова Л.Н., Бехер С.А., Бояркин Е.В., Морева Н.А. / Дефектоскопия. – 2013. – № 4. – С. 40 – 51.
5. Разработка методики браковки дефектов поверхности катания колесных пар в движении / Бехер С.А., Степанова Л.Н., Кочетков А.С. / Контроль. Диагностика. – 2011. – № 7. – С. 24 – 29.
6. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов методами конечных элементов и акустоупругости / Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Булдакова И.В. // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – № 1. – С. 41 – 44.

# ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА НАДЕЖНОСТЬ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА

Бобров А.Л., Бехер С.А.

ФГБОУ ВО СГУПС,  
г. Новосибирск, Россия  
[beaver@stu.ru](mailto:beaver@stu.ru)

Акустико-эмиссионный (АЭ) контроль различных сосудов и аппаратов получил широкое распространение для диагностирования их состояния. Для прогнозирования работоспособного состояния важное значение имеет анализ дискретной АЭ несквозных дефектов в сосудах, трубопроводах, объектов авиационной техники, строительных конструкций и т.п. В процессе развития метода на достаточно качественном уровне решены вопросы локации источников, идентификации источников и прогнозирования их поведения в металлических объектах.

Однако при использовании АЭ метода контроля в любом перечисленном случае, при выявлении развивающихся дефектов, ключевое научное значение имеет возможность определения скорости развития обнаруженного источника и, основываясь на полученном значении прогнозирование работоспособного состояния объекта.

Наиболее используемыми в АЭ диагностике являются такие параметры, как активность  $\dot{N}$ , суммарный счет  $N_{\Sigma}$ , суммарная энергия  $E_{\Sigma}$  и их дифференциальные значения, определяемые в ходе испытаний. Согласно [1, 2] считается, что суммарный счет АЭ развивающегося дефекта является степенной функцией от напряжения или коэффициента интенсивности напряжений в вершине концентратора  $K$ , что предполагает пропорциональность суммарного счета и активности импульсов АЭ со скоростью роста трещины.

У активно развивающегося источника  $n$  изменяется в пределах от 1 до 6. В целом степенная зависимость была подтверждена различными исследованиями на различных материалах [1, 3].

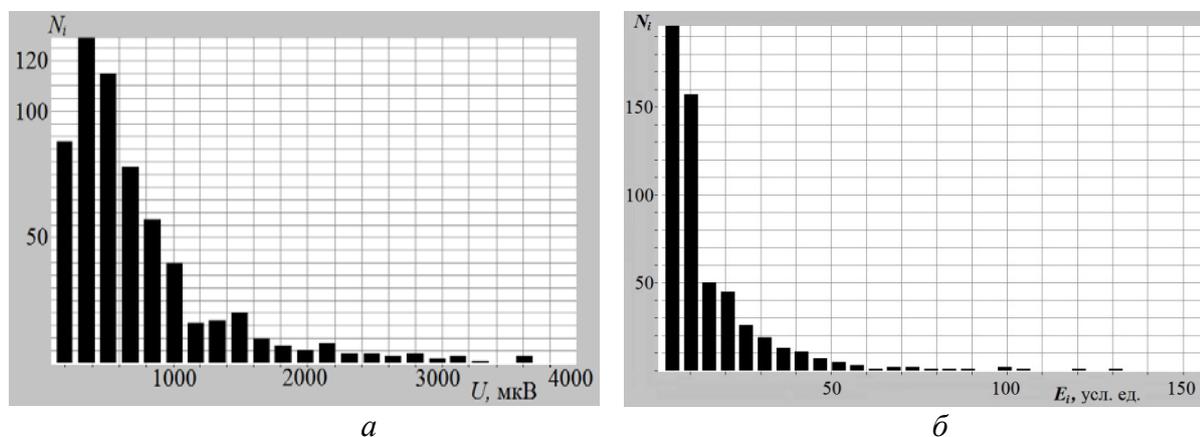
Однако, от большинства источников АЭ сигналы имеют существенный разброс по амплитуде и энергии и регистрируемые параметры зависят от чувствительности каналов. На рисунке 1 приведено распределение сигналов при пластической деформации локального участка по энергии. В большинстве случаев развития трещин, упругой и пластической деформации распределение по амплитуде или энергии выглядит аналогично.

Очевидно, что использовать суммарного счета АЭ или активности в качестве критерия состояния требует жестко фиксированного абсолютного порога чувствительности, что в реальных условиях испытаний выполнить затруднительно.

Как показывает анализ потоковых характеристик АЭ, средняя энергия или суммарная энергия источника гораздо менее подвержены влиянию колебаний чувствительности.

Другим важным аспектом АЭ контроля является прогнозирование поведения металлического объекта по полученным параметрам сигналов. Но, современные научные представления о статическом и динамическом нагружении объектов, а также развитии усталостного разрушения базируются на принципах стадийности этих процессов. В этом случае параметры АЭ на каждой стадии имеет собственную модель связи с параметрами развития источника. А это значит, что оценка состояния объекта должна включать следующие стадии:

- определение независимых источников АЭ в объекте;
- идентификацию источника по типу дефекта, задача этой стадии определить причину излучения АЭ каждого источника;
- в случае необходимости оценка состояния дефекта и прогнозирование поведения объекта.



**Рис. 1.** Распределение сигналов АЭ от развивающейся трещины при статическом нагружении образца по амплитуде (а) и энергии (б)

Исследование акустико-эмиссионной информации, полученной от некоторых распространенных развивающихся источников (усталостные трещины, участки, испытывающие упругую и пластическую деформацию) показывают, что в разных случаях значимыми потоковыми параметрами АЭ являются активность, суммарная энергия сигналов источника, дисперсия максимальной амплитуды или энергии сигналов от источника.

При точной оценке напряженного состояния в момент испытания  $\sigma_{исп}$  в источнике любого из этих потоковых параметров АЭ, для которого определена с заданной вероятностью эмпирическая связь с напряжением решается задача оценки степени развитости дефекта и рабочего напряженного состояния. Если же напряженное состояние  $\sigma_{исп}$  (или коэффициент интенсивности напряжений для развивающейся трещины) определить состояние источника невозможно и необходимы либо циклические испытания, либо оценка по двум потоковым параметрам АЭ, которые эмпирически связаны с характеристикой нагруженного состояния.

### Список литературы

1. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика: Справочник - Москва: Спектр, 2017. - 362 с.
2. Носов В. В. Акустико-эмиссионный контроль прочности сложно нагруженных металлоконструкций / В. В. Носов // Дефектоскопия. – 2015. – № 1. – С. 61-72.
3. Носов, В. В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2016. – 376 с.

# АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В ХРУПКИХ ОБЪЕКТАХ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Бехер С.А., Попков А.А.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»,  
г. Новосибирск, Россия  
[beher@stu.ru](mailto:beher@stu.ru), [zabagy@gmail.com](mailto:zabagy@gmail.com)

Задача выбора оптимальной модели нагружения в процессе проведения акустико-эмиссионного контроля является особо актуальной для хрупких объектов, в которых степень опасности дефекта определяется не по линейным размерам, а по концентрации напряжений, а так же для объектов, которые подвержены ударным или вибрационным нагрузкам в процессе эксплуатации. В работе предложено использование ударного нагружения, которое позволит локально воспроизводить высокий уровень деформаций и механических напряжений.

Проведены экспериментальные исследования по воздействию на образцы из листового стекла, размерами 200×300 мм и толщиной 2 мм, динамической нагрузкой, которая осуществлялась ударом стального шарика массой 6 г, свободно падающего с заданной высоты, о поверхность образца. В образце по центру длинного края искусственно создавалась трещина, длиной 10–12мм. Сигналы акустической эмиссии регистрировались диагностической акустико-эмиссионной системой СЦАД 16.03 (№18893-10 в государственном реестре) с коэффициентом усиления 200 и дискретностью отсчетов АЦП 0,5 мкс. Деформации образца, вызванные динамической нагрузкой, регистрировались быстродействующей тензометрической системой «Динамика-3» (№66938-17 в государственном реестре) с частотой дискретизации 64кГц. В качестве чувствительного элемента использовался проволочный тензорезистор типа ПКС-12-200 (№37343-08 в государственном реестре), который наклеивался на поверхность стекла перпендикулярно направлению распространения трещины и пересекая траекторию ее предполагаемого распространения.

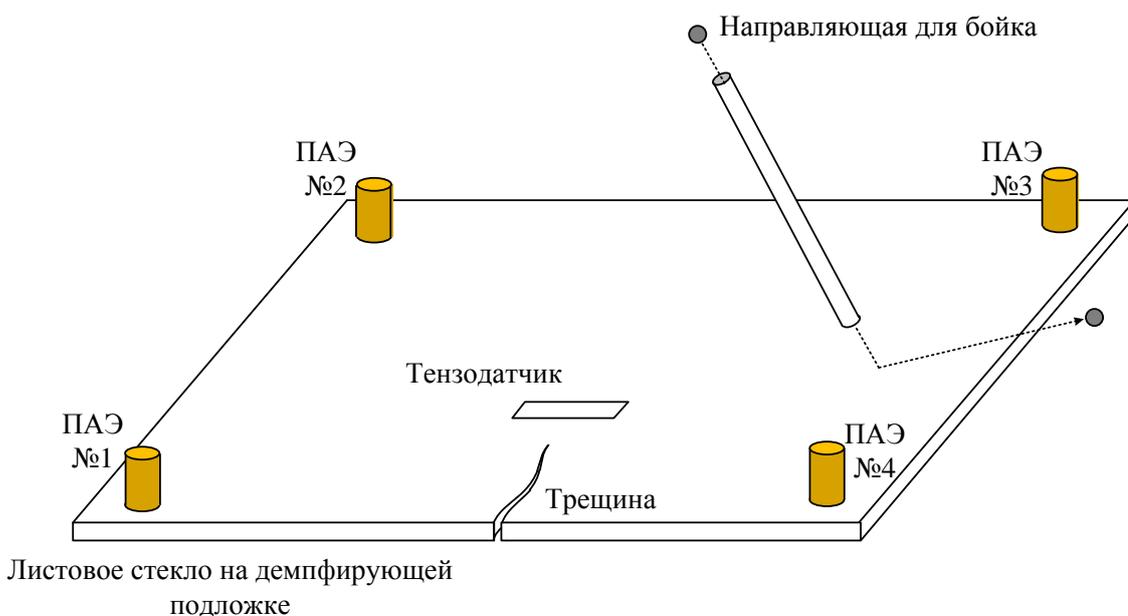
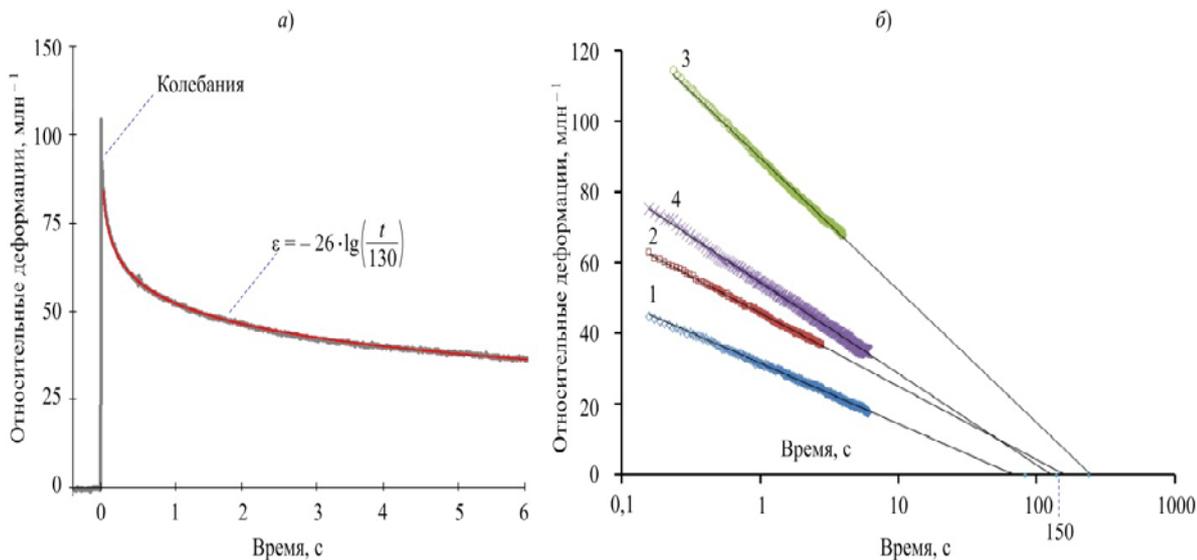


Рис. 1. Схема эксперимента с ударным нагружением листового стекла с трещиной, где ПАЭ № 1 – ПАЭ № 4 – преобразователи АЭ

После удара в течение 1525 мс регистрировались непрерывные колебания, вызывающие смещение кромок трещины. По завершению колебательных процессов наблюдался процесс релаксации деформаций, который удовлетворительно описывался логарифмическим законом. В процессе релаксации кромки трещины возвращаются в первоначальное состояние, что вызывает микро разрушения материала кромок и сопровождается процессами возникновения акустической эмиссии. События акустической эмиссии с достаточной точностью были локализованы в области трещины.



**Рис. 2.** Зависимость относительных деформаций стекла с трещиной от времени в линейном (а) и в полулогарифмическом (б) масштабе при  $t > 50$  мс; 1..4 – порядковые номера ударов

Амплитудное распределение и распределение временных интервалов между сигналами акустической эмиссии удовлетворительно описывались экспоненциальным законом. В общем потоке сигналов выделялись группы, временные интервалы между сигналами внутри которых, значительно отличались от интервалов между группами. Исходя из предположения, что временной интервал между граничными сигналами разных групп нарушает экспоненциальное распределение интервалов в общем потоке, были выведены коэффициенты соответствия сигнала началу  $K_B$  или окончанию  $K_E$  обособленной группы:

$$K_E = n \cdot \frac{t_{m+1} - t_m}{t_m - t_{m-n}},$$

$$K_B = n \cdot \frac{t_m - t_{m-1}}{t_{m+n} - t_m},$$

где  $t_m$  – время регистрации  $m$ -го сигнала АЭ,  $n$  – количество сигналов для подсчета среднего значения интервалов.

Критическое значение коэффициента отношения длительности временных интервалов, превышение которого указывает на то, что экспоненциальное распределение с заданным уровнем значимости нарушено, вычислялось по формуле:

$$K_{кр} = n \left( \sqrt[n]{\frac{1}{p}} - 1 \right),$$

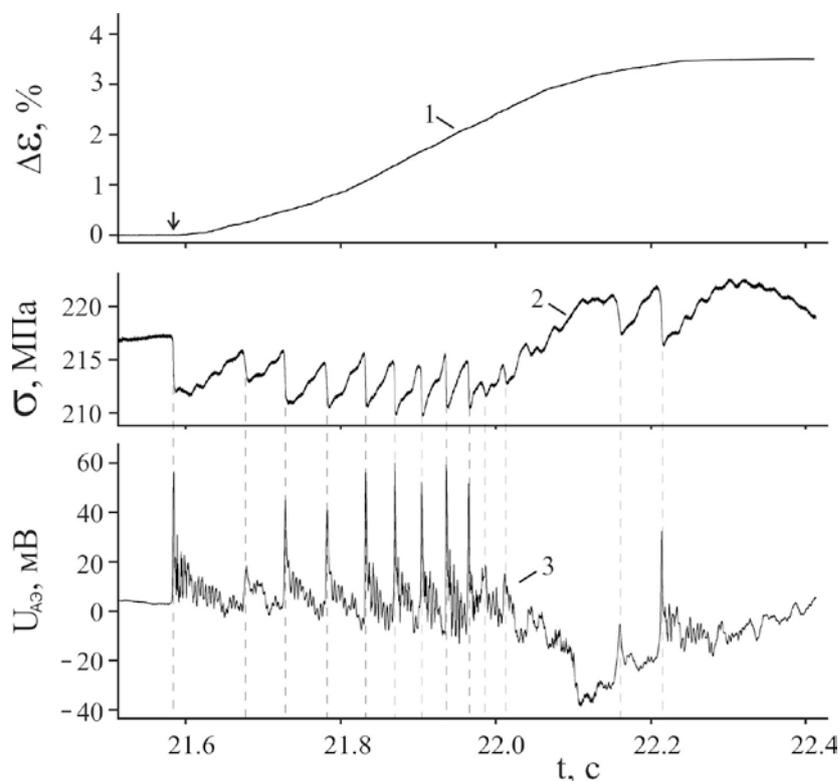
где  $n$  – количество временных интервалов,  $p$  – требуемый уровень значимости.

## ДИСКРЕТНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В ХОДЕ ПРЕРЫВИСТОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Гасанов М.Ф., Золотов А.Е., Шибков А.А., Желтов М.А., Казарцева Е.А.

Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,  
Тамбов, Россия,  
[shibkov@tsu.tmb.ru](mailto:shibkov@tsu.tmb.ru)

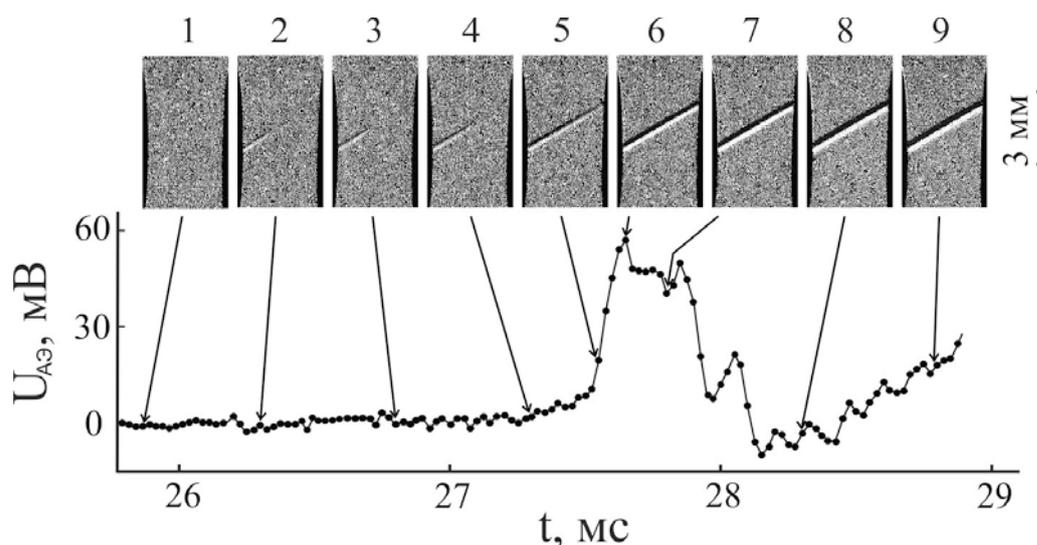
Известно, что локализация пластической деформации должна увеличивать низкочастотные компоненты в спектре акустической эмиссии (АЭ) из-за роста корреляции между прыжками дислокаций в ходе их термоактивированного движения в твердом растворе, например, из-за лавинообразного открепления дислокаций от примесных атмосфер [1]. Поэтому сдвиг спектра АЭ в низкочастотную область является индикатором локализации деформации на более высоком масштабном уровне. В настоящей работе представлены экспериментальные результаты *in situ* исследования корреляции между динамикой деформационных полос и низкочастотным, в полосе частот 10–10000 Гц, акустическим откликом в ходе прерывистой ползучести алюминий-магниевого сплава. Как видно из рис. 1, каждый скачок напряжения сопровождается всплеском сигнала АЭ, который представляет собой последовательность затухающих колебаний с временем затухания около 30 мс. Первое акустическое колебание в структуре всплеска АЭ происходит одновременно с резкой разгрузкой механической системы, а следовательно, с начальной быстрой стадией эволюции деформационной полосы, которая включает процессы зарождения и быстрого расширения новой полосы продолжительностью ~ 1–3 мс.



**Рис. 1.** Макроскопическая ступень  $\Delta\varepsilon$  (1) на кривой ползучести при напряжении  $\sigma_0 = 217$  МПа, силовой отклик  $\sigma$  (2), сигнал акустической эмиссии  $U_{AE}$  (3). Стрелкой отмечен момент зарождения первичной полосы деформации.

Последующие затухающие колебания в структуре всплеска АЭ происходят одновременно с непрерывным восстановлением напряжения, которое связано с медленной стадией расширения деформационной полосы.

На рис. 2 представлены данные видеозаписи начальной стадии эволюции первичной полосы со скоростью съемки 20000 кадр/с, синхронизированные с сигналом АЭ. Как видно, пластическая деформация локализуется сначала в виде зародыша деформационной полосы, который возникает на одном из ребер образца (кадр 2). Этот зародыш полосы в форме узкого клина деформированного материала затем растет в объем образца под некоторым углом к оси растяжения в течении порядка 3–10 мс.



**Рис. 2.** Данные видеосъемки эволюции первичной полосы деформации – триггера развития ступени на кривой ползучести и сигнал АЭ

Таким образом, экспериментально установлено, что первое колебание длительно-стью  $\sim 3-10$  мс в структуре всплеска сигнала АЭ связано с формированием первичной полосы деформации, которая является триггером развития макроскопической деформационной ступени длительностью переднего фронта около 0.5 с в условиях прерывистой ползучести. Предполагается, что наиболее вероятным механизмом генерации акустического сигнала-предвестника является формирование первичной сквозной полосы деформации вследствие зарождения и движения большого количества дислокаций через все поперечной сечение и их выход на внешнюю поверхность образца [2]. Обнаруженные корреляции между сигналами АЭ и процессами образования деформационных полос могут составлять научную основу для разработки методов ранней диагностики локализации пластической деформации в сплавах, демонстрирующих прерывистую ползучесть.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проекты № 15-12-00035 и № 17-79-10404).*

### Список литературы

1. Vinogradov A., Lasarev A. Scr. Mater. 66, 745 (2012).
2. Шибков А.А., Желтов М.А., Гасанов М.Ф., Золотов А.Е. ФТТ. 59, 2363 (2017).

## СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ОСОБЕННОСТЯМИ ИЗНОСА СТАЛИ ГАДФИЛЬДА

<sup>1,2,3</sup>Лычагин Д.В., <sup>1,4</sup>Новицкая О.С., <sup>2,4</sup>Филиппов А.В.,  
<sup>2,4</sup>Колубаев Е.А.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

<sup>3</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,

<sup>4</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

Томск, Россия

[dvl-tomsk@mail.ru](mailto:dvl-tomsk@mail.ru)

Трение является сложным динамически развивающимся процессом. Важную информацию о процессах трения дают исследования деформации, протекающие в зоне трения и прилегающих областях. Для мониторинга состояния трибосопряжения используют метод акустической эмиссии (АЭ). Детальные исследования сигналов АЭ во взаимосвязи с процессами в зоне трения были выполнены авторами работ [1-3], которые установили корреляционную зависимость между сигналами акустической эмиссии, видом и количеством образующихся частиц износа [1], механизмом износа [2], состоянием поверхности трения [3]. Ранее Е.А. Колубаевым с соавторами были прослежены связи сигналов акустической эмиссии с развитием трения поликристаллической стали Гадфильда [4-6]. Несмотря на проведенные работы, многообразие процессов происходящих при трении требует проведения дополнительных экспериментальных исследований, воспроизводящих различные аспекты процесса трения и во взаимосвязи с состоянием материала при фрикционном взаимодействии. Поэтому целью работы является установление физических закономерностей деформации при сухом трении скольжения и связанных с ними параметров сигналов акустической эмиссии.

Материалом исследования служили монокристаллы стали Гадфильда. Сталь демонстрирует высокую степень деформационного упрочнения и обладает высокой износоустойчивостью. С целью изучения влияния кристаллографической ориентации и механизмов деформации использовали монокристаллы с ориентацией оси сжатия [10.7.1] и оси трения [342], а так же монокристаллы с осью сжатия [118] и осью трения [441]. Теоретический анализ напряжения сдвига показал, что в первом случае деформация осуществляется скольжением по плотноупакованным плоскостям, тогда как во втором случае наряду со скольжением может развиваться двойникование. Кроме этого во втором случае одна из плоскостей октаэдрического сдвига проходит под углом 45 градусов к поверхности трения и сжатия. Это оказывает влияние на отслоение приповерхностного слоя, ускоряя отделение частей материала при накоплении критической плотности дефектов и образовании микротрещин. Трение скольжения осуществляли на трибометре TRIBOtechnik по схеме «палец-диск» при комнатной температуре 25°C. Исследование параметров сигналов акустической эмиссии (АЭ) генерируемых в процессе трения скольжения осуществлялось при помощи модуля регистрации ЭЯ-2 разработки Тольяттинского государственного университета.

Исследования деформационного рельефа показали, что введение дополнительной составляющей нагружения – силы трения – определяет включение в деформацию дополнительных систем сдвига по сравнению с одноосным сжатием. Макрофрагментация рельефа определяется схемой напряженного состояния при фрикционном контакте и имеет ориентационную зависимость. Это в свою очередь определяет характер накопления деформации в поверхностном слое и градиент ее затухания по мере удаления от поверхности трения.

Прослежена взаимосвязь сигналов акустической эмиссии с процессами, происходящими в зоне трения. Показана связь огибающей сигнала акустической эмиссии с изменением коэффициента трения. На основе Fast Fourier Transform and Short Time Fourier Transform определены типичные амплитудно-частотные характеристики фреймов сигнала акустической эмиссии в области приработки трибосопряжения и в процессе установившегося трения. Прирост величины огибающей сигнала АЭ обусловлен большим числом актов деформации на стадии приработки трибосопряжения, происходящих при интенсивном формировании и разрушении контактных площадок, отделении и отрыве частиц износа. В области установившегося трения для первой ориентации монокристалла наблюдаются небольшие колебания коэффициента трения и сигнала АЭ. Явление периодических колебаний коэффициента трения связано с окислительным механизмом изнашивания образца. Равномерным накоплением деформации в слое, его разрушением и отделением мелких оксидных и металлических частиц [7].

Для второй ориентации монокристаллов выявлено четыре стадии развития процесса трения и выделены характерные для этих стадий сигналы АЭ. Выполнена оценка изменения во времени медианной частоты. Также установлена частота, на которой достигается максимальное значение мощности спектра сигнала. В результате анализа полученных данных установлено, что для этапа приработки характерными являются сигналы с невысокой амплитудой и ярко выраженным единичным всплеском – burst type signals. На этапе деформационного упрочнения происходит увеличение амплитуды сигнала и количества всплесков. Медианная частота снижается, а мощность спектра АЭ увеличивается. Установившееся трение монокристаллов стали Гадфильда, главным образом, характеризуется чередованием периодов деформационного упрочнения и износа. Прослежена связь между увеличением сдвига в системах скольжения, цикличностью размера области деформации, износом и изменением средней величины энергии сигнала акустической эмиссии. При достижении минимума глубины распространения полос скольжения происходит наиболее интенсивный износ и одновременно уменьшается высота профиля полос скольжения. Совокупное действие интенсивной деформации и частиц износа между поверхностью монокристаллов и контртелом приводит к возрастанию медианной частоты и энергии сигнала АЭ [8].

*Авторы выражают благодарность Колубаеву А.В., Сизовой О.В. и Чумаевскому А.В. за обсуждение работы, Чумлякову Ю.И. за предоставление монокристаллов для исследований.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-00377\_а.*

## Список литературы

1. Haze A. et al. 2008 *Wear* **265**, 831-839.
2. Haze A. et al. 2014 *Tribol. Int.* **72**, 51-57.
3. Haze A. et al. 2009 *Journ. of Adv. Mech. Design* **3**, **4**, 333-344.
4. Rubtsov V. E. et al. 2013 *Tech. Phys. Let.* **39**, **2**, 223-225.
5. [Kolubaev E.A.](#) et al. 2010 *Tech. Phys. Let.* **36**, **8**, 762-765.
6. [Dobrynin S.A.](#) et al. 2010 *Tech. Phys. Let.* **36**, **7**, 606-609.
7. Lychagin D.V. et. al. 2016 *IOP Conf. Series: Mat. Sc. and Eng.* **142**, 012098.
8. Lychagin D.V. et. al. 2018 *Tribol. Int.* **374-375**, 5-14.

# ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РАССЛОЕНИЯ СТЕНКИ ЕМКОСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Растегаев И.А.<sup>1</sup>, Гомера В.П.<sup>2</sup>, Тюпин С.А.<sup>2</sup>, Смирнов А.Д.<sup>2</sup>,  
Григорьева А.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ТГУ, г. Тольятти, Россия,

[RastIgAev@yandex.ru](mailto:RastIgAev@yandex.ru)

<sup>2</sup> Киришинефтеоргсинтез, г. Кириши, Россия

<sup>3</sup> СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Расслоение металла (РМ) стенки, как причина отказа емкостного технологического оборудования нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств стоит на втором месте после коррозии. Поэтому раннее выявление РМ является актуальной задачей обеспечения безопасности эксплуатации промышленного оборудования и предупреждения аварийных ситуаций. Настоящая работа посвящена оценке вероятности обнаружения РМ стенки емкостного оборудования при плановом техническом диагностировании (ПТД) и возможности повышения его качества при применении выборочного ультразвукового (УЗ) контроля (толщинометрии – УЗТ и дефектоскопии – УЗД) и сплошного акустико-эмиссионного (АЭ) контроля (АЭК), как наиболее чувствительных методов неразрушающего контроля (МНК) к трещиноподобным типам дефектов.

При ПТД полную вероятность обнаружения дефекта любым МНК ( $P_{МНК}$ ) можно представить в виде произведения:

$$P_{МНК} = P_B \cdot P_S \quad (1)$$

где:  $P_B$  – вероятность выявления дефекта МНК (чувствительность метода),  $P_S$  – геометрическая вероятность совпадения мест контроля с местами расположения дефектов. В настоящей работе принято, что в случае попадания РМ в зону контроля дефект устойчиво обнаруживается оцениваемыми МНК, т.е.  $P_B = 1$ . Отсюда следует, что  $P_{МНК} = P_S$  т.е. при ПТД вероятность обнаружения дефекта выбранными МНК всецело определяется геометрической вероятностью совпадения мест контроля с местами расположения дефектов. При этом для методов УЗТ и УЗД  $P_S$  определяет геометрическую вероятность перекрытия дефектной площади с площадью контроля соответствующим МНК, а для АЭК  $P_S$  определяет вероятность совпадения дефектной площади с площадью дополнительного контроля другим МНК назначенным для перепроверки результатов АЭК в пределах активной АЭ зоны, т.е.:

$$P_{S\text{ УЗТ}} = N_T / N_D \quad (2)$$

$$P_{S\text{ УЗД}} = (P_{XY} \cdot P_{NXY}) + (P_{RW} \cdot P_{NRW}) + (P_{TW} \cdot P_{NTW}) \quad (3)$$

$$P_{S\text{ АЭК}} = P_X \cdot P_Y \quad (4)$$

где:  $N_T$  – общее число мест измерения толщины стенки по регулярной сетке;  $N_D$  – количество возможных мест расположения РМ длиной  $b$  и шириной  $d$  на корпусе без перекрытия;  $P_{XY}$ ,  $P_{RW}$ ,  $P_{TW}$  – геометрические вероятности перекрытия контрольной и дефектной зон в области основного металла, прямых и Т-образных участков сварных соединений соответственно;  $P_{NXY}$ ,  $P_{NRW}$ ,  $P_{NTW}$  – относительные вероятности появления дефекта в соответствующих подобластях (по эмпирическим оценкам);  $P_X$ ,  $P_Y$  – геометрическая вероятность перекрытия дефектной зоны с областью контроля другим МНК назначенной по АЭ данным.

При совместном использовании нескольких МНК общая вероятность обнаружения дефекта при ПТД учитывается как:

$$P_{\text{ПТД}_i} = 1 - \prod_1^n (1 - P_{\text{МНК}})_n \quad (5)$$

где:  $P_{ПТД i}$  – вариант совместного применения нескольких МНК для обнаружения РМ при основных видах частичного и полного ПТД ( $i = B1 \dots B5$ );  $n$  – количество МНК в варианте  $P_{ПТД i}$ .

Далее используя описанную выше логику и формулы (2)–(5) были получены оценки вероятности обнаружения, стоимость работ и эффективности ПТД при различных сочетаниях применения МНК использованных при ПТД сепаратора водородосодержащего газа с РМ, которые содержали: визуально-измерительный контроль (ВИК), УЗТ, УЗД и гидравлическое испытание (ГИ). АЭК здесь был применен независимо от ПТД, но благодаря ему было локализовано РМ, которое подтверждено УЗК, поэтому  $P_{B УЗК} = P_{B УЗТ} = P_{B АЭК} = 1$ . Результат оценки  $P_S$  обнаружения РМ и эффективности ПТД для данного примера при совместном использовании обозначенных МНК сведен в таблицу 1. При этом принято, что на начальной стадии развития РМ вероятность обнаружения его при ВИК и ГИ равна нулю, т.к. отсутствуют вздутия на металле и сохраняется достаточная прочность стенки оборудования в месте РМ.

**Таблица 1.** Сравнительная таблица эффективности ПТД

Параметр сравнения	Варианты применения МНК для обнаружения РМ при ПТД				
	№ В1 ВИК+УЗТ	№ В2* ВИК+АЭК (при ГИ)	№ В3 ВИК+УЗТ +УЗК	№ В4* ВИК+УЗТ +АЭК	№ В5* ВИК+УЗТ + УЗК+АЭК
Вероятность обнаружения расслоения ( $P_{ПТД i}$ ), %	10,2	74,6/ 56,5	26,7	77,2 / 60,9	81,4 / 68,1
Ориентировочная стоимость ПТД, у.е.**	264,3	354,8	519,1	423,8	678,6
Ориентировочное время выполнения ПТД, мин***	90	288	270	318	498
Коэффициент ценовой эффективности ПТД, %/у.е.	0,03	0,21/ 0,15	0,05	0,18/ 0,14	0,12/ 0,10
Коэффициент временной эффективности ПТД, %/мин	0,11	0,25/ 0,19	0,10	0,24/ 0,19	0,16/ 0,13
<p>* - данные в числителе / знаменателе, соответствуют расчету вариантов при наличии и отсутствии АЭ данных о местоположении дефектной области на локационной карте.</p> <p>** - сумма ПТД рассчитана на основании анализа договоров 4 экспертных и 3 монтажных организаций, при этом за 1 у.е. принята стоимость измерения УЗТ в одном месте (точке, узле).</p> <p>*** - суммарное реальное время, затраченное на выполнение всех видов контроля сепаратора, без учета перекрытия их выполнения по времени.</p>					

Из таблицы 1 видно, что качественно повысить вероятность обнаружения РМ при ПТД с сохранением объема применения выборочных (сканирующих) МНК на прежнем уровне, при приемлемом увеличении общей стоимости работ, возможно за счет планирования мест применения МНК при ПТД по результатам АЭК. Полученные данные также показывают, что при планировании ПТД по данным АЭК геометрическая вероятность обнаружения РМ увеличивается пропорционально уменьшению площади возможной реализации события, которая стремится к АЭ кластеру при наличии локации и к площади антенной решетки при отсутствии локационных АЭ данных. Таким образом, АЭК является существенным, но пока еще слабо используемым, резервом для повышения качества ПТД емкостного оборудования. Конечно же применение АЭК не снимает всех проблем ПТД и не гарантирует 100%-ую вероятность выявления РМ, но безусловно существенно повышает качество, как частичного, так и полного ПТД по сравнению с применением «набора стандартных МНК».

# АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ

Рощупкин В.В., Ляховицкий М.М., Покрасин М.А., Минина Н.А.,  
Кудрявцев Е.М.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова  
Российской академии наук,  
Москва, Россия*

Метод акустической эмиссии (АЭ) находит все большее признание, что обусловлено бурным развитием микроэлектроники, которая позволяет создавать высокочувствительную аппаратуру для этих целей. С одной стороны, метод АЭ нашел широкое применение для неразрушающего контроля материалов и изделий, а с другой стороны, применяется как физический метод исследования кинетических закономерностей происходящих в материалах процессов [1]. Акустическая эмиссия – это термин, характеризующий явление излучения волн напряжения, происходящее при протекании каких-либо внутренних процессов и возникающее вследствие освобождения энергии.

В работе представлены результаты исследований коэффициента затухания ультразвука  $a$  и энергии сигналов акустической эмиссии  $E$  для кобальта [2] (рис. 1) в широком температурном диапазоне и акустической эмиссии при плавлении ряда металлов, в частности, свинца (рис. 2) и висмута (рис. 3).

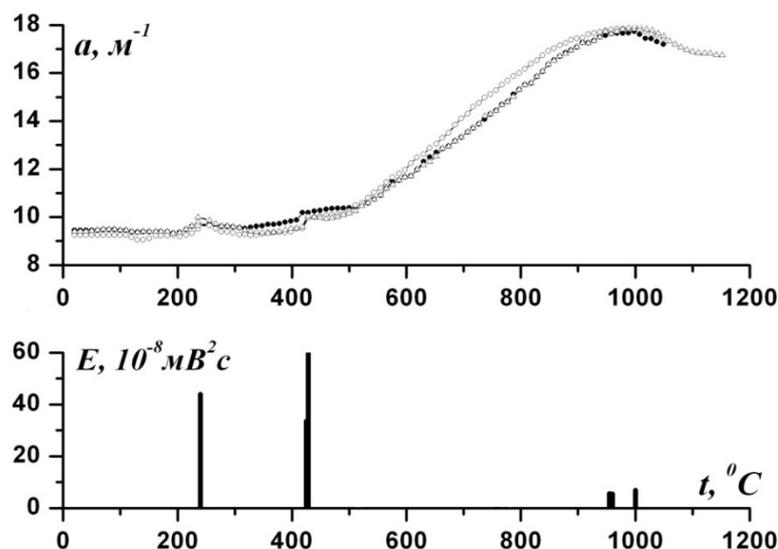


Рис. 1

Опытные данные о коэффициенте затухания ультразвука показали хорошее совпадение с литературными данными о температурных границах ориентационного ( $\sim 230\text{--}240^\circ\text{C}$ ),  $\alpha \rightarrow \beta$  ( $\sim 427^\circ\text{C}$ ) и магнитного ( $\sim 1121^\circ\text{C}$ ) превращений в кобальте. Акустико-эмиссионные исследования подтвердили результаты акустических измерений. Однако, в случае ориентационного и  $\alpha \rightarrow \beta$  перехода АЭ сигналы появляются при завершении фазового перехода, то в случае магнитного – при его начале. АЭ метод использовался при проведении исследований и других чистых металлов, сплавов на никелевой основе и целого ряда сталей.

Метод акустической эмиссии использовался также для изучения процессов плавления свинца (кубическая гранецентрированная решетка) и висмута (ромбоэдрическая решетка).

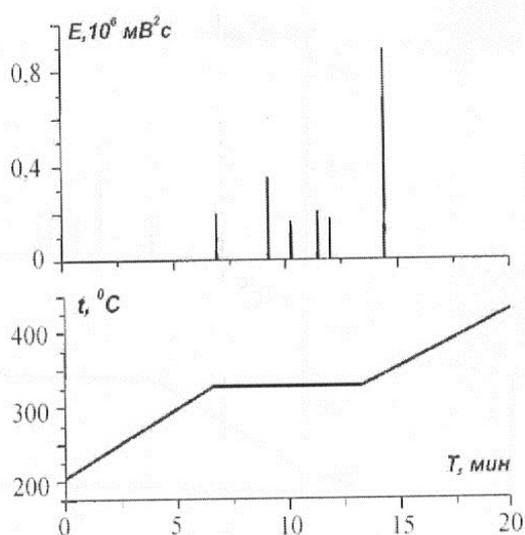


Рис. 2

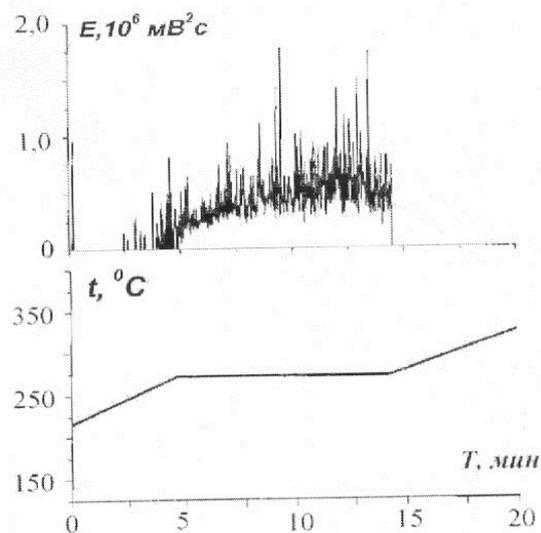


Рис.3

Из рис. 2 видно, что АЭ фиксируется как на площадке плавления ( $327,46^{\circ}\text{C}$ ), что связано с образованием пор, схлопывание которых сопровождается выделением акустической энергии, так и выше температуры плавления – с разрушением структуры ближнего порядка.

Опытные данные для висмута (рис. 3) в значительной мере отличаются от результатов для свинца. Сигналы АЭ появляются в непосредственной близости и продолжают в течение всего процесса плавления ( $271,40^{\circ}\text{C}$ ), по окончании которого излучение сигналов АЭ полностью прекращается.

Как показано в [4], при плавлении свинца плотность жидкой фазы на 3,25 % меньше плотности твердой фазы, а для висмута – на 3,45 % больше. Это доказывает, что различие в поведении металлов при плавлении связано с типом кристаллической решетки. В ходе исследований олова АЭ метод подтвердил предположение о наличии фазового перехода в олове ( $\beta \rightarrow \gamma$  – превращение) при температуре  $\sim 173^{\circ}\text{C}$ .

#### Список литературы

1. Гусев О.В. Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. М.: Наука, 1982. 107 с.
2. И.И. Новиков, В.В. Рошупкин, М.М. Ляховицкий, М.А. Покрасин, Н.А. Минина, А.И. Чернов, Н.Л. Соболев, С.А. Клименко, М.Ю. Копейкина, А.Г. Кольцов. Исследование акустических свойств кобальта. Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 6. С. 870-874.
3. И.И. Новиков, В.В. Рошупкин, М.М. Ляховицкий, М.А. Покрасин, А.И. Чернов. Экспериментальное исследование процессов плавления металлов и сплавов методом акустической эмиссии. Ультразвук и термодинамические свойства веществ. Вып. 37. Курск: Курский государственный университет, 2010. С. 39-45.
4. С.В. Станкус, Р.А. Хайрулин, А.Г. Мозговой, В.В. Рошупкин, М.А. Покрасин. Плотность свинца, висмута и их эвтектического сплава в конденсированном состоянии в диапазоне температур 273,15 ... 1500 К. Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 229-07. М.: Стандартинформ, 2007. 39 с.

## ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ТРИП-СТАЛИ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

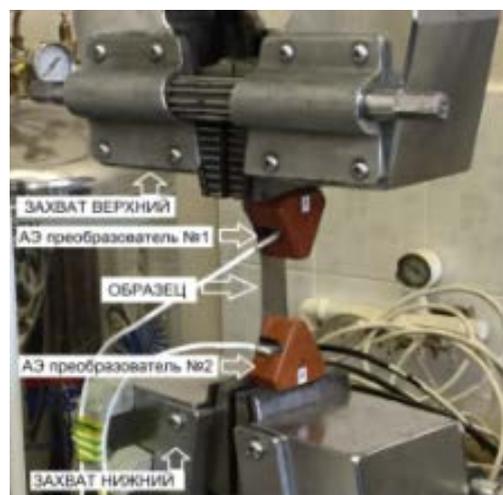
Рощупкин В.В., Терентьев В.Ф., Пенкин А.Г., Покрасин М.А.,  
Пенкин М.А.

ИМЕТ РАН, Москва, Россия,  
[pokrasin@gmail.com](mailto:pokrasin@gmail.com)

С использованием метода акустической эмиссии (АЭ) проведены исследования особенностей поведения при статическом растяжении тонколистовой (толщиной 0,3 мм) высокопрочной аустенитно-мартенситной трип-стали ВНС9-Ш (0,25 С; 14,5-16,0 Cr; 4,8-5,8 Ni; 2,7-3,2 Mo; Mn  $\leq$ 1,0; Si  $\leq$ 0,6; 0,03-0,07 N; S  $\leq$ 0,01; P $\leq$ 0,015; Fe-основа, % мас.) с акцентированием внимания на различии особенностей протекания деформации на площадке текучести и зубчатого течения на стадии деформационного упрочнения. Испытания на статическое растяжение со скоростью 5 мм/мин при комнатной температуре осуществляли с использованием плоских образцов с рабочей частью 20x20 мм на электромеханической 10-тонной машине Instron 3382. Исследование АЭ в процессе деформации образцов из трип-стали ВНС9-Ш проводилось с использованием акустико-эмиссионной диагностической системы СДС1008 [1] (рис. 1а), позволяющей осуществлять регистрацию, обработку, измерение и анализ комплекса параметров АЭ, в том числе распределение спектральной плотности мощности сигналов АЭ в частотном диапазоне 50-1000 кГц и линейные координаты источников АЭ вдоль рабочей части образца. Локация источников АЭ осуществлялась посредством применения двух каналов регистрации АЭ системы, при этом преобразователи АЭ (D1, D2) устанавливали в области переходов от рабочей части образца к более широким его частям (рис. 1б). Расстояние между датчиками составляло 70 мм.



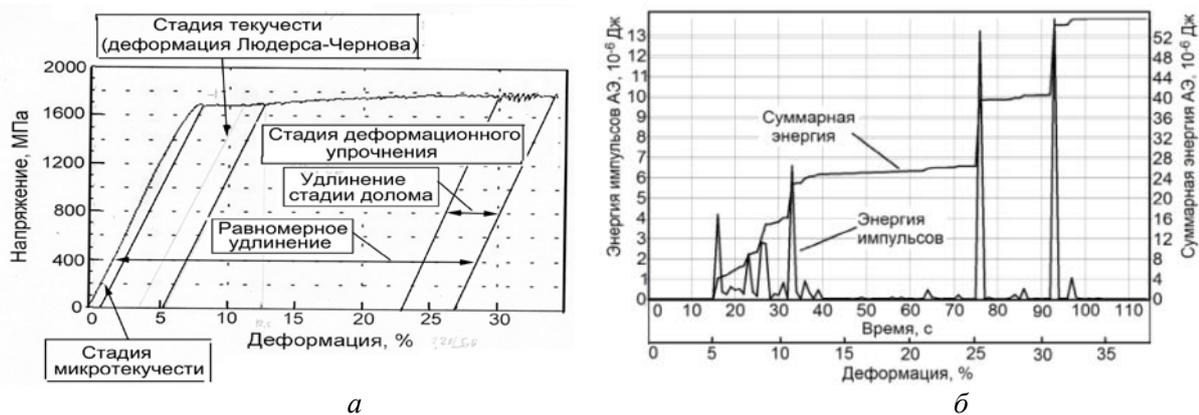
а



б

Рис. 1. АЭ диагностическая система СДС1008 (а) и схема крепления преобразователей АЭ (D1-D2) на образце в захватах испытательной машины (б)

Основной задачей исследования было установление механизма локализации деформационных процессов в трип-стали на площадке текучести и стадии деформационного упрочнения, на которой наблюдается зубчатость, связанная с образованием мартенсита деформации. С этой целью была задействована программа определения координат источников сигналов АЭ «МАЭСТРО» [1].



**Рис. 2.** Кривая растяжения (а) и изменение энергии импульсов АЭ (б) при растяжении образца из трип-стали ВНС9-III в диапазоне  $\varepsilon=5-33\%$

На рис. 2а представлена кривая растяжения трип-стали с указанием основных стадий деформирования. Были получены следующие характеристики механических свойств:  $\sigma_b = 1802 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{0,2} = 1362 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_T = 1650 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 27\%$ ,  $\varepsilon_T = 5\%$ , деформация на стадии микро-текучести 0,7%. На рис. 2б показан характер изменения энергии импульсов и суммарной энергии АЭ в процессе статического растяжения во временном интервале от 15с до 104с ( $\varepsilon = 5-33\%$ ), не включающим участок микропластичности, подробно рассмотренным в [2], и момент разрушения образца, когда энергия импульса на два порядка превышает уровень АЭ на стадии деформационного упрочнения.

Ранее было показано [2], что низкоамплитудные сигналы (скопление I – с амплитудой менее 38 дБ) связаны с движением и размножением дислокаций, а высокоамплитудные (скопление II – с амплитудой более 38 дБ) с возможным фазовым превращением. АЭ сигналы скопления II регистрируются на площадке текучести и преимущественно после локализации деформации, когда в локальных объемах материала происходит интенсивная пластическая деформация (деформация Людерса-Чернова на площадке текучести или шейкообразование на заключительной стадии деформационного упрочнения), сопровождаемая фазовыми превращениями – образованием мартенсита деформации трип-стали. Высокая амплитуда и энергия таких сигналов АЭ позволяют аппаратными и программными средствами определить местоположение таких источников в рабочей части образца и таким образом проследить кинетику распространения полос Людерса-Чернова на площадке текучести и многократное шейко-образование на заключительной стадии деформационного упрочнения.

На основании полученных данных показано, что распространение полос Людерса-Чернова на площадке текучести начинается на 26 секунде в рабочей части образца со стороны АЭ преобразователя D1 ( $x = 3,05 \text{ см}$ , где  $x$  – расстояние от датчика D1) и завершается через пять секунд на противоположной стороне рабочей части АЭ сигналом ( $x = 4,25 \text{ см}$ ). «Волна» многократного шейко-образования начинается на 49 секунде деформирования также со стороны преобразователя D1 ( $x = 3,35 \text{ см}$ ) и достигает противоположной стороны рабочей части образца ( $x = 4,85 \text{ см}$ ) на 86 секунде. Разрушение образца сопровождается АЭ амплитудой 86дБ и происходит в той области рабочей части ( $x = 3,20 \text{ см}$ ), вблизи которой инициировались и деформация Людерса-Чернова и первичное шейко-образование.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08- 02518).*

1. Пенкин А.Г., Терентьев В.Ф., Маслов Л.И. Оценка остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической твердости. М.: Интерконтакт Наука. 2005. 69 с.

2. Пенкин А.Г., Терентьев В.Ф., Рошупкин В.В. и др. Анализ стадийности деформации трип-стали методом акустической эмиссии. Деформация и разрушение. 2016. № 10. С. 35 -40.
3. Терентьев В.Ф., Просвирнин Д.В., Слизов А.К. и др. Особенности поведения тонколистовой аустенитно-мартенситной трип-стали ВНС9-Ш в условиях статического и циклического деформирования. Деформация и разрушение материалов. 2017. № 8. С. 39-47.
4. Терентьев В.Ф., Слизов А.К., Просвирнин Д.В. Проявление трип-эффекта в аустенитно-мартенситной стали ВНС9-Ш при различных скоростях деформации. Деформация и разрушение. 2016. № 1. С. 14-18.
5. Зуев Л.Б., Горбатенко В.В., Данилов В.И. Полосы Чернова - Людерса и эффект Портевена-Ле Шателье как неустойчивости пластического течения. Деформация и разрушение материалов. 2016. № 8. С. 2-8.

## **МЕТОД БЕСПОРОГОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Кузьмин А.Н., Прохоровский А.С., Аксельрод Е.Г., Кац В.А.**

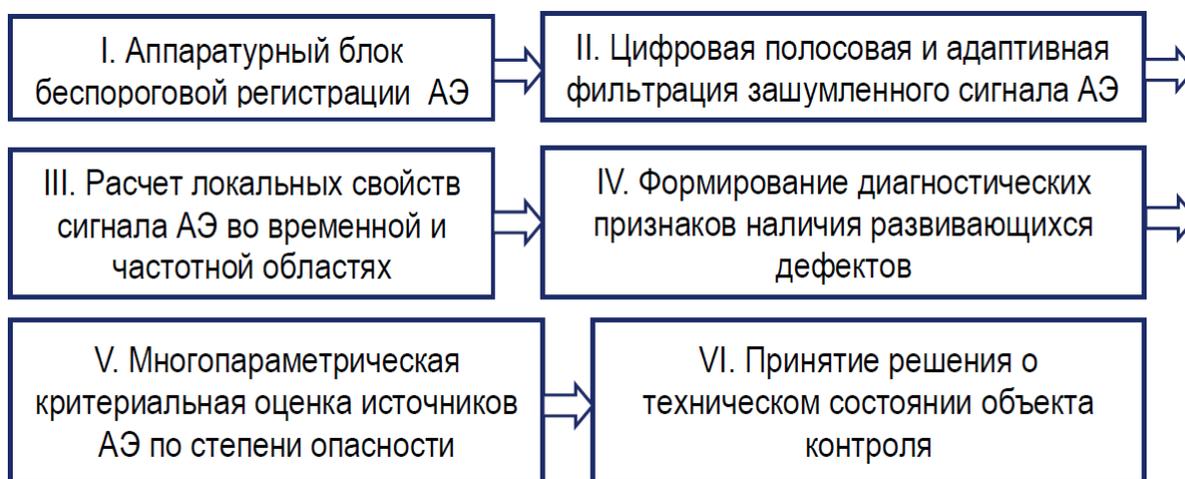
*ООО «Стратегия НК», Екатеринбург  
ООО «Диаформ», Москва*

Надежное обнаружение полезного АЭ сигнала из сигнала помехи в реальном времени и в широком диапазоне отношений сигнал/шум ( $S/N$ ) в системах диагностического мониторинга (СДМ) опасных производственных объектов требует разработки помехоустойчивого алгоритма [1]. Существующие методы обработки зашумленных АЭ данных в частотной/временной областях основаны главным образом на wavelet-декомпозиции и анализе главных компонент [2], применяются в условиях пороговой регистрации данных, обладают слабой помехоустойчивостью и могут быть относительно эффективно использованы при  $S/N > 1$ . Однако даже в этом случае риск внезапного появления на натурном объекте, находящимся в эксплуатации, дополнительных стационарных и нестационарных помех, сравнимых с уровнем входного полезного сигнала, может привести к неправильной и неустойчивой работе блока принятия решений СДМ. По этой причине лимитирующим фактором широкого распространения СДМ в промышленности, построенных на базе измерения данных АЭ, является «ручная» постобработка результатов контроля, приводящая зачастую к противоречивым, неверным сведениям о текущем техническом состоянии объекта контроля.

Принцип построения СДМ, основанный на технологии беспороговой регистрации данных (БРД), связан с отказом от введения порога дискриминации при регистрации данных АЭ [1]. Преимущества БРД по сравнению с пороговой регистрацией заключаются в способе фильтрации шумов и последующей обработке данных АЭ. При этом технология адаптивной фильтрации в БРД позволяет сохранить информативность полезного сигнала АЭ даже при SNR существенно меньше единицы. Принцип построения диагностической системы БРД и технологии обработки данных АЭ (рис. 1) предложен в [3]. По сравнению с пороговой регистрацией основное отличие БРД заключается в том, что анализируются не интегральные характеристики АЭ сигнала, превышающего порог дискриминации, а локальные статистические параметры, не зависящие от уровня случайного шума. Использование статистических параметров, инвариантных по отношению к случайному шуму, дает возможность выделять полезный сигнал, в том числе и при SNR меньше единицы.

Примеры успешного применения разработанной системы БРД с набором диагностических признаков наличия дефектов приведены в [4]. Настоящий доклад посвящен изложению принципов работы ключевого модуля системы БРД – автоматической системы принятия решения (СПР) VI. Особенность ее заключается в том, что, в отличие от традиционных СДМ, классификация дефектов – источников АЭ осуществляется не по стандартным критериям, оценивающим степень опасности по 4-м классам [5], а по набору наиболее информативных диагностических признаков, которые получены посредством обучения СДМ в процессе опытно-промышленной эксплуатации. В основе работы СПР, таким образом, лежит информирование заказчика о техническом состоянии ОПО, которое строится на двух последовательных сообщениях:

1. Информация о наличии в объекте контроля источников АЭ, соответствующих опасным развивающимся дефектам;
2. Информация о степени опасности обнаруженных источников АЭ, основанная на количественной критериальной оценке их параметров в процессе эволюции дефектов при длительной эксплуатации.



**Рис. 1.** Блок схема устройства, реализующего принцип БРД

Предлагаемый способ беспороговой регистрации данных увеличивает эффективность и повышает достоверность диагностического мониторинга натуральных объектов, работающих в условиях низкого соотношения сигнал/шум.

#### Список литературы

1. Кузьмин А.Н., Аксельрод Е.Г., Давыдова Д.Г. Помехоустойчивый метод обнаружения полезного сигнала в системах акустико-эмиссионного мониторинга производственных объектов. // Технадзор. 2013, №4(77), С. 26-29.
2. Терентьев Д.А., Елизаров С.В. Вейвлет-анализ сигналов АЭ в тонкостенных объектах. ООО «ИНТЕРЮНИС», г. Москва, С. 15
3. Патент РФ № 2570592, МПК G01N 29/14 (2006.01).
4. Кузьмин А.Н., Жуков А.В., Аксельрод Е.Г., Шитов Д.В., Давыдова Д.Г., Кац В.А. Акустико-эмиссионный контроль при оценке технического состояния оборудования нефтегазового комплекса. // В Мире НК. 2017, №1, С. 71-80.
5. Баранов В.М., Гриценко А.И., Карасевич А.М. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса. – М: Наука, 1998. – 304 с.

# АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ И АНОМАЛИИ МИКРОНЕУПРУГОСТИ ОБРАЗЦОВ МРАМОРА В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

<sup>1</sup>Богомолов Л.М., <sup>1</sup>Закупин А.С., <sup>2</sup>Мубассарова В.А..

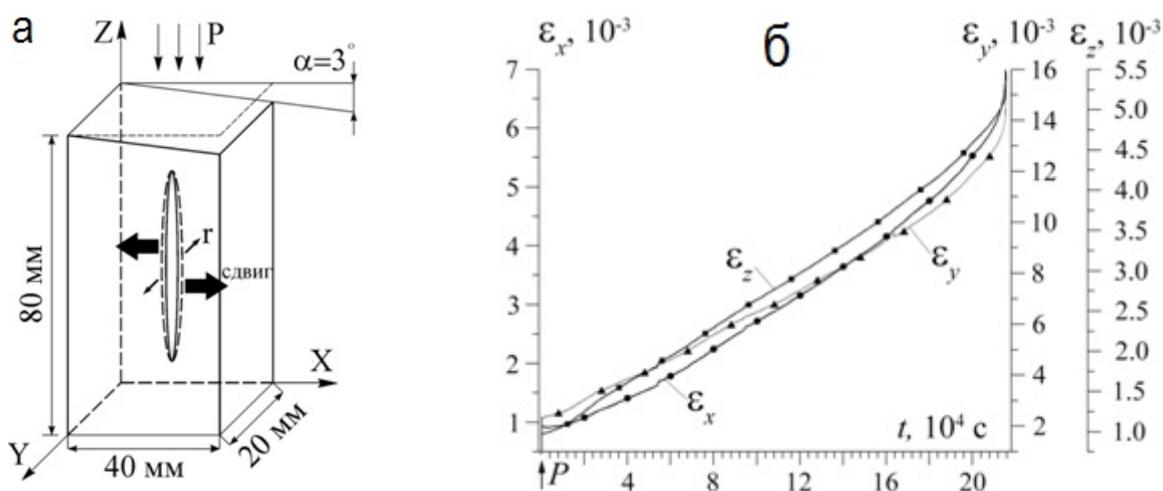
<sup>1</sup>Институт морской геологии и геофизики ДвО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

<sup>2</sup>Научная станция РАН в г. Бишкеке, Киргизия

[bogomolov@imgg.ru](mailto:bogomolov@imgg.ru)

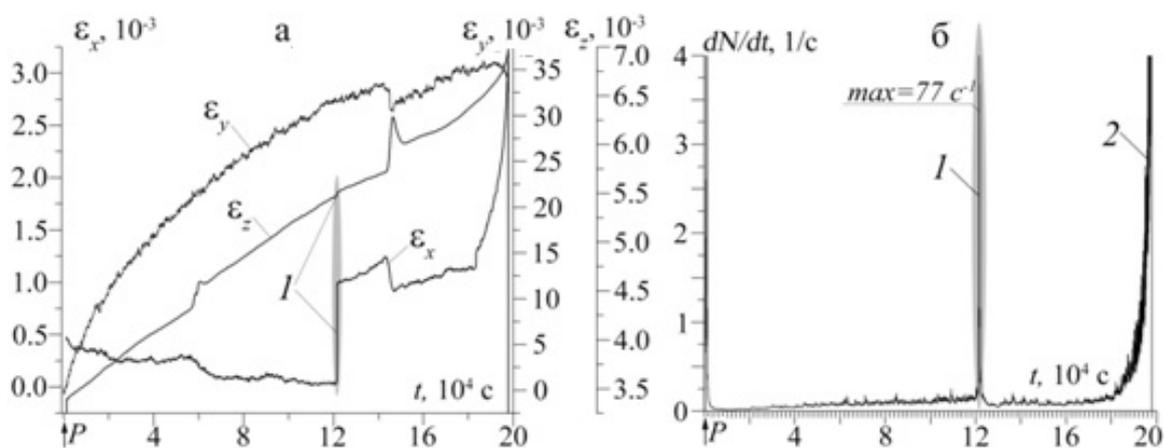
Мрамор – пример горной породы, сочетающий свойства хрупкости и пластичности. В зависимости от скорости нарастания главной нагрузки (осевое сжатие) может реализоваться целый ряд деформационных режимов, при которых ход активности акустической эмиссии (АЭ) существенно различается. В условиях сложного напряженно – деформированного состояния и воздействия внешних физических полей (триггерных эффектов, [1]) такое разнообразие еще больше расширяется. Регистрация АЭ нагруженных образцов мрамора в диапазоне частот сотни кГц – первые МГц открывает возможность физического моделирования процессов в сейсмогенерирующих зонах земной коры, где наряду с землетрясением (аналог макроразрыва) и крипом также могут иметь место промежуточные по энерговыделению события – так называемые тихие и медленные землетрясения. Объяснение таких событий (не регистрируемых сейсмографами) – актуальная проблема геофизики и сейсмологии.

В работе представлены результаты испытаний образцов мрамора на одноосное сжатие на рычажном прессе при заданной скорости нарастания нагрузки. Эксперимент проведен на рычажном прессе с линейной медленно нарастающей нагрузкой. Сигналы АЭ регистрировались пьезопреобразователем SE2MEG-P, установленным на боковой поверхности образца. Сложное напряженно-деформированное состояние материала в образцах неправильной формы было реализовано за счет сдвиговой нагрузки на торцах (из-за наклона верхней пяты в плоскости XY под углом к плоскости XZ, рис.1а). Для образцов мрамора в форме правильных параллелепипедов (с компланарными торцами) ход деформационных кривых следует известным “классическим” зависимостям (рис.1б)



**Рис. 1.** Форма и размеры образца P – направление сжатия,  $\gamma$  – формирование трещины разрыва со сдвигом в направлении OX (а); Зависимости от времени компонент деформации образца мрамора правильной формы при постоянной скорости изменения нагрузки 0.5 Н/с, стрелка – начало роста нагрузки (б)

Результаты эксперимента на образце со скосом на одном из торцов (рис.1а) представлены на рис. 2. На рис. 2а показана временная зависимость продольной,  $\epsilon_z$ , и поперечных,  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$ , компонент деформации. Как видно из графиков, деформации  $\epsilon_z$  и  $\epsilon_y$  увеличиваются по мере роста нагрузки. В значениях  $\epsilon_x$  практически нет изменений до момента (при нагрузке 67.8 % от разрушения), когда наблюдается резкий скачок с приростом деформации на  $9.6 \cdot 10^{-4}$ , соответствующий 34.5 % от общей деформации в этом направлении (цифра 1). Этому событию соответствует лавинообразный прирост активности АЭ (рис. 2 б) до 77 событий в секунду. Ход кривых на рис. 2 с резкими изменениями компонент деформаций сильно отличается от случая на рис. 1. Впервые скачки (явные проявления неупругости) можно наблюдать на нагрузках порядка 60-70% от разрушения. Скачок одной или сразу нескольких компонент деформации (цифра 1 на рис. 2 а), преимущественно поперечной в направлении сдвига, сопровождается сильной активацией акустической эмиссии. После этого увеличивается скорость деформации, хотя по продольной компоненте это становится видно в некоторых случаях с задержкой.



**Рис. 2.** Зависимости от времени, 3 компонент деформации (а) и активности АЭ (б) образца при той же скорости осевого нагружения, но с присутствием сдвига на торцах. 1 – прирост компонент  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_z$  и активности АЭ до  $77 \text{ c}^{-1}$ ; 2 – пиковое значение активности АЭ при разрушении  $98 \text{ c}^{-1}$ . Стрелка – момент начала нагрузки

Особенности деформирования образца (развитие трещины отрыва со сдвигом), дают основания для предположения, что трещина отрыва достигла некоторого порогового размера, за которым начался рост сдвиговой трещины в плоскости XZ, рис. 1а. Эту стадию процесса разрушения, когда происходит скачок деформации в поперечном направлении, но до разрушения еще далеко, удобно характеризовать как **переходное деформационное событие** (ПДС). До ПДС в одном из поперечных направлений деформация изменяется незначительно ( $\epsilon_x$ ), во втором наблюдается рост ( $\epsilon_y$ ). Скорость поперечной деформации ( $\epsilon_y$ ) изменяется от больших значений в первой трети эксперимента до нулевых значений в конце линейного участка деформирования по графику  $\epsilon_z$ . На интервале с ПДС активность АЭ возрастает более, чем в 300 раз и достигает максимума, сравнимого с активностью перед разрушением (рис 2 б), однако полное число событий АЭ при ПДС меньше, чем во втором случае (площади под кривой на рис. 2 б на участках резкого роста 1 и 2).

1. Богомолов Л.М., Закупин А.С., Мубассарова В.А. Особенности влияния электромагнитных полей на скорость деформации образцов мрамора в условиях сложного напряженно- деформированного состояния // Деформация и разрушение материалов. 2017. № 7. С. 20-27.

# ИЗУЧЕНИЕ ЗАМЕДЛЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Мишин В.М., Волоконский М.В.

*Северо-Кавказский федеральный университет, филиал г. Пятигорск, Россия,  
[mishinvm@yandex.ru](mailto:mishinvm@yandex.ru)*

Замедленное хрупкое разрушение (ЗХР) высокопрочных стальных изделий является одним из наиболее опасных видов хрупкого разрушения, поскольку проявляется в результате длительного действия статических нагрузок [1]. Процесс замедленного хрупкого разрушения протекает в три стадии: зарождение, медленный и быстрый (катастрофический) рост трещины [1]. При зарождении микротрещины и скачкообразном ее развитии возникают упругие волны. В то же время сущность метода акустической эмиссии заключается в регистрации упругих волн в образце.

Для изучения физической природы (ЗХР), как многостадийного процесса, считали эффективным применение метода акустической эмиссии. Считали, что этот высокочувствительный метод регистрации процессов микрорастрескивания поможет проанализировать процессы стадийности замедленного хрупкого разрушения.

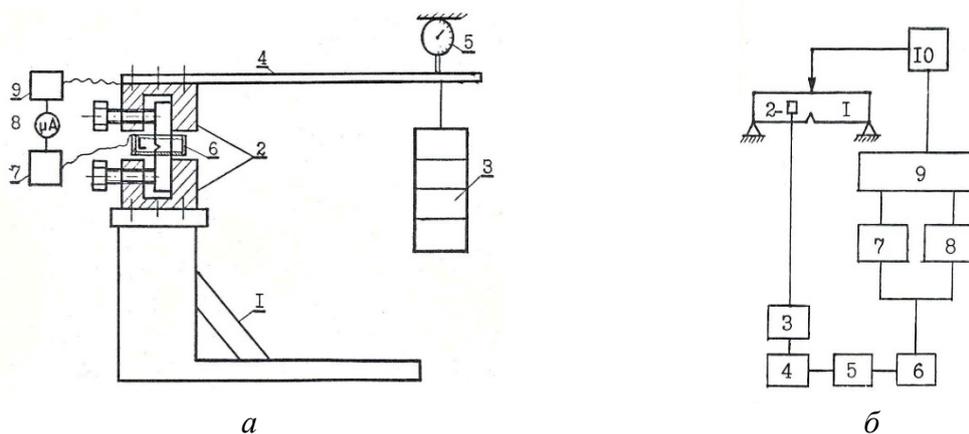
Целью работы являлась разработка методики применения акустической эмиссии для более точного определения момента зарождения микротрещины при замедленном разрушении стали и при разделении стадий развития микрорастрескивания.

## **Материал и методика исследования**

Изучали процесс стадийности ЗХР на мартенситных сталях (18Х2Н4ВА, 40Х), мартенситностареющих (Н18К12М4Т2), метастабильных аустенитных (30Х9Н8М2ГС2), двухфазных аустенито-мартенситных сталях (50Х8Н5, 50Н7Х6) после термообработок усиливающих их склонность к замедленному разрушению. Использовали образцы типа Шарпи. Локальные напряжения в зоне зарождения трещины определяли методом конечных элементов [2].

Момент зарождения трещины и ее последующий рост регистрировали с помощью акустической эмиссии. Использование акустической эмиссии позволяет установить время до зарождения трещины. Экспериментальное исследование по установлению момента зарождения трещины при испытаниях на замедленное хрупкое разрушение проводили на установке, разработанной автором и изготовленной в ЦНИИчермет [3] (рис.1,а,б).

На образец 1 (рис.1,б) устанавливали пьезопреобразователь 2, соединенный с предварительным усилителем 3 (коэффициент усиления 40 дБ). Далее включали полосовой фильтр 4, осуществляющий селекцию сигналов в полосе 200 кГц - 2МГц. Основное усиление сигнала осуществлялось в усилителе 5, имеющем перестраиваемый коэффициент усиления от 0 до 60 дБ. Пороговое устройство 6 обеспечивало исключение влияния шумов аппаратуры и помех. Порог можно регулировать от 10 мВ до 2,4 В. Выходной сигнал порогового устройства поступал на блоки 7, 8 измерения параметров акустического сигнала (суммарной акустической эмиссии и амплитуды сигнала). Далее сигналы регистрировались на самописце 9 типа Н 327/5. На самописец 9, кроме того, выводили информацию о значении нагрузки, приложенной к образцу испытательной установкой (рис.1,а) или машиной "Instron" - 10. При испытаниях приемный преобразователь устанавливали на боковую поверхность образца. Для обеспечения надежного контакта поверхность пьезопреобразователя перед установкой его на образец покрывали слоем масла. В процессе испытаний на самописце записывали значения суммарной акустической эмиссии и амплитуды, а также значения суммарной акустической эмиссии и амплитуды, а также значения нагрузки, приложенной к образцу.



**Рис.1.** *a* – Схема установки для испытания материалов при одновременном воздействии водорода и механических напряжений. (1 – массивное основание; 2 – захваты; 3 – груз; 4 – рычаг; 5 – пьезодачик; 6 – ячейка для наводороживания; 7 – платиновый электрод; 8 – миллиамперметр; 9 – источник тока. *б* – Схема регистрации момента зарождения трещины методом акустической эмиссии при испытаниях на замедленное разрушение.

### Обсуждение результатов

Скачкообразное зарождение микротрещины вызывает акустический сигнал большой амплитуды и малой длительности, что связано с характером упругих волн, возникающих при образовании новой поверхности разрыва материала. Пластическая деформация, возникающая в некотором объеме материала перед надрезом, вызывает появление ряда источников акустических сигналов. Результирующий сигнал в деформируемом объеме получается при суперпозиции сигналов отдельных источников и поэтому имеет длительность, превышающую длительность акустического сигнала, генерируемого скачком трещины. Таким образом, появление акустических сигналов большой амплитуды (около 3 В) и малой длительности (2,5– 10 имп/с) свидетельствует о зарождении трещины.



**Рис.2.** Развитие сети микротрещин перед надрезом образца Шарпи после выдержки под нагрузкой (при 0,8 предела текучести) через 5 мин в стали 30X9H8M2ГC2; x50.

Метод акустической эмиссии позволяет с большой точностью установить время зарождения микротрещины и отслеживать ее подрастание (рис.2).

При замедленном хрупком разрушении зарождение микротрещин и начало их распространения происходят почти одновременно. Установлено, что появление микротрещины в стали в результате реализации механизмов замедленного разрушения при действии постоянно приложенной нагрузки неминуемо приводит к ее дальнейшему медленному и, затем, быстрому распространению.

### Список литературы

1. Sarrak V.I., Mishin V.M. Delayed failure of steels // Materials Science. 1992. V. 28. № 5. P. 419-420.

2. Мишин В.М., Береснев А.Г., Саррак В.И. Способ определения склонности к замедленному разрушению стали при одновременном действии водорода и механических напряжений // Заводская лаборатория. 1986. № 8. С. 69-74.
3. Шиховцов А.Н., Мишин В.М. Оценка факторов, влияющих на микромеханизм замедленного разрушения стали с помощью метода конечных элементов. // Вестник ТГУ. – 2013. – т.18. – вып.4. – С.1913-1915.

## МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ ДЕФЕКТНОСТИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ

**Козинкина А. И.**

*Донской государственный технический университет,  
г. Ростов-на-Дону, Россия,  
[akozinkina@mail.ru](mailto:akozinkina@mail.ru)*

Метод акустической эмиссии (АЭ) в принципе позволяет не только исследовать кинетику дефектообразования при пластическом деформировании материалов, но и проводить количественную оценку этого процесса, поскольку каждому коллективному акту повреждения структуры твердого тела соответствует первичный упругий импульс АЭ. Накопленные экспериментальные данные позволяют утверждать, что зависимость интегральной характеристики потока актов АЭ от остаточной деформации близка к параболической и аппроксимируется ломаной линией с двумя характерными точками излома [1–2]. Первая соответствует началу деструкции, вторая – моменту образования шейки или макронесплошности. Эти особенности выявляются для материалов, как с высокой, так и с низкой активностью АЭ. Статистическая обработка данных и регрессионный анализ и показали, что с вероятностью 0,95 доверительные интервалы значений тангенсов углов наклона аппроксимирующих линий не перекрываются. Это позволяет выделять пластическую и деструкционную компоненты деформации и определять концентрацию дефектов  $c$ .

Измерение и количественная оценка структурных изменений в стадии разрыхления материала обычно осуществляются при помощи просвечивающей и растровой электронной микроскопии, дифракции рентгеновских лучей, прецизионного измерения уменьшения плотности [4]. Однако, несмотря на высокую точность некоторых методов, требования к качествам или размерам исследуемых образцов, трудоемкость измерений, а также разрушающий характер в большинстве случаев ограничивают их применение.

При рассмотрении пластического деформирования тела с учетом образования и роста пор можно показать, что концентрация несплошностей  $c$ , равная отношению объема пор к объему материала, определяется деструкционной компонентой остаточной деформации [3]. Из геометрических соотношений АЭ – диаграмм следует выражение, связывающее концентрацию деформационных дефектов  $c$  с общей остаточной деформацией  $\varepsilon_r$ :

$$c = \left( \varepsilon_r^{1/2} - \delta_D \right)^2 \left( 1 - \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right)^2,$$

где  $\delta_D$  – координата первой точки излома;  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  – тангенсы углов наклона, аппроксимирующих линий.

В таблице приведены численные значения концентрации деформационных дефектов в различных металлических материалах при их пластическом деформировании во время одноосного нагружения. Концентрация определялась по АЭ-диаграммам зависимости общего количества актов АЭ от остаточной деформации в начале процесса деструкции, в середине и при образовании шейки. Для сравнения результатов в таблице также приведено значение  $c_0$ , полученное в начальной стадии деструкции по данным рентгеновской дифракции и электронной сканирующей микроскопии [4].

**Таблица.** Концентрации деформационных дефектов

Материал	Отжиг 2 часа, $T, ^\circ\text{C}$	$c_0$	$c$ по АЭ		
			в начале процесса деструкции	в середине процесса деструкции	при образовании шейки
Ст. У9	700	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Ст. 10ГН2МФА	700	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
Ст. 45	700	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$

Как видно из таблицы, точность определения концентрации дефектов на базе данных АЭ сравнима с точностью методов рентгеновской дифракции и электронной микроскопии. Данные также совпадают с различными оценками критической концентрации дефектов в момент образования шейки, полученными другими авторами [4]. Так, в соответствии со статистической теорией разрушения зарождение макронесплошности происходит при достижении локальной концентрации микронесплошностей  $c \approx 10^{-2} \dots 10^{-3}$ . Это хорошо согласуется с экспериментальными данными, наблюдаемыми при ползучести, в процессе поперечной прокатки и других испытаниях металлических материалов, а также с представлением о концентрационном критерии разрушения.

Необходимо также отметить, что предложенное выражение для определения концентрации микродефектов предполагает ее монотонное увеличение от нулевого значения, в то время как при достижении точки деструкции в поликристаллическом материале образуется  $k_0$  дефектов. Поэтому, приведенные в таблице значения можно считать нижней границей оценки  $c$ .

Таким образом, полученные соотношения для количественной оценки концентрации дефектов и экспериментальные результаты, подтверждают эффективность применения метода АЭ в исследовании и оценке накопления повреждений при деформации и разрушении материалов.

### Список литературы

1. Неразрушающий контроль: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. Т. 7.
2. Козинкина А.И., Рыбакова Л.М., Березин А.В. Оценка степени микроразрушений при деформации металлических материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72. № 4. С. 39-42.
3. Козинкина А.И., Козинкина Е.А. Определение концентрации деформационных дефектов // Прикладная механика и техническая физика. 2010. № 6. С. 164-170.
4. Черемской П.Г. Поры в твердом теле / П.Г. Черемской, В.В. Слезов,
5. В.И. Бетехтин. М.: Энергоатомиздат, 1990.

# СПОСОБЫ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ И ЖИДКОСТЕЙ

Гневко А.И., Челноков А.В., Соловов С.Н., Мукомела М.В., Гразион С.В.,  
Панкин Д.А., Сорокин А.А., Янушкевич В.А., Зяйкин Д.В.

*Военная академия РВСН имени Петра Великого,  
г. Балашиха, Россия  
[a\\_gnevko@mail.ru](mailto:a_gnevko@mail.ru),  
[chelnokov-av@yandex.ru](mailto:chelnokov-av@yandex.ru)*

Метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из наиболее мощных средств в системе обеспечения безаварийной эксплуатации опасных производственных объектов Министерства обороны Российской Федерации, где используются подъемные сооружения и оборудование, работающее под давлением, в составе вооружения и военной техники. Работы по внедрению метода АЭ в практику технического диагностирования элементов ракетного вооружения проводятся при непосредственном участии специалистов Военной академии РВСН имени Петра Великого. К настоящему времени разработаны и внедрены методики технического диагностирования различных объектов в составе комплексов вооружения с применением метода АЭ. Кроме того, разрабатываются новые способы применения АЭ для контроля технического состояния металлоконструкций и жидкостей.

Одним из основных направлений внедрения метода является контроль прочности элементов металлоконструкций с использованием изменений сигналов АЭ при пробном нагружении. Разработан способ проведения акустико-эмиссионного контроля объектов с применением одноканальной аппаратуры [1]. Сущность его состоит в том, что объект нагружают возрастающей нагрузкой со статическими выдержками до величины пробной, которая превышает рабочую, и выдерживают под ней заданное время. Одновременно с нагружением производят последовательный опрос преобразователей АЭ, установленных на поверхности объекта, при помощи мультиплексора с периодом опроса, не превышающим продолжительность серии сигналов АЭ, сопровождающих рост трещины. Во время контроля регистрируют параметры сигналов АЭ, позволяющие классифицировать источник сигналов АЭ по степени опасности. Продолжительность серий сигналов АЭ определяется в ходе выдержек при постоянной нагрузке во время испытаний образцов с трещиной, изготовленных из материала, идентичного по химическому, фазовому и структурному составу материалу объекта. Главным отличием способа является то, что он позволяет использовать одноканальную аппаратуру с мультиплексором. В развитие указанного способа разработан способ проведения грузовых испытаний транспортно-установочного оборудования ракетно-космических и ракетных комплексов [2].

С целью осуществления сплошного контроля болтов ответственных конструкций разработан способ выполнения монтажных соединений на высокопрочных болтах с контролируемым натяжением [3]. Способ заключается в том, что после сборки болтового соединения, перед окончательной затяжкой на болт устанавливают преобразователь АЭ. Затем производят окончательную затяжку, в процессе которой и определенное время после нее регистрируют сигналы АЭ, и по результатам анализа полученных сигналов АЭ судят о качестве болтового соединения.

Одной из проблем, сдерживающей применение метода АЭ, является необходимость нагружения металлоконструкций выше уровня эксплуатационных нагрузок. Нагружение нужно для выявления развития трещин или недопустимой пластической

деформации. Вместе с тем, инициировать движение трещин может возбуждение упругих колебаний в металле под действием коротких мощных импульсов электрического тока. Короткие импульсы не будут вызывать повреждение металлоконструкций, но будут способствовать росту скрытых трещин. Электромагнитные волны распространяются быстрее упругих, что позволяет разделить их действие по времени и использовать АЭ без приложения механических нагрузок.

Как показывают результаты исследований, метод АЭ применим для контроля состояния не только твердых тел, но и жидкостей. Так, разработан способ контроля стабильности высококонцентрированных растворов перекиси водорода [4]. Повышение достоверности и оперативности оценки стабильности перекиси водорода в крупногабаритных сложных емкостях достигается за счет того, что экспериментально устанавливают зависимость активности АЭ, возникающей в процессе выделения кислорода из перекиси, от скорости его выделения. В процессе эксплуатации регистрируют активность АЭ, возникающей в контролируемой перекиси, и по изменению активности АЭ, используя установленную зависимость, определяют скорость выделения кислорода из перекиси, по которой судят о стабильности контролируемой перекиси. Практическое применение способа позволит существенно повысить безопасность применения различных устройств, в которых используются высококонцентрированные растворы перекиси водорода, что откроет путь для более широкого применения эффективного и экологически чистого топлива.

## Список литературы

1. Пат. 2210766 РФ, МПК G01N 29/14. Способ проведения акустико-эмиссионного контроля с применением одноканальной аппаратуры / Гневко А.И., Лазарев Д.В., Казаков Н.А., Гразион С.В.; заявитель и патентообладатель ВА РВСН. – №2001134547/28; заявл. 21.12.2001; опубл. 20.08.2003, бюл.№23. – 6 с.
2. Пат. 2625634 РФ, МПК G01N 29/14. Способ проведения грузовых испытаний транспортно-установочного оборудования ракетно-космических и ракетных комплексов / Челноков А.В., Соловов С.Н., Мукомела М.В.; заявитель и патентообладатель ВА РВСН. – №2016138731; заявл. 30.09.2016; опубл. 17.07.2017, бюл.№20. – 10 с.
3. Пат. 2560255 РФ, МПК G01N 29/14, G01L 5/24. Способ выполнения монтажных соединений на высокопрочных болтах с контролируемым натяжением. / Гневко А.И., Гразион С.В., Гудков В.Б., Мукомела М.В., Соловов С.Н., Сорокин А.А., Панкин Д.А.; заявитель и патентообладатель ВА РВСН. – №2014111769/12; заявл. 28.03.2014; опубл. 20.08.2015, бюл.№23. – 4 с.
4. Пат. 2185619 РФ, МПК G01N 29/00. Акустоэмиссионный способ контроля стабильности перекиси водорода / Гневко А.И., Озеров К.Г., Казаков Н.А., Гуськов В.А., Лазарев Д.В., Кузнецов В.И.; заявитель и патентообладатель ВА РВСН, в/ч 35601. – №99121899/28; заявл. 18.10.1999; опубл. 20.07.2002. – 4 с.

## ВОЗМОЖНОСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ СОСУДОВ

Лепихин<sup>1</sup> А.М., Черняев<sup>2</sup> А.П.

<sup>1</sup>СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН, г. Красноярск,

<sup>2</sup>НИЦ «СибЭРА», г. Красноярск

[sib\\_era@sib.kras.ru](mailto:sib_era@sib.kras.ru)

Металлокомпозитные сосуды находят широкое применение в ракетно-космической и транспортной технике. Конструктивно они состоят из тонкого металлического сосуда (лейнера), обернутого многослойной композитной оболочкой. Такие сосуды имеют высокие показатели прочности и герметичности при существенно меньшем весе, в сравнении с металлическими сосудами. Сложность расчетно-аналитического прогнозирования работоспособности МС предопределяет интерес к экспериментальным исследованиям деформирования и разрушения. Основной вопрос экспериментальных исследований МС заключается в выборе метода и средств неразрушающего контроля, обеспечивающего возможность анализа процесса накопления повреждений. Одним из наиболее эффективных методов в этом направлении время является метод акустико-эмиссионного (АЭ) контроля [1].

НИЦ «СибЭРА», совместно с СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН и ООО «Интерюнис», были выполнены уникальные пневматические испытания натуральных образцов МС на прочность до разрушения с применением АЭ контроля. АЭ контроль проводился с использованием системы A-Line 32D, с записью АЭ сигналов по 6 каналам, и системы L-Card, с записью информации по 4 каналам. A-Line 32D регистрировала АЭ сигналы при выдержках МС на фиксированных ступенях внутреннего давления. Обработка полученных сигналов проводилась с использованием встроенного программного обеспечения. L-Card использовалась для записи АЭ сигналов в течение всего процесса испытаний. Обработка полученной информации проводилась вручную, с использованием методов спектрального анализа.

Результаты АЭ контроля показали следующее. При внутреннем давлении до 10 МПа выявляются в основном пассивные источники АЭ сигналов II класса по классификации [2, 3]. Множественное появление источников и локализация зон АЭ сигналов наблюдается при давлениях свыше 13-15 МПа. Основная масса источников сосредоточена в области сварных соединений фланцев с днищами лейнера, а также в области интенсивного трения поверхностей лейнера и композитной оболочки. Источники АЭ III и IV классов фиксируются при давлениях свыше 18-20 МПа.

Основной вопрос АЭ контроля заключался в определении наиболее эффективного критерия оценки опасности АЭ сигналов для отбраковки МС. В данном исследовании рассматривались такие критерии, как амплитудный критерий, локально-динамический критерий, интегральный критерий, интегрально-динамический критерий, критерий кода ASME, критерий MONPAK и др. [2-4]. Однако оказалось, что ни один из указанных нормативных критериев опасности АЭ сигнала не удовлетворяет в полной мере требованиям контроля МС. Используемый в программном комплексе A-Line 32D локально-динамический критерий дает консервативную оценку (перебраковку) опасности АЭ сигналов. Известный индекс Фелисити [4] также не может рассматриваться как исчерпывающий критерий отбраковки МС. Сложность задачи выбора критерия в данном случае связана не с недостатками метода или особенностями критериев, а с особенностями объекта контроля. Совместное деформирование лейнера и композитной оболочки приводит к сложной картине АЭ. Выделение АЭ сигналов формирующихся очагов разрушения удается получить только на заключительных стадиях деформирования МС.

Анализ полученных АЭ сигналов на заключительных стадиях испытаний МС показал следующее. При давлении свыше 20–22 МПа выявляются катастрофические источники АЭ IV класса. За 5–7 секунд до потери герметичности или разрушения МС резко возрастала активность по каналу датчика на расходном фланце лейнера (с 500 до 1200 сигналов в сек.). При этом АЭ активность по каналам датчиков на композитной оболочке не превышала 200–220 сигналов в сек., при амплитуде сигналов до 75 Дб. Плотность расположения источников АЭ остается неоднородной, с максимумом в зоне трения поверхностей лейнера и композитной оболочки. При достижении предельного состояния (ПС) в виде нарушения герметичности на диаграмме амплитуды отмечается характерный "горб" (подъем и последующий спад) средней амплитуды сигналов. При достижении ПС в виде разрушения диаграмма амплитуды характеризуется неубывающими значениями средних амплитуд. Таким образом, анализируя характер диаграмм АЭ сигналов в процессе испытаний можно прогнозировать вид ПС: нарушение герметичности или полное разрушение.

Анализ результатов контроля системой L-Card позволил сделать более глубокие выводы о процессах деформирования и разрушения МС. Исследования спектров показали, что в потоках АЭ сигналов присутствуют характерные узкополосные и широкополосные сигналы, активность которых возрастает по мере роста приложенной нагрузки. Узкополосные сигналы (сигналы 1-ого типа) характеризуются малым временем нарастания и малым временем спада, а также узкополосным спектром. Широкополосные сигналы (сигналы 2-ого типа) характеризуются малым временем нарастания и большим временем спада, а также широкополосным спектром с высокой долей энергии в области низких частот. Первый тип АЭ сигналов соответствует процессам развития повреждений в матрице композитного материала. Эти повреждения не являются критическими с точки зрения обеспечения прочности МС. Второй тип АЭ сигнала соответствует процессам развития повреждений волокон композитного материала, приводящих к снижению прочности композитной оболочки. С учетом этого, в качестве критерия безопасного состояния МС может быть предложен нулевой суммарный счет АЭ сигналов 2-ого типа. Отсутствие сигналов этого типа свидетельствует о том, что стадия разрывов волокон еще не достигнута, а текущая активность объясняется преимущественными процессами растрескиванием матрицы, не оказывающими существенного влияния на прочностные свойства МС.

## Список литературы

1. Поллок А. Акустико-эмиссионный контроль / Металлы, 9-е издание, т.17, ASMI (1989) с. 278 - 294.
2. ГОСТ Р 52727-2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.
3. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
4. ASTM, Practice for Acoustic Emission Examination of Fiberglass Reinforced Plastic Resin (FRP) Tanks/Vessels, E1067, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 19428-2959, 2001.

## АЭ КОНТРОЛЬ БЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ИСПЫТАНИИ

Нефедьев Е.Ю.<sup>1</sup>, Гомера В.П.<sup>2</sup>, Смирнов А.Д.<sup>2</sup>, Григорьева А.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Крыловский государственный научный центр, г. Санкт-Петербург, Россия,  
[ne246@yandex.ru](mailto:ne246@yandex.ru)

<sup>2</sup> Киришиннефтеоргсинтез, г. Кириши, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский гос. университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия

В работе рассматриваются результаты использования метода акустической эмиссии (АЭ) для мониторинга накопления повреждаемости металлобетонного макета на стадии тепловых испытаний. Мониторинг проводился в течение 21 суток с целью определения времени образования, мест локализации и размеров трещин в бетонном массиве, а также для слежения за процессом их развития.

Объектом тепловых испытаний является масштабный железобетонный макет с теплоизоляцией диаметром 4000 мм и высотой 2550 мм

Для проведения контроля методом АЭ применялась акустико-эмиссионная измерительная система AMSY-5 производства Vallen-Systeme GmbH.

Внедренные в макет волноводы позволили проводить непрерывный мониторинг растрескивания бетонной конструкции при тепловых испытаниях в диапазоне температур +20°C до +420°C.

Современные подходы для АЭ контроля железобетонных изделий, описанные в работах [1-3], как правило, разработаны и привязаны к конкретному аппаратно-программному обеспечению исследований и определенным условиям проведения испытаний.

Поскольку наиболее содержательной задачей АЭ контроля является регистрация АЭ-событий, связанных с образованием и ростом трещин в бетоне (место и время образования, оценка размера, эволюция), требуется идентификация этих событий в общем массиве данных и выделение сигналов от трещин на фоне шумов.

На основе общих представлений об особенностях регистрации различных физических событий применяемой системы АЭ контроля был проведен анализ качества разделения данных в критериальных пространствах, образованных различными наборами АЭ параметров и разработана методика. Она базируется на фильтрации данных в четырехмерном пространстве импульсных характеристик сигналов АЭ:

1. Средняя частота сигнала
2. Величина, характеризующая крутизну нарастания переднего фронта сигнала, вычисляемая как отношение времени нарастания сигнала к амплитуде сигнала.
3. Амплитуда.
4. Отношение времени нарастания сигнала к длительности сигнала

Данная методика выделения сигналов АЭ, генерируемых трещинами отрыва и трещинами сдвига на фоне помех позволила вести наблюдение за процессом трещинообразования в материале объекта контроля с определением времени и места образования трещин. Результаты локализации подтверждены после вскрытия внутренней области конструкции после завершения испытаний.

В исследовании продемонстрирована возможность онлайн регистрации образования и развития трещин в бетоне макета под действием тепловых нагрузок. Предложенная технология фильтрации сигналов АЭ позволила выделить сигналы от образования и роста трещин отрыва и трещин сдвига на фоне помех различной природы. Определенное по результатам 3-х мерной локализации местоположение трещин в объеме бетонного массива сопоставлено с расположением конструктивных элементов макета и факти-

ческим положением трещин, выявленном при вскрытии конструкции после завершения тепловых испытаний.

Проведенные исследования указывают на принципиальную возможность успешного использования метода АЭ в качестве одного из инструментов обеспечения безопасной эксплуатации железобетонных объектов, подвергаемых температурному воздействию. Для практического применения АЭ контроля необходимо проведение НИОКР по определению критериальных значений параметров повреждаемости бетона и требований к диагностической аппаратуре с последующей разработкой программного обеспечения, реализующего использование полученных результатов для практического применения.

### Список литературы

1. А.Карпинтери, Дж.Лачидонья, Н.Пуньо – Многомасштабные временные эффекты: мониторинг конструкций с трещинами с использованием метода акустической эмиссии – Физическая мезомеханика, 5 (2005), стр. 85-89
2. L.Calabrese, G.Campanella, E.Proverbio – Use of Cluster Analysis of Acoustic Emission Signals in Evaluating Damage Severity in Concrete Structures – J. Acoustic Emission, 28 (2010), pp. 129-141
3. L.Golaski, P.Gebiski, K.Ono – Diagnostics of Reinforced Concrete Structures by Acoustic Emission - 25th European Conference on Acoustic Emission Testing, Prague, Czech Republic, 2002, pp. I/207-I/215

## ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ

Виноградов А.Ю.<sup>1,2)</sup>, Ясников И.С.<sup>2)</sup>, Мерсон Д.Л.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Университет естественных и технических наук, Тронхейм, Норвегия.

<sup>2)</sup> Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия;  
[yasnikov@phystech.edu](mailto:yasnikov@phystech.edu)

Феноменологическое моделирование акустической эмиссии при пластической деформации металлов базируется на следующих базовых уравнениях:

(1) соотношение Тейлора, задающее взаимосвязь между полной плотностью дислокаций  $\rho$  и механическим напряжением  $\sigma$  в виде:

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha GbM \sqrt{\rho} \quad (1)$$

где  $\alpha$  – численный множитель порядка 0,3...0,5,  $G$  – модуль сдвига,  $b$  – вектор Бюргера,  $M$  – ориентационный фактор;

(2) кинетические уравнения, которые определяют значение дислокационной плотности подвижных (*mobile*) и неподвижных (*forest*) в зависимости от деформации сдвига:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho_m b \langle V \rangle} \frac{d\rho_m}{dt} &= \frac{d\rho_m}{d\varepsilon} = \frac{C_1 \rho_m}{b^2 \rho_f} - C_2 \rho_m - \frac{C_3}{b} \sqrt{\rho_f} \\ \frac{1}{\rho_m b \langle V \rangle} \frac{d\rho_f}{dt} &= \frac{d\rho_f}{d\varepsilon} = C_2 \rho_m + \frac{C_3}{b} \sqrt{\rho_f} - C_4 \rho_f \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\langle V \rangle$  – средняя скорость движения дислокаций, слагаемое с множителем  $C_1$  описывает взаимодействие мобильных дислокаций с дислокациями леса,  $C_2$  – аннигиляцию

дислокаций и уход на свободную поверхность,  $C_3$  – захват мобильных дислокаций дислокациями леса и  $C_4$  – исчезновение дислокаций леса за счет поперечного скольжения.

(3) принципиально важная функциональная зависимость мощности акустической эмиссии при монотонной скорости упрочнения:

$$P_{AE} \propto \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \theta \dot{\varepsilon} \quad (3)$$

где  $\theta = d\sigma/d\varepsilon$  – коэффициент упрочнения, которая была ранее установлена для широкого диапазона ГЦК-металлов и сплавов, в том числе и для монокристаллов меди различных кристаллографических ориентаций [1].

(4) соотношение для коэффициента упрочнения [2] в виде суммы двух слагаемых, первое из которых описывает упрочнения за счет дислокаций леса, а второе – разупрочнение за счет мобильных дислокаций:

$$\theta(t) = \theta^+(t) + \theta^-(t) = \alpha G b \frac{1}{2\sqrt{\rho_f}} \frac{d\rho_f}{d\varepsilon} - S \frac{d(\ln \rho_m)}{d\varepsilon} \quad (4)$$

где  $S = d\sigma/d(\ln \dot{\varepsilon})$  – скоростная чувствительность металла к деформированию. Совместное преобразование этих уравнений приводит нас к дифференциальному уравнению, описывающему зависимость мощности акустической эмиссии в виде:

$$\frac{\dot{P}(t)}{P(t)} = \frac{\dot{\theta}(t)}{\theta(t)} = \frac{\dot{\theta}^+(t) + \dot{\theta}^-(t)}{\theta^+(t) + \theta^-(t)} \quad (5)$$

где числитель задается соотношениями:

$$\begin{aligned} \dot{\theta}^+(t) &= \frac{1}{2} \alpha G b \left[ C_2 \frac{\dot{\rho}_m}{\sqrt{\rho_f}} + \frac{\dot{\rho}_f}{2\sqrt{\rho_f}} \left( \frac{C_3}{b\sqrt{\rho_f}} - 2C_4 - \frac{1}{\rho_f} \right) \right] \\ \dot{\theta}^-(t) &= -\frac{S}{\rho_m} \left[ \frac{C_1}{b^2} \frac{1}{\rho_m} \left( \dot{\rho}_f - \frac{\rho_f \dot{\rho}_m}{\rho_m} \right) - C_2 \dot{\rho}_m - \frac{C_3}{b} \frac{1}{2} \frac{\dot{\rho}_f}{\sqrt{\rho_f}} - \frac{\dot{\rho}_m}{\rho_m} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Соотношение (5) позволяет численно получить зависимость мощности акустической эмиссии от времени в процессе одноосного нагружения металлического материала. Наблюдаемые корреляции между экспериментальными данными и данными, полученными в результате феноменологического моделирования позволяют утверждать о правомерности применяемого подхода на основе феноменологического анализа динамики дислокационного ансамбля.

## Список литературы

1. A. Vinogradov, M. Nadtochiy, S. Hashimoto, S. Miura Acoustic-Emission Spectrum and Its Orientation Dependence in Copper Single-Crystals // Materials Transactions JIM. – 1995. – vol. 36, iss. 4. – P. 496 – 503.
2. Y. Estrin, L.P. Kubin Local strain hardening and nonuniformity of plastic deformation // Acta. Metallurgica. - 1986. - vol.34, no. 12. - P. 2455–2464.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ПОТОКА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ СКАЧКОВ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

Линдеров М.Л.<sup>1</sup>, Мерсон Д.Л.<sup>1</sup>, Виноградов А.Ю.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Лаборатория физики прочности и интеллектуальные диагностические системы  
Тольяттинский Государственный Университет,  
Тольятти, Россия

<sup>2</sup>Department of Engineering Design and Materials,  
Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway  
[dartvi@gmail.com](mailto:dartvi@gmail.com)

## Введение

Акустическая эмиссия (АЭ) является одним из ведущих методов неразрушающего контроля, способных идентифицировать процессы, протекающие в материале в реальном времени. К таким наиболее важным процессам относятся скачки усталостной трещины, которые достаточно часто сложно выделить на фоне шума. Однако прогресс в обработке сигналов, благодаря которому были разработаны новые алгоритмы кластерного анализа [1, 2], способные разделять данные АЭ на группы по функции кривой спектральной плотности (PSD), позволяет увеличить точность в определении скачков усталостной трещины на фоне шумоподобных сигналов, так как указанные процессы имеют значимые отличия в PSD функциях.

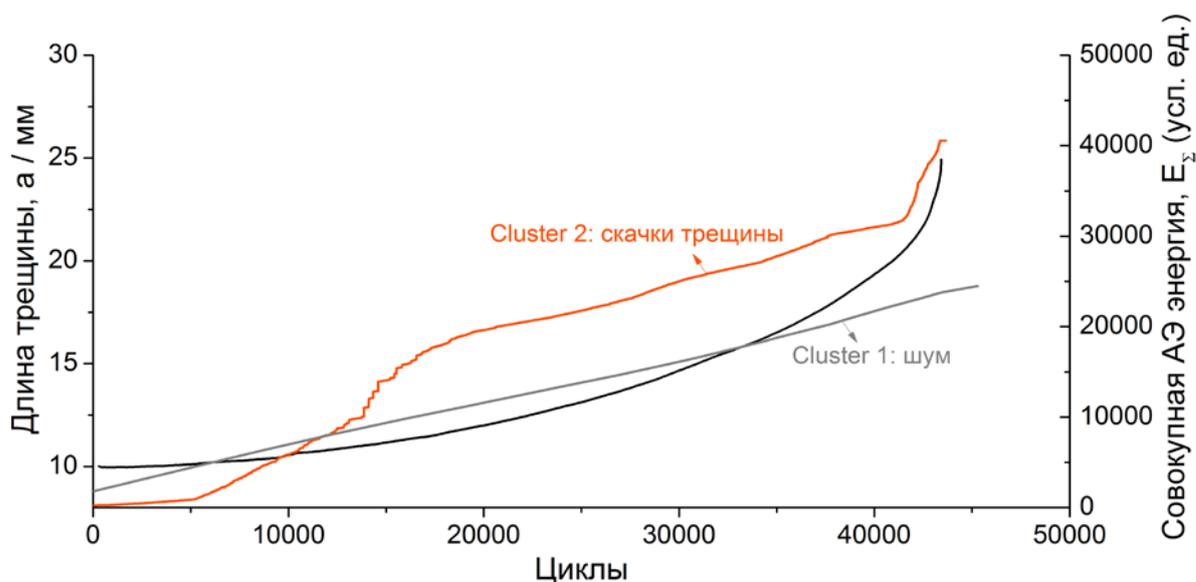
В представленной работе процедура кластерного анализа используется для идентификации скачков усталостной трещины в процессе циклического внецентренного растяжения образца с острым надрезом.

## Материалы и методы исследования

Для испытания на рост усталостной трещины из сплава АМг6 изготавливались компактные образцы в соответствии с рекомендациями ГОСТ 25.506 и ASTM E647. Эксперимент проводился на серво-гидравлической машине Instron 8802 с синусоидальным циклом нагружения, амплитуда которого составляла 1750Н при частоте 10 Гц и коэффициенте асимметрии цикла 0,1. Длину трещины измеряли с использованием навесного датчика раскрытия трещины СТOD по податливости. Датчик АЭ MSAE-WB-12V механически закреплялся на образце. Запись проводилась периодически без порога длительностью по 10 сек. через каждые 300 сек. с частотой 2МГц платой PCI2 фирмы PASC. Исходный сигнал усиливался на 60дБ с использованием предусилителя MSAE-FA010 и пропускался через фильтр в полосе частот 50-1000кГц. Для распознавания различных процессов, использовалась методика адаптивного последовательного кластерного анализа k-средних, математические аспекты которой подробно описаны в работе [3], а примеры использования для магниевых сплавов и метастабильных сталей в работах [4, 5] соответственно.

## Результаты

Данные, полученные с использованием кластерного анализа потока сигналов акустической эмиссии в значениях совокупной АЭ энергии, синхронизированные с длиной выращенной трещины, показаны на рис. 1.



**Рис. 1.** Изменение совокупной АЭ энергии кластеров, синхронизованное с длиной выращенной трещины

Алгоритм кластерного анализа выделили два ведущих процесса, первый из которых начинается незамедлительно с началом записи, растет равномерно за время проведения эксперимента и обладает компактным низкочастотным кластером, что позволяет отнести его к шуму испытательной машины. Второй имеет в функции спектральной плотности высокочастотную компоненту и становится наиболее активным в момент достижения максимальной нагрузки в цикле, таким образом данный кластер можно соотносить со скачками усталостной трещины.

### Заключение

Использование процедуры кластерного анализа записанных без порога АЭ данных позволяет распределить сигналы по группам и сопоставить их отдельным процессам, в данном случае: шум испытательной установки и скачки усталостной трещины.

### Список литературы

1. Pomponi E., Vinogradov A., Danyuk A. Wavelet based approach to signal activity detection and phase picking: Application to acoustic emission. *Signal Processing*. 2015. Vol. 115. P. 110-119
2. Agletdinov E., Merson D., Vinogradov A., Pomponi E. A novel bayesian approach to acoustic emission data analysis // *Ultrasonics*. 2016. Vol. 72. P. 89-94.
3. Pomponi E, Vinogradov A. A real-time approach to acoustic emission clustering // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. №2. P. 791-804
4. Vinogradov A., Orlov D., Danyuk A., Estrin Y. Effect of grain size on the mechanisms of plastic deformation in wrought Mg–Zn–Zr alloy revealed by acoustic emission measurements // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. № 6. P. 2044–2056.
5. Vinogradov A, Lazarev A, Linderov M, Weidner A, Biermann H. Kinetics of deformation processes in high-alloyed cast transformation-induced plasticity/twinning-induced plasticity steels determined by acoustic emission and scanning electron microscopy: Influence of austenite stability on deformation mechanisms // *Acta Materialia*. 2013. V. 61. №7. P. 2434-2449.

## АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МАГНИЕВОГО СПЛАВА ZK30

Васильев Е. В., Виноградов А. Ю., Мерсон Д. Л., Брилевский А. И.

*Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия*  
[avellko@yandex.ru](mailto:avellko@yandex.ru)

Акустическая эмиссия (АЭ) является одним из эффективных методов изучения процессов дислокационного скольжения и двойникования в магниевых сплавах. Несмотря на значительное количество экспериментальных работ, фундаментальное понимание механизмов деформации и разрушения в магниевых сплавах по-прежнему далеко от совершенства.

В данной работе были проведены экспериментальные исследования по циклическому нагружению сплава ZK30 (Mg–2.8Zn–0.6Zr) при полной амплитуде деформации 2% с регистрацией видеоданных и сигналов акустической эмиссии. Полученные данные АЭ были обработаны алгоритмом кластерного анализа ASK и сопоставлены с результатами оптических наблюдений и кривыми нагружения.

По полученным результатам можно заключить следующее. По данным АЭ, уже на первом цикле нагружения наблюдается значительная асимметрия в работе механизмов деформации: если при растяжении преобладает дислокационное скольжение, то на этапе сжатия доминирует двойникование. На десятом цикле нагружения характер АЭ на стадии растяжения меняется с дислокационного скольжения на процесс, ассоциирующийся с двойникованием, причем согласно визуальным наблюдениям им является процесс детвиннинга (раздвойниковывания), плохо отличимый от прямого двойникования в сигналах АЭ.

Следует отметить, что данные прямых видеонаблюдений находятся в хорошем согласии с результатами анализа АЭ, но при этом акустическая эмиссия несет гораздо более детальную информацию о протекающих процессах. В то время, когда визуально наблюдается преимущественное двойникование, акустическая эмиссия наряду с двойникованием различает наличие и активного дислокационного скольжения, что свидетельствует: (а) о дислокационной природе двойникования; (б) о наличии скольжения как по базисным, так и небазисным плоскостям, которое визуально не различается из-за ограниченного разрешения оптической системы. С другой стороны, у методики кластеризации сигналов АЭ есть и недостаток: сигналы, связанные с двойникованием и раздвойниковыванием, как уже говорилось выше, имеют сходные характеристики и поэтому могут быть отнесены алгоритмом к одному и тому же кластеру.

Полученные результаты несут важную информацию для понимания механизмов деформации в магниевых сплавах. Асимметрия деформационного поведения является прямым следствием активации различных процессов при сжатии и растяжении, а также частично объясняет природу усталости магниевых сплавов: при циклическом нагружении с постоянной амплитудой деформации основное накопление дефектов происходит именно на стадии сжатия, в то время как при растяжении наблюдается их упругая релаксация (детвиннинг). Кроме того, данные эффекты приводят к тому, что в петле гистерезиса формируются положительные средние напряжения (напряжения растяжения), которые оказывают негативное влияние на результирующие усталостные свойства.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, госзадание № 3.3881.2017/ПЧ.*

## О ПЕРСПЕКТИВАХ ВНЕДРЕНИЯ «МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ DN 50-1400 ДО 25,0 МПА С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ»

**Морозов В.А., Барат В.А., Сорокин А.В.**

*АО «Газпром энергетика», «Интерюнис-ИТ»,  
Москва, РФ*

Проверка герметичности крана в затворе и по отношению к внешней среде является основной задачей при проверке функционирования арматуры в рамках экспертного технического диагностирования с целью продления срока безопасной эксплуатации, а также при проведении технического обслуживания.

Согласно «Методики оценки ресурса запорно-регулирующей арматуры магистральных газопроводов» СТО 2-4.1-406 определяются мероприятия по ремонту арматуры и возможность продления срока безопасной эксплуатации в зависимости от оценки количественного показателя утечки. Следовательно, необходимо знать не только факт наличия утечки, а именно расход утечки.

Универсальная методика измерения утечек газа запорной арматуры акустическим методом с оценкой ее количественного показателя была разработана сотрудниками ООО «Интерюнис» совместно с АО «Газпром энергетика», после проведения экспериментальных работ по оценке величины протечек ЗРА на ряде объектов ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург».

Объектом исследования были шаровые краны с проходными диаметрами DN 50-1400 подземной и надземной установки. В процессе экспериментов проводилась проверка герметичности арматуры манометрическим, анемометрическим и акустическим методом.

Целью проводимых экспериментальных работ было получение эмпирических зависимостей, связывающих расход утечки с характеристиками акустических сигналов для каждого типоразмера ЗРА, эксплуатируемого на КС и ЛЧ МГ. При этом, полученные акустические сигналы сопоставлялись с результатами измерений расхода утечки по скорости истечения газа из дренажа запорной арматуры или свечи и по росту давления газа на участке трубопровода за арматурой.

Работы были проведены в соответствии с Программой научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на 2015 год, утвержденной Председателем Правления ПАО «Газпром» А.Б. Миллером от 17 июня 2015 г. №332. По результатам НИОКР был разработан стандарт СТО Газпром трансгаз Санкт-Петербург 17-01-03-2016. На данный момент методика проходит этап внедрения.

Преимущества от внедрения Методики:

- Идентификация дефектной арматуры. В некоторых случаях, эксплуатация гадает, какой из дублирующих кранов с утечкой. Метод помогает точно идентифицировать его.
  - Определение приоритета замены дефектных ЗРА при формировании плана ремонта.
  - Экономия природного газа при своевременной замене дефектных ЗРА.
  - Продление сроков эксплуатации ЗРА с незначительными утечками через затвор.
  - Контроль эффективности набивки ЗРА при техническом обслуживании.
1. Сивов И.Е., Сорокин А.В., Сухолишко А.А., Барат В.А., Морозов В.А. Оценка степени герметичности шаровых кранов DN800, установленных на компрессорной станции «Портовая»./ В мире неразрушающего контроля. 2015.- № 3 с.82-85

## КИНЕТИКА НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Башков О.В.<sup>1, a)</sup>, Шаркеев Ю.П.<sup>2, b)</sup>, Попкова А.А.<sup>1, c)</sup>

<sup>1</sup>Комсомольский-на-Амуре государственный университет (КНАГУ)

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
(ИФПМ СО РАН)

<sup>a)</sup>[bashkov\\_ov@mail.ru](mailto:bashkov_ov@mail.ru),

<sup>b)</sup>[sharkeev@ispms.tsc.ru](mailto:sharkeev@ispms.tsc.ru),

<sup>c)</sup>[popkovaaa@mail.ru](mailto:popkovaaa@mail.ru)

В работе приведены результаты исследований кинетики накопления усталостных повреждений в образцах титанового сплава ОТ4 и титана ВТ1-0 в различном структурном состоянии с использованием метода акустической эмиссии (АЭ).

Целью исследований состояла в установлении влияния структурной организации и состава на стадийность накопления усталостных повреждений в титане и его сплавах. Образцы титанового сплава ОТ4 исследовались в состоянии поставки и были изготовлены из листового материала. Структура образцов чистого титана ВТ1-0 была изготовлена путем всестороннего прессования с размером зерен 200–300 нм (субмикроструктурная структура) и последующим отжигом до получения ультрамелкозернистой структуры с зерном 1–2 мкм и крупнокристаллической структуры с зерном 20–30 мкм.

На основании ранее апробированной методики для анализа накопления повреждений при усталости в качестве информативных параметров были использованы энергия АЭ и частотный коэффициент  $K_f$ . С использованием данной методики сигналы АЭ были разделены по источникам их излучения – дислокациям, микро- и макротрещинам. По активности различного типа источников акустической эмиссии выделены стадии усталости в условиях плоского консольного изгиба для образцов титанового сплава ОТ4. В результате исследования структуры образцов были обнаружены текстурные полосы, плотность которых повышалась с увеличением степени усталости.

Образцы титанового сплава ОТ4 испытывались по схеме знакопеременного изгиба на установке с механическим нагружением. Испытания образцов чистого титана ВТ1-0 проводилось на установке с электромагнитным нагружением. Субмикроструктурная (СМК) структура в образцах титана ВТ1-0 с размером зерен 200–300 нм была получена на установке равноканального углового прессования (РКУП) с последующей прокаткой. Ультрамелкозернистая (УМЗ) структура с величиной зерна 1–2 мкм и крупнокристаллическая (КК) 20–30 мкм были получены путем последовательного отжига. Результаты исследований образцов титана ВТ1-0 показали образование двойников на стадиях циклической текучести и циклического упрочнения.

Данные анализа акустической эмиссии экспериментально подтверждены результатами микроструктурных исследований.

Было отмечено, что измельчение зерен и увеличение развитости их границ вследствие интенсивной пластической деформации при РКУП приводит к снижению подвижности дефектов и увеличению долговечности. Накопление усталостных повреждений всегда начинается с движения дислокаций, что подтверждается регистрацией сигналов АЭ ими излучаемых. Уменьшение размеров зерен приводит к уменьшению энергии излучаемых сигналов АЭ и более поздней регистрации источников АЭ типа дислокаций и двойников. По характеру накопления суммарной АЭ различных типов источников сигналов АЭ (дислокации, двойники, микротрещины) установлен стадийный характер накопления усталостных повреждений титана марки ВТ1-0 в различном структурном состоянии.

## Список литературы

1. Брагинский А.П., Медведев Б.М., Платков А.И. Амплитудно-частотная методика локации источников акустической эмиссии// Дефектоскопия. – 1988. - № 8. – С. 58–65.1.
2. Иванова В.С. Природа усталости металлов/ В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. 456 с.
3. Лысак Н.В., Скальский В.Р., Сергиенко О.Н. О методологии АЭ-диагностирования трещинообразования// Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1991. – № 3. – С. 9–14.

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА

**Самохвалов А.Б.**

*ООО «ДИАПАК», Москва, Российская Федерация,  
[asamokhvalov@diapac.ru](mailto:asamokhvalov@diapac.ru)*

Акустико-эмиссионный мониторинг (АЭМ) характеризуется большим объёмом информации, нуждающейся в постоянном анализе и автоматизированной обработке.

Информация в системе АЭМ может быть разделена на первичную (непосредственно регистрируемую системой сбора данных) и вторичную (переработанную), получаемую путём обработки первой с применением определённых алгоритмов. К вторичной информации относятся результаты локации источников акустической эмиссии (АЭ), спектральный анализ, кластеризация и др. Применяемые алгоритмы оказывают существенное влияние на состав и качество вторичной информации.

Можно выделить центры данных двух типов: (1) каналы акустической системы; (2) места (положения на локационной карте).

В связи с длительностью процесса мониторинга целесообразно строить геометрические модели объектов с фиксированным количеством узлов («сеточные» модели); узлы модели выступают в качестве центров накопления информации.

Наибольший интерес при проведении мониторинга представляют исторические графики (временные ряды, тренды). Количество временных рядов очень велико (очень большое количество центров данных (каналов, локационных мест), умноженное на количество анализируемых параметров).

Таким образом, при осуществлении АЭМ имеется необходимость просмотра и анализа очень большого количества временных рядов данных, отсюда остро встаёт проблема визуализации данных, для решения которой требуется применять те или иные методы группировки (кластеризации).

Проведённые исследования позволили выявить эффективные способы построения геометрических моделей объектов, алгоритмы локации источников АЭ, кластеризации и визуализации временных рядов данных для целей акустико-эмиссионного мониторинга.

# ЭФФЕКТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СКАЧКООБРАЗНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И СВЯЗАННАЯ С НЕЙ АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ

**Сарафанов Г.Ф.**

*Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия*  
[gf.sarafanov@yandex.ru](mailto:gf.sarafanov@yandex.ru)

В настоящей работе рассматривается динамическая модель, позволяющая математически предсказать генерацию квазипериодических импульсов упругого поля и неустойчивый характер пластической деформации. В основе модели лежит предположение, что динамическое торможение дислокаций лимитируется трением, обусловленным дисперсией дисперсией упругих модулей. Зависимость силы торможения от скорости дислокации имеет вид [1]

$$F(v) = A_0 \frac{b^2 \rho_m c_t^3}{\tau_p v} \ln(1 + k_0^2 \tau_p^2 v^2),$$

В области низких температур возможна нелинейная зависимость силы торможения от скорости [1]. Это обстоятельство и учитывается в данной модели.

Рассмотрим поведение ансамбля дислокаций в полосе скольжения ширины  $L$ . Выберем ось  $Ox$  в направлении заданной системы скольжения дислокаций. Пусть в полосе скольжения распределение дислокаций можно характеризовать их плотностями  $\rho_+(x, t)$  и  $\rho_-(x, t)$ , причем в равновесии  $\rho_+^0 = \rho_-^0 = \rho_0/2$ . Обозначим через  $v(x, t)$  среднюю скорость дислокаций одного знака (например, положительных). Будем полагать, что отклонение плотности дислокаций от стационарного значения незначительно, тогда процесс пластической деформации в полосе сдвига в режиме активного нагружения можно описать следующей системой уравнений [2]

$$m^* \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) = b(\tau + \tau^{int}) - F(v), \tag{1}$$

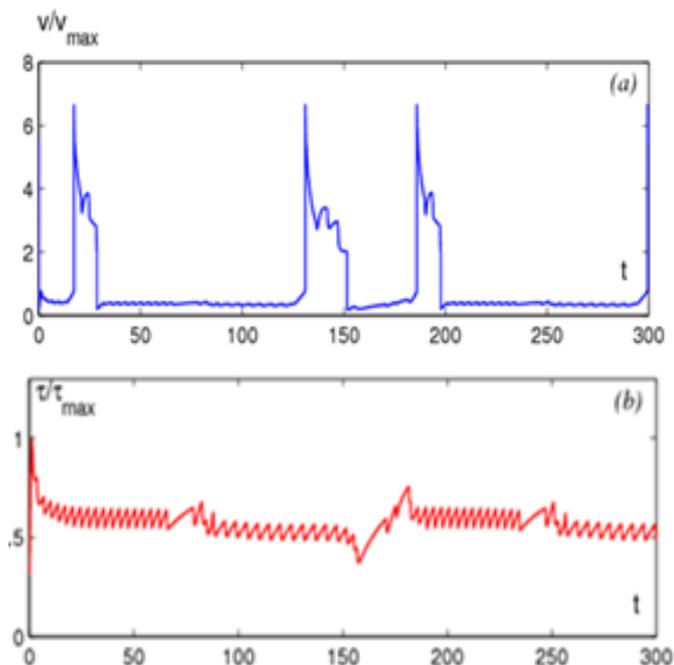
$$\frac{\partial \tau^{int}}{\partial t} = -\frac{\tau^{int}}{t_a} + \gamma_1 \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2}, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = b \rho_0 v, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = G^* \left[ \dot{\varepsilon}_0 - \frac{b \rho_0}{L_p} \int_0^{L_p} v(x, t) dx \right] \tag{3}$$

Уравнение (1) есть уравнение движения, где  $m^*$  — эффективная масса дислокации,  $\tau$  — сдвиговое напряжение в действующей системе скольжения. Уравнение (2) учитывает упругую корреляцию зерен ( $\tau^{int} = \gamma_1 \partial_{xx}^2 \varepsilon$ ) и возможные процессы аккомодации [3]. Параметр  $\gamma_1 \approx \alpha_g G D^2$  служит мерой упругой корреляции зерен ( $\alpha_g \approx 1$ ,  $D$  — размер зерна). Уравнение (3) есть уравнение Гилмана-Джонстона для режима активного нагружения [4]. Здесь  $\dot{\varepsilon}_0$  — заданная скорость пластической деформации в полосе скольжения,  $G^*$  - эффективный модуль упругости, связанный с жесткостью системы "машина-образец",  $L_p$  - длина зоны пластической деформации.

Анализ системы (1)-(3) показывает, что однородное стационарное решение  $v_0 = \dot{\varepsilon} / b \rho_0$ ,  $b \tau_0 = F(v_0)$  теряет свою устойчивость и на отрицательной ветви  $F(v_0)$ .

Численное исследование системы (1)-(3) для этого случая проводилось после приведения ее к безразмерному виду.



**Рис.1.** Изменение скорости дислокаций  $v(t, x)$  и нагрузки  $\tau(t)$  в зависимости от времени

Анализ показывает, что динамика системы контролируется следующими безразмерными параметрами

$$\eta = \frac{G^* b \rho_0 v_t t_0}{\tau_{max}}, \quad K = \frac{\gamma_1 b \rho_0 t_0 v_t}{L_p^2 \tau_{max}}, \quad \gamma_a = t_0 / t_a, \quad (4)$$

где  $t_0 = v_t m^* / b \tau_{max}$ . Параметры  $K$  и  $\gamma_a$  характеризуют, соответственно, жесткость системы образец-машина, упругую корреляцию зерен и интенсивность пластической аккомодации. Оценки показывают, что с увеличением параметра  $K$  режим изменения нагрузки и скорости пластической деформации приобретает нерегулярный характер (Рис.1). Для внутренних напряжений  $\tau(t)$  реализуется квазипериодическая последовательность осциллирующих цугов волн, а для  $v(x, t)$  — всплески повышенной скорости пластической деформации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-02-00444).*

#### Список литературы

1. Косевич А.М. Дислокации в теории упругости. — Киев: Наук.думка, 1978.
2. Сарафанов Г.Ф. Волны разупрочнения пластической деформации в кристаллах// Физика твердого тела. — 2001, т.43. вып.2, с.254-260.
3. Лебедин М.А., Дудин-Барковский Л.Р. Критическое поведение и механизм корреляции деформационных процессов в условиях неустойчивости пластического течения// ЖЭТФ. — 1998, т.113, вып.5, с.1816-1829.
4. Yoshinaga H., Morozumi S. A Portevin-Le Chatelier effect expected from solute atmosphere dragging // Philos. Mag. 1971, vol. 23, №186, p.1351-1360.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ЛИНИЙ ПРИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМ КОНТРОЛЕ ОБОРУДОВАНИЯ ПОД ВОДОЙ

Пичков С.Н., Захаров Д.А.,

АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Россия,  
[okbm@okbm.nnov.ru](mailto:okbm@okbm.nnov.ru)

Метод АЭ предполагает размещение на поверхности контролируемого изделия пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), принимающих сигналы АЭ. Если объект контроля находится в нормальных условиях, ПЭП может быть размещен непосредственно на его поверхности. Однако во многих случаях размещение ПЭП на поверхности контролируемого изделия невозможно из-за ряда факторов. К ним относятся высокая температура, радиация, химически агрессивная среда, а также сложность (порой невозможность) замены ПЭП, изменивших свои параметры вследствие внешних воздействий. Один из путей решения данной проблемы – размещение обычных преобразователей вне зоны экстремальных воздействий и обеспечение передачи сигналов АЭ посредством волноводов. Наиболее целесообразным способом передачи акустических колебаний на ПЭП в этом случае следует признать использование волноводов в виде тонких длинных стержней или пластин.

В работе приведены результаты исследования прохождения акустических волн через волноводные линии различной длины. Определено их затухание в волноводных линиях в обычных условиях и в воде.

Объектом исследований являлись волноводные линии, изготовленные из стальной проволоки (сталь 12Х18Н10Т) диаметром 3 мм длиной 10, 8, 6 и 5 м. В испытаниях использовались волноводы из неотожженной и отожженной при 1050°С проволоки. Отжиг применялся для уменьшения затухания. Одним концом волновод приваривался к стальной пластине, имитировавшей контролируемую поверхность, к другому концу волновода был приварен экспоненциальный концентратор, служащий для согласования волновода с ПЭП. В качестве имитатора АЭ сигналов использовался ПЭП, возбуждаемый от генератора прямоугольных импульсов.

Датчики располагались следующим образом: ПЭП №1 устанавливался на поверхность пластины рядом с местом приварки волновода к поверхности пластины; ПЭП №2 при помощи механического прижима крепился к широкому концу концентратора. Преобразователь-имитатор АЭ сигналов ПЭП №3 устанавливался на поверхность пластины рядом с ПЭП №1 (рисунок 1).

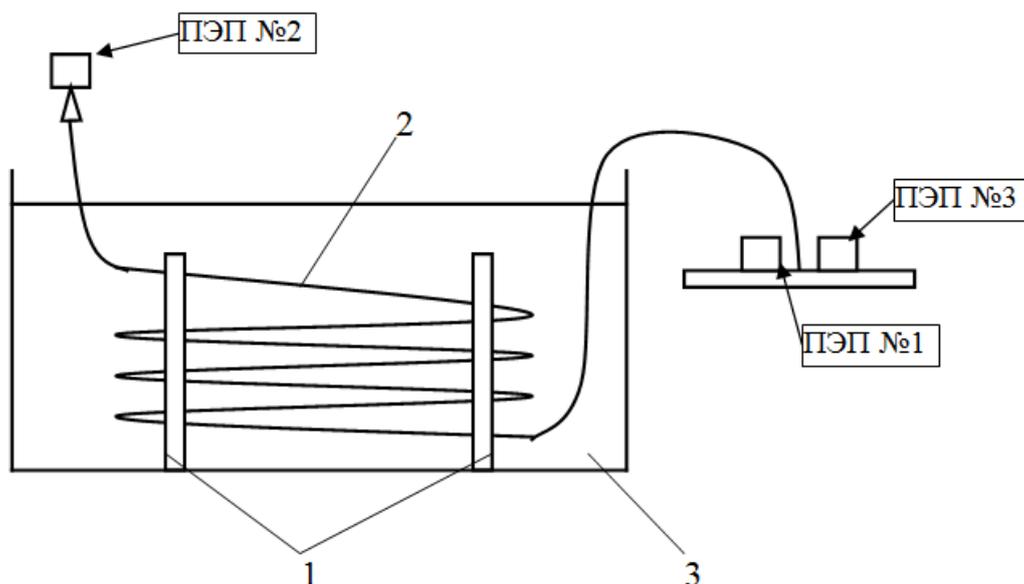
В исследованиях проводилось измерение затухания сигнала акустической эмиссии при прохождении его через волновод. Затухание определялось путем сравнения амплитуд сигналов, полученных с ПЭП №1 и №2.

Все волноводные линии испытывались как в обычных условиях (на воздухе), так и погруженные в емкость с водой. Перед погружением в воду волновод скручивался спиралью с применением текстолитовых стоек-изоляторов для исключения касания витков спирали между собой.

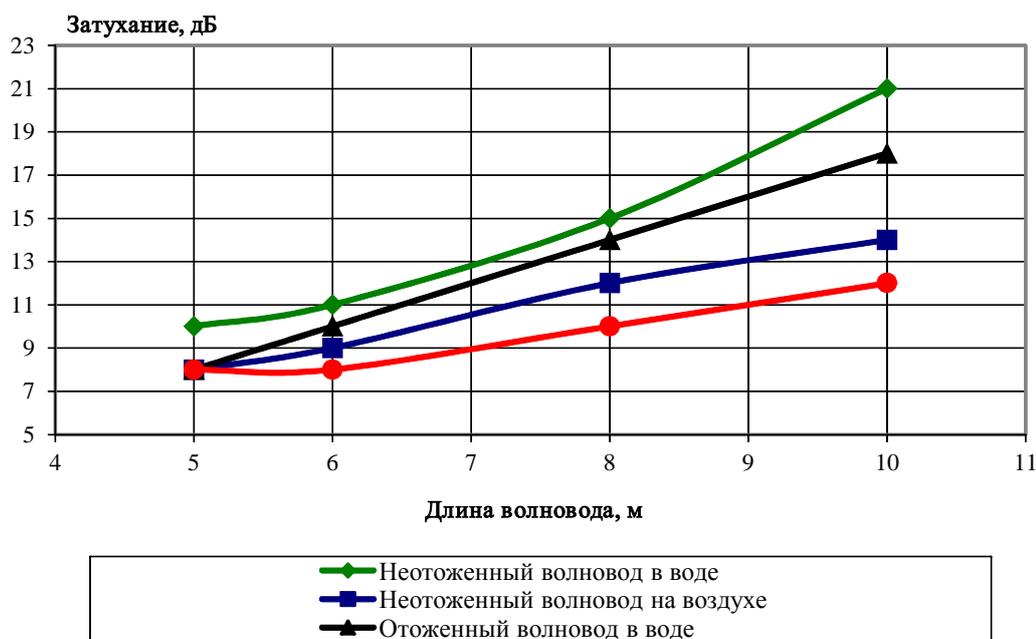
Результаты измерения затухания сигналов АЭ при прохождении через волноводные линии различной длины приведены на рисунке 2.

Как видно из графиков, затухание АЭ сигналов при нахождении волноводной линии в водной среде больше, чем на воздухе, т.к. граница раздела металл-вода более «прозрачна» для сигналов АЭ, чем граница металл-воздух.

Предварительный отжиг волноводной линии позволил несколько снизить затухание, что немаловажно при использовании волноводов большой длины.



**Рис. 1.** Испытание волноводной линии в воде.  
 1 – стойки-изоляторы; 2 – испытываемая волноводная линия;  
 3 – емкость с водой



**Рис. 2.** Затухание сигналов АЭ при прохождении через волноводные линии различной длины

Испытания волноводов и анализ результатов показали, что регистрация АЭ сигналов с помощью волноводной линии длиной 5–6 м принципиально не отличается от регистрации непосредственно с поверхности контролируемого объекта и не оказывает значительного влияния на процесс локализации источников АЭ и оценки их степени опасности.

Для исключения влияния акустических помех на волноводы, находящиеся в воде, необходимо использование чехловой трубы.

## ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ АЭ

Андреев А.Г., Андреева Л.П.

*НУЦ «Контроль и диагностика»,  
Московский политехнический университет  
Москва, Россия  
[wismut@mail.ru](mailto:wismut@mail.ru)*

Развитие метода акустической эмиссии (АЭ) определяется несколькими факторами: уровнем АЭ систем, программным обеспечением для сбора и последующей обработки АЭ данных, нормативным обеспечением АЭ метода, квалификацией специалиста выполняющий АЭ контроль. Объединяющие эти факторы является специалист АЭ контроля. Специалистов АЭ можно разделить на две категории:

1. Специалисты исследователи, которые проводят с использованием метода АЭ научные исследования, различных материалов, процессов и оборудование. Результат их деятельности, научные исследования, отчеты, новые критерии обработки и анализа АЭ данных и специализированное программное обеспечение.

2. Специалисты практики, выполняющие АЭ контроль в соответствии с нормативными документами, как правило это специалисты II, III уровня квалификации аттестованные в соответствии с ПБ 03-440-02, ISO 9712. Эти специалисты, должны применять на практике инновации разработанные специалистами исследователями, но с этим есть проблемы.

Между этими группами специалистов нет постоянного взаимодействия. Специалисты практики используют при проведении АЭ диагностики, стандартные АЭ системы, со стандартным программным обеспечением в сборе и обработке АЭ информации. Совместная работа происходит специалистов исследователей и практиками в единичных случаях при диагностике сложных, уникальных объектах.

Хорошая практика сложилась при разработке систем комплексного мониторинга уникальных, сложных объектов и установок, где используется совместная работа специалистов АЭ, но такой опыт и наработки сложно тиражировать для массового применения. Существуют АЭ технологии для определенного типа конструкций, разработанные различными фирмами иностранными и отечественными, в которых строго описывается последовательность действий (настройка, калибровка, сбор АЭ данных, нагрузка объекта контроля и критерии оценки объекта):

### Компания PAC (Physical Acoustics Corporation)

- технология контроля днищ резервуаров — TANKPAC;
- технология контроля сосудов давления и резервуаров — MONPAC;
- технология определения утечек через запорную арматуру — VPAC;
- технология контроля протяжённых объектов (трубопроводов) — PIPEPAC;
- технология контроля коррозионных повреждений — CORPAC;
- технология контроля силовых трансформаторов — POWERPAC;
- технология и система для контроля авиационных огнетушителей Halon Bottle.

Компания «Интерюнис-ИТ» и Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), каждая организация разработала свою АЭ технологию контроля литых деталей тележек грузовых вагонов.

Производители АЭ систем разрабатывают программное обеспечение, которое помогает обрабатывать АЭ данные:

- A-Line Stat, A-Line OSC - «Интерюнис-ИТ»;
- Корал, Буря, Днище PBC, Стенка PBC- НПФ «Диатон»;
- AEwin, Line-Focus, Noesis - PAC (Physical Acoustics Corporation)
- VisualAE, VisualTR, VisualClass – Vallen System

Программное обеспечение и методы обработки АЭ данных, требует от специалиста практика специальной подготовки и обучения. Современная система подготовки аттестации и сертификации персонала АЭ в независимых органах по оценки персонала НОАП, не предусматривает подготовку и оценку знаний и умений применения специализированного программного обеспечения. Специалисты в НОАП проходят сертификацию на II уровень, который позволяет проводить АЭ контроль, различных объектов с выдачей заключения. Анализ АЭ данных является процессом субъективным и зависит от опыта и знаний конкретного специалиста. В диагностических компаниях происходит деление специалистов практиков, на тех, кто проводит сбор АЭ данных на объекте контроля и на специалистов которые производят анализ АЭ данных.

Сложность применения АЭ метода привела к падению интереса к методу со стороны Заказчиков, это по нашему мнению обусловлено отставание в подготовке АЭ специалистов практиков в использовании новых разработок. Отсутствуют курсы обучения АЭ специалистов практиков новым технологиям АЭ контроля, в лучшем случае они могут прочитать статьи в научных журналах, скачать с сайта разработчика программное обеспечение и методом «проб и ошибок» освоить данный продукт, так как они его понимают. Заказчик АЭ диагностики не разбирается в тонкостях АЭ метода, его интересует низкая цена на услуги АЭ контроля, наличие минимум II уровня у специалистов проводящих АЭ контроль, работающее его оборудование, «правильно» составленные отчеты и заключения по АЭ контролю.

Решение проблемы передачи знаний от специалистов исследователей к специалистам практикам, позволит по нашему мнению повысить спрос на АЭ контроль и продолжит развитие АЭ метода. Предлагается разрабатывать специализированные учебные курсы по АЭ технологиям и программному обеспечению, совместно с разработчиками АЭ систем, специалистами исследователями и учебными организациями (органы по сертификации персонала). Почему необходимо привлекать учебные организации, органы по сертификации (ОСП)? ОСП имеют практический опыт оценки персонала АЭ на I, II, III уровни и могут независимо оценить квалификацию специалиста АЭ. На этих курсах специалисты практики научатся использовать новые АЭ технологии и документ, подтверждающий эти знания, специалисты исследователи передадут знания и получат обратную связь о применении этой технологии, а ОСП обеспечит независимость оценки знаний специалистов с выдачей документа. Функции ОСП в этом процессе: составление программы обучения, составление базы теоретических вопросов и заданий к практическому экзамену. Процедура в ОСП: оценка документов кандидата, проведение входного тестирования, для оценки общего уровня АЭ специалиста, проведение занятий в соответствии с программой обучения, проведение теоретического и практического экзамена, оценка экзаменационных результатов, выдача соответствующего документа, при успешной сдаче экзаменов.

Повышение уровня знания, передача новых технологий, обмен информацией между АЭ специалистами различных групп, позволит применять все преимущества АЭ метода и развивать сферы применения.

# АКУСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ И ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Тютин М.Р.<sup>1</sup>, Петерсен Т.Б.<sup>2</sup>, Ботвина Л.Р.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>ООО "ДИАПАК", г. Москва, Россия, [tyutin@imet.ac.ru](mailto:tyutin@imet.ac.ru)

Для изучения влияния предварительного циклического нагружения на параметры акустической эмиссии (АЭ) были проведены циклические испытания образцов из сталей 20, 45 и 12Х18Н9Т при пяти уровнях нагрузки и трех относительных долговечностях  $N/N_f = 0.3, 0.5, 0.7$ . Далее были проведены испытания на растяжение этих образцов с оценкой механических свойств и характеристик акустической эмиссии (АЭ), включая интенсивность ( $\dot{N}_{AE}$ ),  $b_{AE}$ -параметр, период затишья ( $T_{AE}$ ), которое, подобно сейсмическому затишью, наблюдалось перед разрушением металлического образца [1]. Период затишья ( $T_{AЭ}$ ) оценивали с помощью скользящего временного окна, длину которого устанавливали равной максимальному значению интервала времени между приходом соседних по времени событий АЭ.

Анализ результатов эксперимента показал, что увеличение амплитуды предварительного циклического нагружения приводит к повышению прочностных свойств и снижению пластичности и работы разрушения образцов сталей 20 и 12Х18Н9Т. Для образцов из стали 45 изменение прочности и работы разрушения не выявлено.

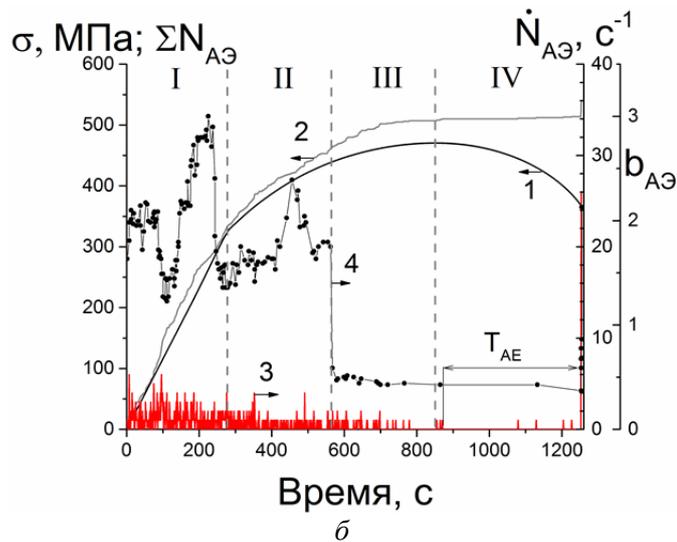
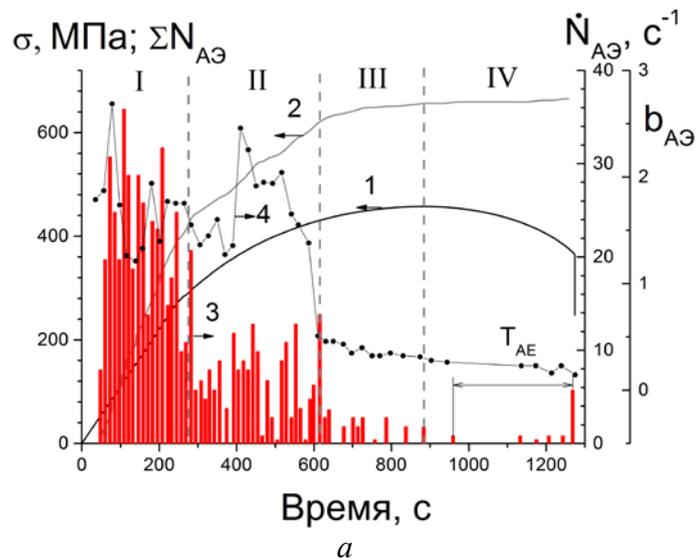
Измерения характеристик акустической эмиссии исследуемых сталей как в исходном состоянии, так и после предварительного циклического нагружения, позволили выделить четыре основные стадии их изменения в процессе растяжения, которые наиболее отчетливо выражены при испытании образцов из стали 20 (рис. 1, а):

- стадия I интенсивной акустической эмиссии и роста суммарного числа акустических сигналов на участке упругой деформации;
- стадия II резкого снижения интенсивности эмиссии и  $b_{AE}$ -параметра в области деформационного упрочнения;
- стадия III снижения интенсивности эмиссии и достижения порогового уровня суммарного числа акустических сигналов и  $b_{AE}$ -параметра в конце области деформационного упрочнения;
- стадия IV, начинающаяся при достижении максимальной нагрузки и характеризующаяся в ее начале малым количеством акустических событий, а затем – почти полным их отсутствием (область акустического затишья  $T_{AЭ}$ ), в конце которой появляются высокоамплитудные акустические сигналы, предшествующие разрушению.

Важно отметить следующие особенности изменения акустических параметров:

- резкое снижение  $b_{AЭ}$ -параметра происходит перед плато на временной зависимости суммарного числа сигналов, которое соответствует достижению предела прочности и началу стадии локализации деформации;
- начало периода акустического затишья  $T_{AЭ}$  соответствует стадии падения напряжения, связанного с локализацией деформации и сопровождаемого накоплением и слиянием несплошностей в локализованной пластической зоне. В конце этого периода, перед самым разрушением, акустическая активность возрастает.

После предварительного циклического нагружения стадии, выделенные при растяжении недеформированного образца, сохраняются, но их протяженность, а также акустические параметры изменяются (рис. 1, б). Так, при испытании стали 20 резко снижается интенсивность сигналов, хотя суммарное число сигналов мало меняется, а при испытании стали 45 интенсивность сигналов изменяется незначительно, но их общее число возрастает.



**Рис. 1.** Диаграммы деформации (1), временные зависимости накопленного числа (2), интенсивности (3) и  $b_{AЭ}$ -параметра (4) акустической эмиссии для образцов из стали 20 в исходном состоянии (а) и после циклических испытаний при  $\sigma_{max} = 330$  МПа до  $N/N_f = 0,5$  (б)

Результаты экспериментов показали, что период затишья ( $T_{AЭ}$ ) растет с увеличением относительной долговечности при одном уровне амплитуды нагружения, наименьшее  $T_{AЭ}$  наблюдается для исходного образца, не подвергнутого предварительному циклическому нагружению.

При испытании образцов из стали 12Х18Н9Т затишья АЭ не наблюдалось, что связано, по всей видимости, с образованием мартенсита деформации в ходе разрушения образцов.

Таким образом, появление ярко выраженного затишья акустической эмиссии, характерного для рассматриваемого класса материалов, может использоваться в прогностических целях наряду с  $b_{AЭ}$ -параметром и другими параметрами акустической эмиссии.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №15-19-00237).*

1. Ботвина Л.Р., Петерсен Т.Б., Тютин М.Р. Акустическое затишье как диагностический признак предразрушения // ДАН. 2018. Т. 479. № 5. С. 514–518.

## АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛИТЫХ И ПОРОШКОВЫХ СТАЛЕЙ

Чуканов А.Н.<sup>1)</sup>, Гвоздев А.Е.<sup>1)</sup>, Сергеев АН<sup>1)</sup>, Широкий И.Ф.<sup>1)</sup>,  
Яковенко А.А.<sup>3)</sup>, Леонтьев И.М.<sup>2)</sup>

1) Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого

2) Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

3) ООО «Металлург-Туламаш», г. Тула, Россия

[alexchukanov@yandex.ru](mailto:alexchukanov@yandex.ru)

Высококочувствительными параметрами эволюции повреждаемости материала являются характеристики его упругости (динамические модули упругости – ДМУ) и неупругости (внутреннее трение – ВТ и демпфирующая способность – ДС).

Цель работы – разработка аппаратно-программного комплекса (АПК) для оценки усталостной повреждаемости материалов путем комплексного измерения в автоколебательном режиме ДМУ, ДС и ВТ средствами инженерного программного обеспечения (ИПО) в ультразвуковом (УЗ) диапазоне частот. Основа АПК - УЗ установка, являющаяся механической колебательной системой из концентратора, резонатора, пьезокерамических датчиков, и жестко соединённого с ними образца.

Назначение АПК: а) задание и автоматическое управление электрическими параметрами УЗ установки; б) сбор, обработка и отображение результатов измерений напряжений, токов, частоты на элементах УЗ установки; в) расчет, отображение и регистрация в архивных лог-файлах целевых характеристик (ДС, ВТ, ДМУ); г) автоматизация динамических испытаний образцов при различных частотах и амплитудах колебаний.

Условия работы АПК. Аппаратное обеспечение: а) компьютер (Pentium II 233 МГц; ОЗУ 64 МБ; системная шина PCI; НГМД и CD ROM; 4 Гб на НЖМД; плата ввода/вывода дискретных сигналов PCI-1753 фирмы Advantech); б) ИПО включает: ОС Windows 98 SE/XP; инструментальное средство разработки программного обеспечения АСУТП GeniDAQ V 4.11.001 фирмы Advantech с драйвером платы ввода/вывода дискретных сигналов фирмы Advantech PCI-1753; текстовый редактор для просмотра лог-файлов; электронные таблицы для обработки результатов экспериментов.

Программная среда АПК АСУТП GeniDAQ V 4.11.001 фирмы Advantech, состоящий из модулей: GeniDAQ Builder и GeniDAQ Runtime. АПК представляет собой отлаженную стратегию. Структура АПК: автоматически сгенерированный основной управляющий скрипт; три задачи в среде Task Designer; семь экранных форм, в среде Display Designe. ИПО АПК реализует алгоритмы: фиксации АЧХ; автоматического поиска резонансной частоты; измерения амплитудных зависимостей; проведения усталостных испытаний; автоматического слежения за изменением резонансной частоты; связи АПК с другими программами.

*Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме: «Разработка прототипа инженерного программного обеспечения (ИПО) на основе высокопроизводительных вычислений для оценки механических характеристик изделия, изготовленного с использованием аддитивных технологий (методом селективного лазерного спекания) с учетом стратегии изготовления изделия» (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0271).*

## СИСТЕМА ОЦЕНКИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ИНВАРИАНТОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Попов А.В., Тесля Д.Н., Комлев А.Б.

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия имени профессора  
Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина»,  
г. Воронеж, Российская Федерация  
[avpnil@rambler.ru](mailto:avpnil@rambler.ru)*

Проведённый анализ оцениваемых информативных параметров существующих АЭ комплексов позволил установить, что эти параметры не имеют физически обоснованных критериальных значений для определения степени опасности дефектов, существенным образом зависят от предыстории эксплуатации, формы и размеров конструкций, уровня и характера шумов. Проверяется число выбросов сигнала АЭ, энергия, MARSE, амплитуда, интенсивность и другие характеристики [1,2].

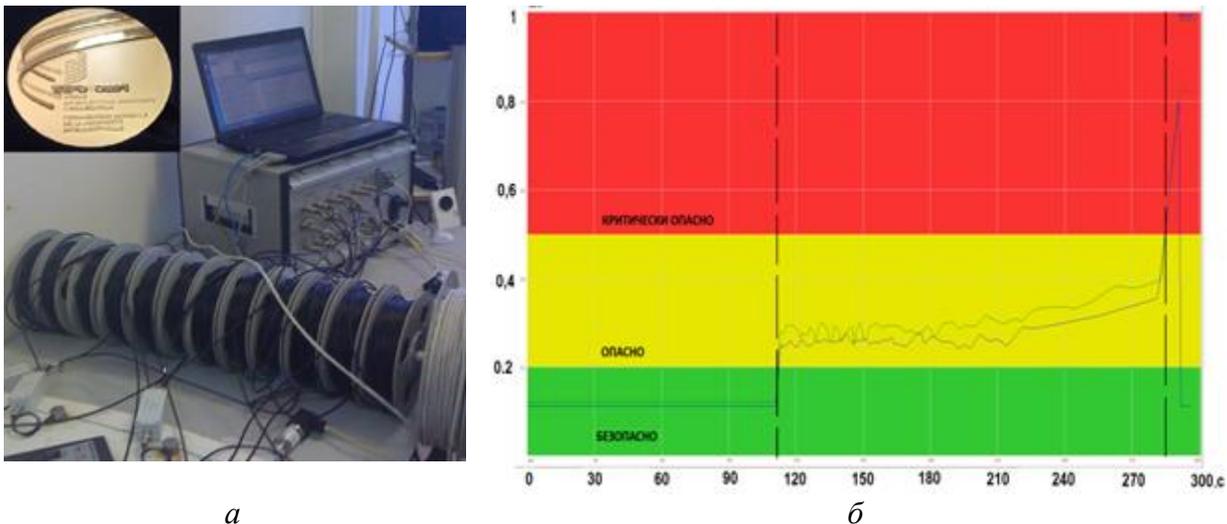
Для повышения эффективности АЭ контроля разработан теоретико-вероятностный подход к оценке информативных параметров эмиссии. Разработан способ оценки процессов накопления повреждений основанный на оценке изменения распределений параметров АЭ в процессе деформирования силовых элементов конструкций на основе инвариантов [3-7].

В связи с тем, что форма статистических распределений информативных параметров АЭ не зависит от амплитуды и интенсивности сигналов, а определяется только физикой процессов происходящих в материале конструкции при деформировании, значения разработанных инвариантов не зависят от амплитуды и интенсивности сигналов АЭ, формы, предыстории эксплуатации и размеров конструкции.

Для испытаний силовых элементов конструкций имеющих сварные и паяные соединения специалистами ВУНЦ ВВС (г. Воронеж) и ОАО «Научно-исследовательский институт специальных информационно-измерительных систем» (г. Ростов-на-Дону) разработаны многоканальные АЭ аппаратно-программные комплексы на основе инвариантов акустико-эмиссионных процессов, методики экспериментальных исследований, методика моделирования напряжённо-деформированного состояния, и проведены экспериментальные исследования по изучению связи статистических закономерностей АЭ процессов с процессами разрушения.

Разработанный акустико-эмиссионный аппаратно-программный комплекс (АПК) оценки эксплуатационной пригодности силовых элементов конструкций (выполнен как опытный образец с литерой «О» и РКД) награжден Золотой медалью Всемирной организации интеллектуальной собственности Организации Объединённых Наций на Международной выставке «Ехрорpriority-2013» (рис.1б).

При оценке прочности конструкций методом АЭ, актуальным вопросом является комплексный анализ множества информативных параметров сигналов в реальном масштабе времени. Для решения этой задачи разработана и практически отработана методика оценки многопараметрической информации в АЭ аппаратно-программных комплексах, основанная на объединении («свёртки») информативных параметров АЭ методами теории исследования операций (рис. б).



**Рис.1.** *а* - Разработанный аппаратно-программный комплекс на основе метода акустической эмиссии; *б* – изменение «свёртки» информативных параметров акустической эмиссии при статических испытаниях сопел ЖРД. По оси абсцисс время деформирования. По оси ординат нормированное значение «свёртки» информативных параметров

Созданная система оценки эксплуатационной пригодности конструкций, позволяет оперативно (в реальном масштабе времени) в акустико-эмиссионных аппаратно-программных комплексах обрабатывать многоканальную и многопараметрическую информацию об изменении информативных параметров акустической эмиссии и местоположении дефектов, оценивать степень опасности дефектов и возможность дальнейшей эксплуатации конструкции, обеспечивает оперативность, достоверность и снижение стоимости определения возможности эксплуатации силовых элементов конструкций.

*Исследования выполнены при поддержке фонда «У.М.Н.И.К».*

### Список литературы

1. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. (ЛБ 03-593-03). Ростехнадзор России, 2003. 102с.
2. Расщепляев Ю.С., Попов А.В. Метод инвариантов в задаче исследования потоков акустической эмиссии // Дефектоскопия, 2000. - №10. - С. 79-82
3. Буйло С.И., Попов А.В. Акустико-эмиссионный метод оценки параметров процесса накопления повреждений в задаче прогнозирования ресурса изделий ответственного назначения // Дефектоскопия, 2001. - № 9. - С.45-54
4. Попов А.В. Способ оценки процессов разрушения конструкций при акустико-эмиссионном контроле: пат. 2233444 Российская Федерация. 2004. Бюл. № 21. 5с.
5. Расщепляев Ю.С., Попов А.В. Обобщение метода инвариантов для оценки изменения характеристик акустической эмиссии при контроле прочности конструкций // Контроль. Диагностика, 2006. - №5. - С. 28-30.
6. Попов А.В., Кондранин Е.А. Метод контроля прочности силовых элементов конструкций на основе оценки численно-временных характеристик АЭ процессов // Контроль. Диагностика, 2008. - № 7. - С.45-47.
7. Попов А.В., Жумай В.Э. Определение прочностных характеристик конструкций на основе амплитудных инвариантов акустико-эмиссионных процессов // Контроль. Диагностика, 2008. - № 10. - С.29-32.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В УСЛОВИЯХ КРУЧЕНИЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Белоусов Н.Н.<sup>1</sup>, Варюхин В.Н.<sup>1</sup>, Вьюненко Ю.Н.<sup>2</sup>, Черняева Е.В.<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>Донецкий физико-технический институт им. А.А.Галкина, г. Донецк,

[bilniknik52@gmail.com](mailto:bilniknik52@gmail.com)

<sup>2</sup>ООО "Оптимикст ЛТД", Санкт-Петербург, Россия,

[6840817@mail.ru](mailto:6840817@mail.ru)

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,

[lena@smel.math.spbu.ru](mailto:lena@smel.math.spbu.ru)

**Актуальность.** В настоящее время на основе достижений физической акустики, физики мегапластических деформаций и компьютерных технологий возникла возможность проведения комплексных исследований предельных состояний конденсированных систем в условиях экстремальных энергетических воздействий. Наиболее актуальным является выбор и применение акустических методов и регистрирующих устройств для проведения комплексных исследований в условиях мегапластической деформации (МПД).

**Цель работы:** изучить экспериментальные и технические возможности различных устройств физической акустики, осуществить *in situ* регистрацию акустических сигналов (в широком диапазоне частот, с поверхности и внутреннего объема МПД-образцов) в условиях деформационного индуцирования дефектов и структурно-фазовых изменений.

**Оборудование и материалы.** Разработана и изготовлена многофункциональная МПД-установка типа наковальни Бриджмена, позволяющая проводить эксперименты в условиях поверхностной и объемной МПД. Материалы исследования: высокоазотистая сталь (X18AG10N16,  $C_N=0.3\%N$ ) и никелид титана.

**Экспериментально-технические особенности выбора акустических датчиков.** Прямая регистрация акустических сигналов с поверхности деформируемого образца непосредственно в наковальнях Бриджмена, связана с определенными экспериментально-техническими трудностями: незначительный объем образца ( $d = 5 \div 10$  мм,  $h = 0.02 \div 0.5$  мм), небольшое рабочее пространство ( $h = 10 \div 30$  мм), ограничивающее возможность размещения акустических датчиков, подвижные элементы (наковальни Бриджмена), исключающие прямой контакт с датчиками и др. Нами изучены исследовательские возможности и условия применения различных датчиков микрофонного типа, которые можно дистанционно применять для регистрации акустических сигналов с подвижных элементов наковален в условиях деформационного индуцирования дефектов и структурно-фазовых изменений в МПД-образцах. На основании предварительных исследований выбраны датчики с мембранными преобразователями и с кардиоидной диаграммой направленности, которые могут регистрировать только фронтальные сигналы, подавляют шумы и защищены от обратной связи. Применялись для исследований микрофоны динамического и конденсаторного типов с равномерными частотными характеристиками: UltraVoice Behringer-XM8500, CHURE SV100-A, CHURE SM58; конденсаторные: BehringerC1, RodeNT-1A, Audio-TechnicaAT2020, V&K4135 (диаметр 1/4"), M-01. Шорох-8. Из них выбраны UltraVoice Behringer-XM8500 (динамический, частотный диапазон:  $f = 50 \div 15000$  Гц, чувствительность: 70 дБ, соотношение сигнал/шум: 78 дБ, выходное сопротивление 150 Ом), Audio-Technica AT2020 (конденсаторный, частотный диапазон:  $f = 20 \div 20000$  Гц, чувствительность: 37 дБ (~14 мВ), соотношение сигнал/шум: 74 дБ, выходное сопротивление 100 Ом); M-01 (конденсаторный, чувствительность: 38 дБ, миниатюрный, размеры:  $d =$

3мм,  $l = 12\text{мм}$ ), Шорох-8 (чувствительность:  $<40$  дБ, низкий уровень шума, встроенный автоматический регулятор усиления выходного сигнала).

**Экспериментально-технические особенности проведения экспериментов и результаты.** Изготовлена универсальная акустическая установка, позволяющая работать с различными датчиками; микрофонного типа (звуковой диапазон) и пьезопреобразователями (ультразвуковой диапазон). Установка состоит из анализатора спектра СК4-56, широкополосного усилителя УЗ-29, милливольтметра В6-9, частотомера ЧЗ-35А, согласующего усилителя, аналого-цифрового преобразователя ADA 1406 и персонального компьютера с интегрированной звуковой картой и входом МІС. Для осуществления предварительной обработки сигналы усиливались с помощью усилителя УЗ-29, а затем с помощью В6-9 и ЧЗ-35А измерялись среднеквадратичные значения амплитуды и частоты акустических импульсов. Далее сигналы подавались на вход анализатора спектра СК4-56 для проведения предварительного амплитудно-частотного анализа акустического спектра. Для более глубокого анализа спектра сигналы подавали на персональный компьютер через аналогово-цифровой преобразователь ADA 1406. Проведенные исследования показали, что, максимальной чувствительностью обладали датчики микрофонного типа, хотя неравномерность частотной характеристики вносила определенные искажения в измерение амплитуды акустических импульсов.

Для регистрации звуковых импульсов выбран микрофон Audio-Technica AT2020, у которого неравномерность АЧХ составляет  $\pm 2\text{дВ}$ . Обработку экспериментальных данных проводили в программных пакетах PowerGraph и VisuelAnalyser. Сигналы звуковой частоты регистрировали с помощью микрофонных датчиков. С датчиков сигнал подавали на линейный вход интегрированной звуковой карты, имеющей вход МІС. Питание для работы микрофонного датчика использовали от встроенного предусилителя звуковой карты. В эксперименте микрофон закреплялся на расстоянии  $5 \div 20$  мм от узла трения нижней наковальни и МПД-образца. В таких условиях микрофон регистрировал звуковые волны в воздухе (т.е. колебания звукового давления), поэтому ожидали наложения собственных частот элементов установки на общий спектр. Сам спектр не позволял ответить на вопрос, по каким причинам и в какие моменты времени в процессе эксперимента происходило возбуждение тех или иных частот. В процессе МПД поверхности стали X18AG10H16 ( $C_N = 0.3\%N$ ) на общем фоне спектра обнаружены всплески интенсивности колебаний. Показано, что они имеют более высокую частоту и не перекрываются со спектром фона. Предварительно выделены типичные частоты этих всплесков: 1.5 кГц для первого и 2.0, 4.0, 6.0 и, 8.4 кГц для второго спектра. Для различных давлений прижимающей нагрузки (в пределах 300 МПа) эти частоты отличались незначительно (до 10%). Обнаружена определенная корреляция частот всплесков с собственными частотами элементов установки таких, как вращение подвижной наковальни и вала редуктора. Сделано предположение, что резкое повышение интенсивности акустического сигнала, возможно, связано с разрушением поверхностного деформационно структурного слоя в условиях МПД поверхности.

**Таким образом,** акустическая установка (ее аппаратная и программная реализация) позволили решать все практические задачи по сбору, анализу и представлению результатов *in situ* исследований в условиях деформационного индуцирования дефектов и структурно-фазовых изменений в МПД-материалах.

## ВОЗМОЖНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ОЦЕНКАХ МАСШТАБОВ И ПРИРОДЫ РАЗРУШЕНИЯ

Кудря А.В., Нго Нгок Ха, Соколовская Э.А., Котишевский Г.В., Кодиров У.Ш.

НИТУ «МИСис», Москва, РФ

[AVKudrya@misis.ru](mailto:AVKudrya@misis.ru)

Наномасштаб времени протекания элементарных актов разрушения определяет ограниченность средств измерений процесса, поэтому фактически обычно наблюдают только конечный результат – поверхность излома. Акустическая эмиссия (АЭ) от вскрывающейся трещины дает, в частности возможность наблюдения процесса разрушения в микроструктуре *in situ* прежде чем наступит макроразрушение. Диапазон масштабов структур, встречающихся в конструкционной стали, чрезвычайно широк. Однако, при напряжениях  $\sigma < \sigma_T$ , если критическая интенсивность напряжений  $K_{IC} < \sigma\sqrt{2d/\pi}$ , как очаги хрупкого разрушения опасны лишь элементы структуры размером  $d > d_{кр} = (\pi/2) \cdot (K_{IC}/\sigma_T)^2$ . Для низкоуглеродистых сталей ( $\sigma_T \approx 300$  МПа;  $K_{IC} > 300$  кгс·мм<sup>3/2</sup>)  $d_{кр} > 100$  мм, т.е. развитие разрушения наиболее вероятно от макроскопических концентраторов напряжений на поверхности. Только в высокопрочных сталях ( $\sigma_{0,2} = 1700$  МПа,  $K_{IC} \approx 200$  кгс·мм<sup>3/2</sup>)  $d_{кр} = 2$  мм и, например равноосное неметаллическое включение может оказаться очагом хрупкой трещины. С учетом такого вклада масштаба структуры в разрушение для прикладных задач АЭ, по-видимому, нет смысла во всех случаях регистрировать элементарные акты разрушения как хрупкого, так и вязкого и необходимости в использовании сверхчувствительной измерительной аппаратуры.

Микротрещина – импульсный излучатель звуковых волн длиной  $\lambda_0 \leq d$ . Неизбежные отражения волны от стенок (боковых и торцов) объекта (реверберация) возбуждают широкий спектр его собственных частот. Поэтому реальный сигнал содержит в себе информацию как о величине и темпе высвобождения упругой энергии при вскрытии трещины, так и “хвост” реверберации, зависящий от схемы испытания и затухания в материале. Отсюда вытекают возможные различия в подходах к измерению АЭ от трещины в масштабах образца и изделия, в т.ч. в зависимости от решаемой задачи: либо это классификация источников разрушения, например для оценки меры оптимальности различной геометрии микроструктуры при получении материалов с заданной вязкостью, либо для мониторинга трещин в конструкции с целью прогноза их риска.

Количественная оценка разрушения по измерениям акустической эмиссии возможна, когда проведена калибровка электроакустического тракта (образец – контактный слой – пьезопреобразователь – регистрирующая аппаратура) с целью учета потерь и контроля воспроизводимости. Например, в масштабах образца это позволило прямым сопоставлением эмиссии и измерением хрупких трещин показать, что если в одном скачке трещины разгружается площадка поперечником  $d$ , то амплитуда смещения в первичном упругом импульсе пропорциональна ее площади:  $A \sim d^2$  [1,2]. И хотя сигнал АЭ представляет собой интегральную свертку этого импульса с динамическим тензором Грина объекта и передаточной функций измерительного тракта, есть возможность выделить первичный импульс и по нему оценить геометрию единичной трещины [3].

Обеспечить эффективное использование метода АЭ помогает знание физики явления относящейся к объекту. Например, при росте вязкой трещины (по сравнению с вскрытием хрупкой) энергия высвобождается за много скачков с пластической деформацией между ними, поэтому при том же размере трещины получается цуг упругих импульсов, из которых метод пиковых амплитуд регистрирует одну, наибольшую (обычно первую). Тогда скачкообразное увеличение пиковой амплитуды АЭ при сходных размерах трещины будет означать переход от вязкого разрушения к хрупкому. Использование в этих целях компактного неразрезного пакета из 50-60 микрообразцов [4]

позволило сравнивать абсолютные амплитуды сигналов при неизменных переходных потерях для локальной (в масштабах  $\leq 1 \text{ мм}^2$ ) оценки хладноломкости различных сталей с привязкой к микроструктуре в том же порядке и с теми же расстояниями между вариантами, что и “классические” сериальные кривые ударной вязкости (по Н.Н. Давиденкову) на стандартных образцах (тип I, ГОСТ 9454).

Привязка импульсов АЭ к источнику сигналов эмиссии (росту трещины) оказалась весьма полезной при развитии методов оценки вязкости разрушения сталей на образцах малых размеров с использованием нелинейного критерия механики разрушения – критического раскрытия трещины (КРТ)  $\delta_c$ . Выявленная последовательность сигналов АЭ была сопоставлена с 3D-моделью изломов, полученных при трехточечном статическом изгибе образцов. Это позволило с одной стороны описать кинетику развития трещины, в процессе испытания на вязкость разрушения и получить более объективные значения КРТ (CTOD), с другой – соотнести регистрируемые импульсы АЭ со строением изломов, что существенно для понимания критических факторов структуры, определяющих неоднородность трещиностойкости металла (поковки из улучшаемой стали 38ХНЗМФА).

Часто используемые параметры АЭ – плотность потока импульсов, превышающих уровень дискриминации (скорость счета), накопленная сумма импульсов (суммарный счет), подтвердили свою эффективность, когда решались задачи, связанные с наблюдением каких-либо переходных процессов, например, при переходе разрушения от критического к закритическому. Абсолютные измерения пиковой амплитуды импульса АЭ с крутым фронтом с помощью демпфированного пьезопреобразователя и широкополосной аппаратуры пикового детектирования при прямой калибровке электроакустического тракта дают количественную информацию либо о площади хрупкой трещины – при неизменном напряжении, либо при независимом измерении площади, о плотности упругой энергии и напряжении в месте образования трещины [1,2].

Отсюда вытекает необходимость осуществления нескольких практических шагов. Так, например, в случае отсутствия ярко выраженного максимума переднего фронта и, как результат, возникновения неопределенности при нахождении пиковой амплитуды АЭ, ее выделение возможно [5] с использованием алгоритма построения суммарной огибающей с последующей низкочастотной Фурье-фильтрацией, когда пиковая амплитуда АЭ определяется на временном интервале от первого превышения уровня дискриминации ( $\sim 10$  дБ над уровнем шума) до первого минимума огибающей. Во-вторых, необходимо более полное извлечение информации и спектра сигналов, претерпевающего, как правило, искажения при прохождении электроакустического тракта [6].

Необходима дальнейшая разработка алгоритмов описания акустической эмиссии, что становится особенно актуальным в связи с возможностью цифровой регистрации сигналов.

1. Ханжин В.Г., Штремель М.А., Никулин С.А., Калиниченко А.И. // Дефектоскопия. 1990. № 4. С. 35-40.
2. Алексеев И.Г., Кудря А.В., Штремель М.А. // Дефектоскопия. 1994. № 12. С. 29-34.
3. Ханжин В.Г., Штремель М.А. // МиТОМ. 2009. № 5. С. 53-59.
4. Штремель М.А., Алексеев И.Г., Кудря А.В., Мочалов Б.В. // Заводская лаборатория. 1991. № 8. С. 66-69.
5. Кудря А.В., Марков Е.А. // Материаловедение. 2007. № 1. С. 13-18.
6. Мерсон Д.Л., Черняева Е.В. // Деформация и разрушение материалов. 2005. № 5. С. 24-27.

# ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ КОРРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ С ОДНОВРЕМЕННОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Кетов В. М., Mandel M., Krüger L.

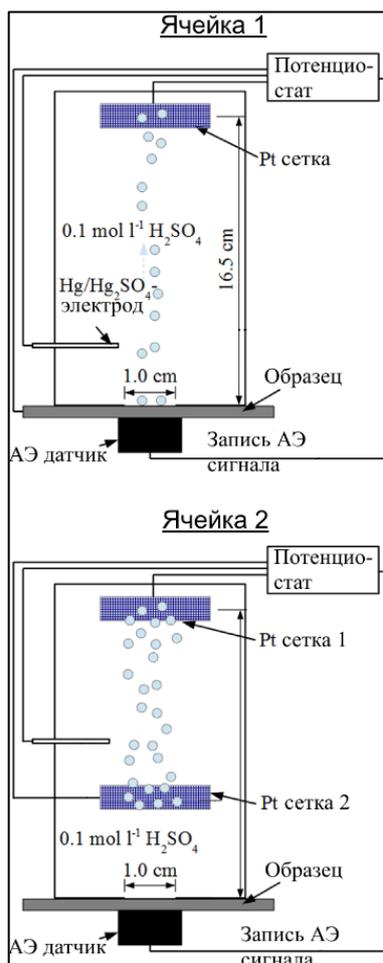
TU Bergakademie Freiberg, 09599 Freiberg, Germany  
[volodymyr.kietov@iwt.tu-freiberg.de](mailto:volodymyr.kietov@iwt.tu-freiberg.de) / [ketowvladimir@gmail.com](mailto:ketowvladimir@gmail.com)

Акустическая эмиссия может послужить важным источником информации о процессах, протекающих при электрохимической коррозии металла. Данный метод был использован различными авторами для регистрации сигналов, связанных с образованием пузырьков газа [1–4], разрушением оксидного слоя или образованием оксидов на поверхности [4], отрывом отдельных зёрен и анодного растворения металла [1,3,4].

В представленной работе были использованы плоские полированные образцы литой аустенитной легированной стали, состав которой приведён в табл. 1.

**Таблица 1.** Химический состав исследуемой стали

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	N	Fe
0,048	0,85	6,29	0,0052	0,0076	15,7	0,08	9,23	0,05	0,076	Bal.



**Рис. 1.** Схема измерительной ячейки

Измерения проводились в 0,1 М растворе серной кислоты в ячейке, схема которой показана на рис. 1. Перед началом измерения образец выдерживался в растворе в течение 30 мин. для достижения равновесного состояния. Затем на образец подавался изменяющийся равномерно во времени от -2 В до +2 В потенциал  $E$  ( $\dot{E} = 0,1$  мВ/мин). Фиксировался ток, текущий через образец. АЭ датчик марки WD (РАС) был подключен к системе PCI-2 + AEwin 4.30 (РАС) через предусилитель в 60 дБ. Метод записи пороговый, порог был установлен на 30 дБ.

Ячейка типа 2 была использована для того, чтобы оценить вклад в картину акустической эмиссии: *a* – образования пузырьков водорода и кислорода (электролиза воды); *b* – событий на противостоящем электроде (верхняя платиновая сетка). В качестве рабочего электрода была подключена платиновая сетка, на которой происходил электролиз воды. Результаты эксперимента (рис. 2 справа) позволили сделать следующие выводы:

- Характеристики АЭ сигналов соответствующих образованию H<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> идентичны. Пиковая частота лежит в пределах 150 – 400 кГц, длительность большинства сигналов – менее 100 мкс (С1 на Рис. 3).

- влиянием событий, происходящих на верхнем электроде, можно пренебречь.

Результаты измерений, проведенных в ячейке 1 показаны на рис. 2 слева.

По ходу изменения приложенного к образцу потенциала от -2 В до +2 В, были выделены 3 региона активности АЭ:

R1 – от -2 до -0,845 В: активное образование H<sub>2</sub> на поверхности;

R2 – от  $-0,845$  до  $+1,15$  В: поверхность последовательно проходит стадии активации, пассивации, растворения оксидной плёнки и вторичной пассивации за счёт формирования шпинели типа  $NiMe_2O_4$ . Активность АЭ – минимальна.

R3 – от  $+1,15$  В до  $+2$  В: практически совпадает с началом анодного растворения металла и происходящим одно-временно с ним выделением кислорода.

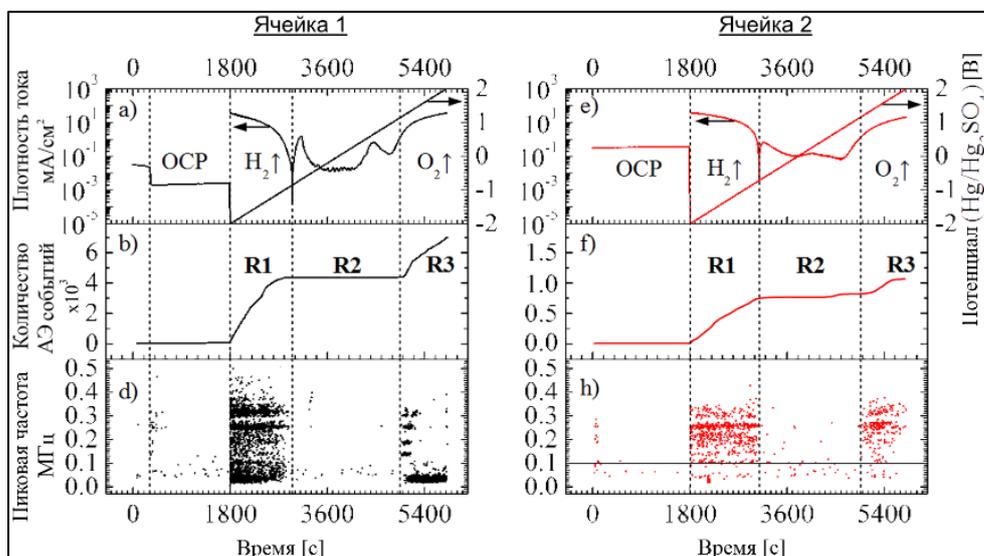


Рис. 2. слева: рабочий электрод – образец исследуемой стали; справа: чистый электролиз воды

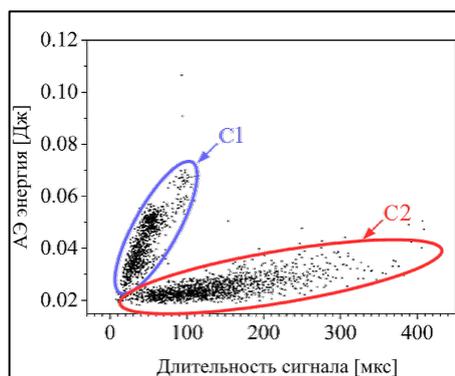


Рис. 3. Деление АЭ событий на группы

Принимая во внимание такие параметры АЭ сигналов как длительность, энергия и пиковая частота, они были разделены на 2 группы, С1 и С2 на рис. 3. Сигналы первой группы С1 характеризовались большей энергией при небольшой длительности и частотой в пределах  $150 - 400$  кГц. Сигналы второй группы С2 показали меньшую энергию при большей длительности и частоту до  $100$  кГц. Такие сигналы соотносят с повреждением оксидной плёнки на поверхности металла [5].

Активность групп С2 и С1 совпадала в регионе R1, при этом в регионе R2 активность группы С1 – образования газа – начиналась при достижении потенциала в  $+1,15$  В и прекращалась при достижении потенциала  $+1,45$  В. Активность же группы С2 начиналась при достижении потенциала в  $+1,25$  В и продолжалась до конца эксперимента. Было установлено, что группа С1 соответствует образованию относительно крупных пузырьков газа размером  $200-600$  мкм на порах литой структуры стали. При достижении потенциала  $+1,45$  В поры сглаживаются за счёт анодного растворения металла и газ начинает выделяться равномерно на всей поверхности с размером пузырьков  $<50$  мкм, которые не генерируют АЭ.

Результаты представленной работы подробно изложены в [6].

1. Idrissi H, Ramadan S, Maghnouj J, Boulif R. Modern concept of acoustic emission (AE) coupled with electrochemical measurements for monitoring the elastomer-coated carbon steel damage in phosphoric acid medium. Progress in Organic Coatings 2008;63(4):382–8.
2. Inoue H, Tsuzuki R, Nohara S, Iwakura C. In Situ Monitoring of Hydrogen Storage Alloy Negative Electrode during Charging by an Acoustic Emission Technique. Electrochem. Solid-State Lett. 2006;9(11):A504.

3. Xu J, Wu X, Han E-H. Acoustic emission during the electrochemical corrosion of 304 stainless steel in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solutions. *Corrosion Science* 2011;53(1):448–57.
4. Boinet M, Bernard J, Chatenet M, Dalard F, Maximovitch S. Understanding aluminum behaviour in aqueous alkaline solution using coupled techniques. *Electrochimica Acta* 2010;55(10):3454–63.
5. Jirarungsatian C, Prateepasen A. Pitting and uniform corrosion source recognition using acoustic emission parameters. *Corrosion Science* 2010;52(1):187–97.
6. Mandel M, Kietov V, Dubberstein T, Krüger L. The Potentiodynamic Polarisation of a High-Alloy Steel—An Analysis by Acoustic Emission Testing and Long-Distance Microscopy. *Electrochimica Acta* 2017;240:350–60.

## АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Брянский А.А., Башков О.В., Кхун Х.Х.

<sup>1</sup>*Комсомольский-на-Амуре государственный университет,  
Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация,  
[bryansky.aa@yandex.ru](mailto:bryansky.aa@yandex.ru), [bashkov@knastu.ru](mailto:bashkov@knastu.ru)*

В работе представлены результаты исследования механизмов разрушения в многослойных полимерных композиционных материалах с армирующим элементов в виде слоёв стеклоткани. Для описания процесса накопления повреждений использованы такие типы разрушений, как: разрушение матрицы связующего, нарушение адгезии между матрицей и армирующим наполнителем, разрушение волокон армирующего элемента, расслоения. Для исследований использовался стеклопластик СТ-69Н на основе связующего ЭДТ-69Н и стеклоткани Т-10П. Нагружение производилось методом статического изгиба с разделением на стадии нагружения в виде остановов.

Акустическая эмиссия (АЭ) известна как информативный метод исследования образующихся микро- и макроповреждений в материале в процессе нагружения или иного воздействия, приводящего к структурной перестройке в материале. Наиболее распространёнными для анализа параметрами сигналов АЭ являются суммарный счёт, амплитуда, частота, энергия и спектры зарегистрированных сигналов. На их основе разрабатываются критерии оценки повреждений, выделяются стадии разрушения под нагружением.

Использование комплексного анализа по нескольким параметрам сигналов АЭ может дать дополнительные сведения о типе повреждений, их масштабе и моментах образования, выделять стадии разрушения материала и, в конечном итоге, обеспечить возможность прогнозирования показателей прочности и надёжности конструкций. Степенной показатель накопления суммарной АЭ при изменении параметра нагружения позволяет прогнозировать несущую способность материала при наличии предыстории нагружения и регистрации АЭ. Значения b-value (статистического распределения амплитуд сигналов АЭ), позволяет оценить масштаб протекающих процессов в материале и тип повреждённости на различных стадиях нагружения. Функции распределения плотностей вероятностей амплитуд и медианных частот сигналов АЭ позволяют выявлять границы смены стадий и механизмов повреждённости ПКМ при нагружении.

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Башков О.В.<sup>1</sup>, Ромашко Р.В.<sup>2</sup>, Зайков В.И.<sup>1</sup>, Башков И.О.<sup>1</sup>, Кхун Х.Х.<sup>1</sup>,  
Брянский А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Комсомольский-на-Амуре государственный университет,  
Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация,*

<sup>2</sup>*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,  
Владимосток, Российская Федерация,  
[bashkov@knastu.ru](mailto:bashkov@knastu.ru)*

В работе представлены результаты анализа сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных при распространении ультразвуковых волн волоконно-оптическими датчиками. Чувствительным элементом волоконно-оптического датчика является само оптическое волокно, встроенное в контролируемый материал. Наиболее эффективным методом использования волоконно-оптических датчиков является их встраивание в композиционные материалы в процессе изготовления.

Волоконно-оптические датчики имеют ряд преимуществ над классически применяемыми пьезоэлектрическими датчиками. Волоконно-оптические датчики защищены от электромагнитных помех, обладают стойкостью к агрессивным средам и высоким температурам, могут быть распределены по поверхности объекта контроля большого размера или встроены в его структуру.

Волоконно-оптические датчики были построены по схеме адаптивного интерферометра, основанного на использовании перезаписываемой динамической голограммы, образованной в фоторефрактивном кристалле. Основное преимущество такой схемы построения измерительной интерферометрической системы связано с реализацией метода адаптации к внешним температурным изменениям и низкочастотным механическим колебаниям. Применение оптической схемы адаптации снижает дрейф рабочей точки и позволяет повысить помехозащищенность и чувствительность измерительной системы при использовании адаптивного интерферометра на фоторефрактивном кристалле.

Оптические волокна измерительной системы интерферометра являлись датчиками ультразвуковых волн и были встроены в полимерный композитный материал в процессе изготовления образца. Образец представлял собой прямоугольную пластину многослойного стекловолоконистого материала. В результате проведенных исследований было установлено, что чувствительность адаптивного интерферометра позволяет детектировать сигналы акустической эмиссии, генерируемые источником Су-Нильсена. При определении скорости звука в полимерном композиционном материале установлены особенности регистрации групповой волны волоконно-оптическими датчиками, связанные с анизотропностью среды распространения волны и распределенным характером расположения датчиков в исследуемом композиционном материале. Для выделения информативной составляющей полезного сигнала акустической эмиссии было использовано вейвлет-преобразование.

# ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА АЭ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА РАЗВИТИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ В ТРУБНОЙ СТАЛИ ПРИ РАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫТАНИЯХ

Нефедьев Е.Ю.<sup>1</sup>, Гомера В.П.<sup>2</sup>, Смирнов А.Д.<sup>2</sup>, Григорьева А.В.<sup>3</sup>,  
Стояновский Л.В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Крыловский государственный научный центр, г. Санкт-Петербург, Россия,  
[ne246@yandex.ru](mailto:ne246@yandex.ru)

<sup>2</sup> Киришинефтеоргсинтез,  
г. Кириши, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский гос. университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия

Одним из основных приложений метода АЭ является исследование свойств конструкционных материалов [1], в частности исследование динамики их разрушения. В работе представлены результаты гидравлических испытаний до разрушения труб из стали 17Г1С в сопровождении метода АЭ. Испытывались отрезки труб ( $D_y630$ ,  $l = 3000$ мм,  $t = 10$ мм и  $D_y219$ ,  $l = 3000$ мм,  $t = 6$ мм), с двух сторон заглушенные приваренными эллиптическими днищами. На моделях были созданы концентраторы напряжений, имитирующие систему полуэллиптических трещин. Предварительно для трубы  $D_y630$  был проведен прочностной расчет методом конечных элементов для определения положения точек с наибольшими значениями КИН и прогнозирования величин давления разрушения. Информацию, полученную при испытаниях, предполагалось использовать для изучения стадий процесса разрушения и для разработки критерия опасности дефекта по данным АЭ мониторинга.

Фактическое значение давления разрушения для трубы  $D_y630$  составило  $P = 60$  МПа при расчетном значении  $P = 59$  МПа, которое соответствует вязкой области разрушения. Разрушение трубы  $D_y219$  произошло при  $P = 90$  МПа (рис.1).



Рис. 1. Разрушение (утечка среды) трубы  $D_y630$  при давлении ГИ  $P=90$  кг/см<sup>2</sup>

Использование предлагаемого коэффициента концентрации источников  $K_{АЭ}$ , базирующегося на результатах локации, позволило по данным АЭ контроля определить место разрушения при давлениях гидроиспытания значительно меньших разрушающих. Достоверность данного подхода при прогнозировании места начала разрушения по концентрации источников АЭ можно продемонстрировать, например, результатами

их локации на трубе  $D_y219$ . Результаты как линейной (рис. 2а), так и планарной (рис. 2б) локации получены при использовании одного набора данных.

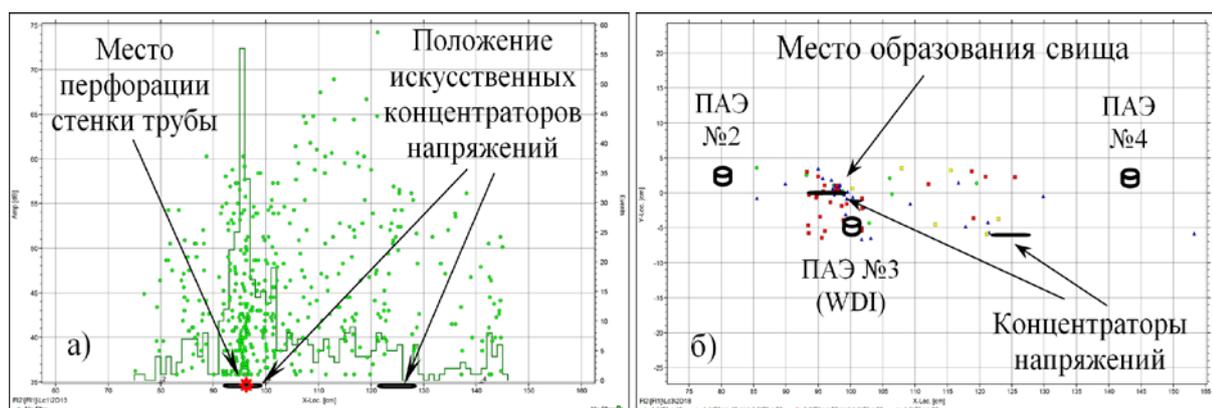


Рис.2. Результаты линейной (а) и планарной локации (б) АЭ источников на трубе  $D_y630$

Исследована возможность наблюдения разделения процесса разрушения на стадии по данным АЭ. Различные исследователи выделяют разное количество кинетических периодов развития пластической деформации и разрушения – от 2 до 6. Согласно [2], например, их четыре: 1) инкубационный; 2) торможения; 3) стационарный; 4) заключительный ускоренный. Анализ проводился по оценке изменения  $b$ -параметра АЭ в зависимости от стадии накопления повреждений и близости к началу макро-разрушения [3].

Использование информации о форме сигнала позволило идентифицировать природу АЭ событий (от роста трещины или утечки), зарегистрированных на стадии долома.

Сопоставление результатов прочностного расчета, фактических разрушающих нагрузок и результатов контроля методом АЭ позволяет говорить о возможности использования предложенного критерия (коэффициент концентрации АЭ источников) для локализации места разрушения на стадии предразрушения. Достоверность критерия подтверждается совпадением основных результатов его применения, полученных при использовании разных видов АЭ аппаратуры во время разрушающих испытаний объектов, имеющих разные геометрические размеры. Методические положения предложенного подхода планируется развивать в дальнейших экспериментах по АЭ контролю объектов с различными физическими и геометрическими характеристиками.

## Список литературы

1. Н.А. Семашко [и др.], Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении, М.: Машиностроение, 2002, 240 с.
2. Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Структура и механические свойства металлов, М.: Металлургия, 1970, 472 с.
3. Ботвина Л.Р., Петерсен Т.Б., Тютин М.Р. Оценка и анализ  $b$ - параметра акустической эмиссии // Заводская лаборатория, 2011, №3, с.43-50

# МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ И АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ВОДОРОДНОЙ ХРУПКОСТИ СТАЛЕЙ РАЗНОЙ ПРОЧНОСТИ

Мерсон Е.Д., Мягких П.Н., Полуянов В.А., Мерсон Д.Л.,  
Виноградов А.Ю.

*НИИ прогрессивных технологий, Тольяттинский государственный университет,  
г. Тольятти  
Норвежский технологический университет, г. Тронхейм, Норвегия  
[MersonED@gmail.com](mailto:MersonED@gmail.com)*

## Введение

Применение метода акустической эмиссии (АЭ) для мониторинга состояния стального оборудования, работающего в условиях контакта с водородосодержащими средами, а также для выявления водородной хрупкости (ВХ) на ранних стадиях ее развития является актуальной задачей. Тем не менее, существуют противоречивые данные относительно влияния ВХ на параметры АЭ в сталях с разным химическим составом, микроструктурой и механическими свойствами [2–4]. В связи с этим целью настоящего исследования было установить связь между механическими свойствами, механизмом разрушения и поведением акустической эмиссии в насыщенных водородом сталях различного химического состава.

## Материалы и методика

Для испытаний на растяжение из сталей марок 70, 09Г2С и S235JR были изготовлены плоские гладкие образцы с размером рабочей части 15x3.9x2.4 мм. Для перевода в вязкое состояние низкоуглеродистую и высокоуглеродистую стали марок S235JR и 70, полученные в горячекатаном и закаленном состоянии, соответственно, подвергали вакуумному отжигу при 950 и 850 °С, соответственно. Малолегированную сталь 09Г2С полученную в горячекатаном состоянии, для перевода в высокопрочное состояние подвергали равноканальному угловому прессованию (РКУП) по схеме «conform»<sup>1</sup>.

Образцы всех типов подвергали электролитическому наводороживанию в растворе 5% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 1.5 г/л тиомочевины при плотностях тока в диапазоне от 20 до 600 мА/см<sup>2</sup> в течение 1 ч. В течение 5 минут после окончания наводороживания образцы промывали в проточной воде и в четыреххлористом углероде, и подвергали одноосному растяжению на испытательной машине N50КТ, Tinius Olsen при скорости движения траверсы 5 мм/мин.

Одновременно с испытанием производили беспороговую потоковую запись АЭ с помощью оборудования ф. РАС: датчика Pico, усилителя 2/4/6 и платы АЦП РСІ-2. Полученные записи АЭ – «стримы» при помощи программного обеспечения, разработанного в НИИ прогрессивных технологий (ТГУ, Тольятти), были поделены на отдельные фрагменты – «фреймы», для каждого из которых была посчитана функция спектральной плотности мощности и вычислена средняя энергия. Фрактографический анализ производили при помощи электронного микроскопа SIGMA, ф. Carl Zeiss.

## Результаты

В случае относительно вязких сталей (S235JR и сталь 70 после отжига и 09Г2С и S235JR в горячекатаном состоянии) в результате наводороживания снижение удлинения, главным образом, происходило за счет сокращения участка локализованной деформации. После наводороживания в изломах данных сталей появлялись характерные дефекты типа «рыбий глаз», представляющие собой округлые области квази-хрупкого

<sup>1</sup> Указанная операция производилась коллективом УГАТУ, г. Уфа

разрушения с неметаллическим включением в центре. Вокруг данных дефектов наблюдался обычный вязкий ямочный рельеф. Интересно, что активность и суммарная энергия АЭ в результате наводороживания данных материалов практически не изменялись, а в случае отожженной S235JR даже снижались.

Разрушение наводороженных высокопрочных сталей (сталь 70 после закалки и отпуска, и сталь 09Г2С после РКУП) всегда происходило в области квазиупругой деформации или в самом начале участка деформационного упрочнения. В результате наводороживания излом менялся с полностью вязкого на полностью хрупкий. Поверхность разрушения наводороженной стали 70 имела межзеренный характер, а в случае стали 09Г2С после наводороживания в изломе наблюдали фасетки квази-скола, морфология которых, сильно отличалась от тех, что были обнаружены на поверхности дефектов «рыбий глаз» в вязких сталях. Активность и суммарная энергия АЭ при испытании наводороженных высокопрочных сталей была значительно выше, чем до наводороживания.

### **Выводы**

1. Исходное состояние стали, характеризующееся сочетанием микроструктуры и механических свойств, оказывает принципиальное влияние на механизм разрушения и характер проявления ВХ.

2. ВХ высокопрочных сталей, характеризуется: 1) разрушением в области квазиупругой деформации, 2) полностью хрупким изломом с межзеренным или транскристаллитным рельефом и 3) высокой активностью и энергией АЭ. В свою очередь ВХ вязких сталей проявляется в: 1) сильном уменьшении удлинения за счет сокращения участка локализованной деформации, 2) появлением в изломе дефектов типа «рыбий глаз» и 3) неизменными активностью и энергией АЭ или их снижением по сравнению с ненаводороженным состоянием.

3. Предположительно, главным фактором определяющим поведение АЭ является механизм разрушения: процесс формирования дефектов «рыбий глаз» в вязких сталях не вносит заметного вклада в общую АЭ, тогда как межзеренный или транскристаллитный скол в высокопрочных сталях являются мощными источниками АЭ.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 17-08-01033). Авторы также выражают глубокую благодарность коллективу УГАТУ под руководством профессора Р. З. Валиева за предоставленные материалы, изготовленные методом РКУП.*

### **Список литературы**

1. Мерсон Д.Л. Применение метода акустической эмиссии в физическом материаловедении в Перспективные Материалы. Тольятти: ТГУ, МИСиС, 2006. С. 417–456.
2. Jones R., Friesel M., Gerberich W. Acoustic emission from intergranular subcritical crack growth // Metall. Mater. Trans. A. 1989. V. 20. P. 637–648.
3. You Y., Teng Q., Zhang Z., Zhong Q. The effect of hydrogen on the deformation mechanisms of 2.25Cr-1Mo low alloy steel revealed by acoustic emission // Mater. Sci. Eng. A. 2016. V. 655 P. 277–282.
4. Merson E., Vinogradov A., Merson D.L. Application of acoustic emission method for investigation of hydrogen embrittlement mechanism in the low-carbon steel // J. Alloys Compd. 2015. V. 645. P. S460–S463.

## ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ШУМОПОДОБНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ БЕСПОРОГОВОМ РЕЖИМЕ ЕЕ РЕГИСТРАЦИИ

Растегаев И.А., Мерсон Д.Л., Растегаева И.И.

*ТГУ, г. Тольятти, Россия,*  
[RastIgAev@yandex.ru](mailto:RastIgAev@yandex.ru)

Шумоподобные акустические сигналы – это сложные колебания со случайной амплитудой и неопределённой высотой тона, которые характеризуются узкой автокорреляционной функцией и широким частотным спектром. Беспороговая регистрация это способ широкополосной непрерывной записи волновой формы акустической эмиссией (АЭ) без применения амплитудного дискриминатора (порога). Целью настоящей работы является разработка широкополосных методов фильтрации и классификации шумоподобных сигналов АЭ, регистрируемых в беспороговом режиме для распознавания технического состояния объекта контроля предшествующего критическому.

Проблема состоит в том, что при исследовании шумоподобных процессов и явлений (трибологических, аэро/гидродинамических, коррозионных и др.) основную долю сигнала составляет шум, энергия которого сопоставима или выше энергии «полезного» сигнала, поэтому изменение АЭ в момент его прихода на фоне шума практически незаметно ни во временной, ни в частотной областях. Для снижения или подавления вклада в сигнал шумовой компоненты и выделения сигнала из шума требуется применение фильтров. Однако для обеспечения положительного эффекта от беспороговой широкополосной записи при обработке АЭ должны применяться только такие алгоритмы, которые исключают потерю «полезных» данных. В настоящей работе для выделения сигналов АЭ из шума, уменьшения искажения сигналов АЭ во время обработки и снижения влияния энергии шума на результат анализа предложено совмещать процедуры фильтрации и классификации АЭ данных.

В данной работе подобную оценку АЭ проводили на основе параллельного анализа изменения интегральных и локальных оценочных параметров АЭ. При этом перед анализом АЭ проводилась широкополосная фильтрация данных с применением двух стандартных алгоритмов: спектрального вычитания шума (СВШ) [1] и быстрого преобразования Фурье (БПФ-фильтр) [2]. Оригинальность их применения заключалась в выборе весовых функций, с помощью которых можно подавить шум или помеху. В зависимости от цели исследований предложено использовать пять весовых функций [3]. Первую (Ф1) – для подавления шумов и помех, возникающих на работающем объекте контроля без действия рабочего процесса/наличия рабочей среды. Вторую (Ф2) – для снижения шума рабочего процесса, протекающего в нормальном режиме или при действии процессов, не представляющих интереса для исследования. Ф3 – для снижения циклического (периодического) шума при неравномерном действии рабочего процесса. Ф4 – для компенсации влияния собственных резонансов АЭ аппаратуры или объектов контроля. Ф5 – для приведения энергии несущего процесса/шума и сигнала к равной взвешенной степени значимости в каждой выделенной полосе частот.

Для оценки интегральных изменений АЭ использовали параметры: огибающая АЭ и среднеквадратичное значение сигнала [4]. Оценка локальных изменений АЭ и процесс детектирования механизмов повреждения объекта контроля в нашем подходе возложены на алгоритмы классификации АЭ. Классификация/кластеризация АЭ данных проводится тремя разными алгоритмами [5, 6 и 7] путем разбиения полученного массива данных на отдельные группы сигналов АЭ, каждая из которых обладает набором подобных классификационных признаков, благодаря чему осуществляется кластеризация и отношение каждой группы сигналов к конкретному механизму разрушения. Верификация результатов проводилась по критерию совпадения проявления групп сиг-

налов АЭ со временем действия имитированного процесса разрушения конкретного типа. С физической точки зрения, данный подход основан на предположении, что схожие процессы и явления, приводящие к разрушению объекта по каким-либо механизмам, обладают общими закономерностями: периодичность (возникают каждый раз при схожих условиях); малый типаж (ограниченное число видов разрушения); явное выделение на фоне общего шума при переходе на новый масштабный уровень разрушения.

Проведенные исследования показали, что все использованные алгоритмы позволяют достичь поставленной цели, но с различной эффективностью. Наибольшую точное определение моментов перехода одного доминирующего механизма разрушения к другому показало применение сочетания алгоритма фильтрации СВШ [1] с весовой функцией  $\Phi_2$  [3], а также алгоритма кластеризации по степени схожести спектров кадров АЭ [6]. Поэтому данная схема обработки АЭ рекомендована к применению. В настоящей работе продемонстрированы конкретные примеры применения предлагаемого подхода, сочетающего фильтрацию и классификацию АЭ, в задачах диагностирования трибологических систем, контроля режима работы роторно-кавитационных установок и при поиске течи жидкой среды из емкости [8].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации проект № 11.8236.2017/9.10.*

## **Список литературы**

1. Saeed V.V. Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction, Second Edition / John Wiley & Sons Ltd, 2000. – 466 p.
2. Allen J.B. Short Time Spectral Analysis, Synthesis, and Modification by Discrete Fourier Transform / IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1977. – Vol. ASSP-25. – № 3. – p. 235-238.
3. Растегаев И.А., Данюк А.В., Виноградов А.Ю., Мерсон Д.Л., Растегаева И.И. Анализ шумоподобных сигналов акустической эмиссии способами широкополосной фильтрации / Контроль. Диагностика, 2014. – № 8 – с. 49-56.
4. Rastegaev I.A., Merson D.L., Vinogradov A.Yu. Real time acoustic emission methodology in effective tribology testing / International Journal Microstructure and Materials Properties, 2014 – Vol. 9 – № 3/4/5 – p. 360-373.
5. Холодильников О.В., Островский Е.И., Калмыкова Т.М. Способ оценки состояния пар трения / Патент № RU 2051368. <http://www1.fips.ru>.
6. Мерсон Д.Л., Разуваев А.А., Виноградов А.Ю. Применение методики анализа спектральных образов сигналов АЭ для исследования повреждаемости покрытий TiN на стальной подложке / Дефектоскопия, 2002. – № 7. – с. 37-46.
7. Everitt B., Landau S., Leese M., Stahl D. Cluster analysis [5th ed] / John Wiley & Sons, 2011. – 360 p.
8. Растегаев И.А., Мерсон Д.Л., Растегаева И.И., Чугунов А.В., Виноградов А.Ю. Сравнительный спектральный анализ шумоподобных акустических сигналов при мониторинге и диагностике промышленного оборудования / Контроль. Диагностика, 2012. – №10 – с. 80-87.

## ОСОБЕННОСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛА РОТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ

Растегаев И.А., Данюк А.В., Мерсон Д.Л., Хрусталеv А.К.

ТГУ, г. Тольятти, Россия,  
[RastIgAev@yandex.ru](mailto:RastIgAev@yandex.ru)

Роторы являются ответственной частью паровых турбин тепловых электростанций (ТЭС). Так как они выполняют основную рабочую функцию преобразования энергии пара в механическую работу вращения электрогенератора, то их повреждение может привести не только к остановке выработки электроэнергии на ТЭС, но и к авариям с тяжелыми последствиями и крупными материальными потерями [1 - 3 и др.]. Таким образом, роторы паровых турбин (РПТ) представляют собой объекты, к которым предъявляются очень высокие требования к техническому состоянию, и которые должны тщательно контролироваться.

РПТ являются крупногабаритными и массивными изделиями, которые эксплуатируются при высокой температуре, давлении и больших переменных нагрузках от крутящего момента и сил инерции. Поэтому основной причиной аварий РПТ являются усталостные трещины, накапливаемые под действием изгибных и крутильных колебаний, на обнаружение которых в основном и направлены методики применения методов неразрушающего контроля (НК) [3 - 7 и др.]. В настоящее время данная задача решается путем оценки дефектности роторов методами ультразвукового, радиографического, вихретокового, магнитопорошкового, капиллярного и визуального НК при периодической плановой диагностике, ремонте, правке РПТ или после выработки РПТ назначенного срока службы (ресурса) [3, 4 и др.]. НК ротора проводится с внешних диаметров, с торцов и через осевой канал. Однако материал ротора представляет собой ковчанное изделие цилиндрической формы с развитыми фасонными поверхностями с малой площадью механической обработки и множеством переходов, галтелей, проточек, отверстий и т.д., поэтому РПТ имеет множество ограничений для применения указанных методов НК, в частности, и низкую контролепригодность, в целом. Кроме этого РПТ последнего поколения не имеют осевого канала, поэтому их контроль сканирующими методами возможен только с наружной поверхности, что увеличивает количество «мертвых зон» и еще более снижает контролепригодность. Таким образом, имеется объективная необходимость в расширении возможностей существующих методик диагностики технического состояния РПТ.

Одним из путей решения обозначенной проблемы является добавление в программу диагностирования метода акустической эмиссии (АЭ). Эта идея не нова и в настоящее время даже разработаны и утверждены нормативные документы, регламентирующие применение метода АЭ при диагностировании РПТ [4, 8 - 10]. Но при их реализации мы столкнулись со следующими проблемами: высокое затухание акустических волн в материале, значительная трансформация акустических сигналов при их распространении, малый диапазон изменения нагрузки, а также трудность выбора критериев, классификации и оценки источников АЭ. Из данного перечисления видно, что, по сути, возникают те же самые проблемы, что и при контроле емкостного технологического оборудования, для которого уже разработаны и регламентированы стандартные действия для изучения объекта контроля и внесения корректирующих мероприятий для решения обозначенных проблем [11]. Однако сложная геометрия формы РПТ и сборочные элементы (дисков, лопаток, бандажей и др.) вносят «свою» специфику. На основании проведенного анализа результатов исследования акустических характеристик и АЭ контроля ротора паровой турбины предлагается:

- исследование акустических характеристик проводить четырежды, при этом два раза с излучением тестовых сигналов с наружной и два раза с торцевой поверхностями ротора при перемещении излучателя или преобразователя АЭ: при первом измерении в одну сторону, а при втором в обратном направлении;

- перед экспериментальным измерением скорости распространения акустических волн проводить исследование распространения и трансформации акустических сигналов в теле, отражающем особенности геометрической формы ротора с применением современных методов математического моделирования, например, [12 и др.];

- каждый раз проводить оценку чувствительности АЭ метода к выявляемым дефектам и повышать надежность выявления источников АЭ путем использования при контроле ротора нескольких режимов нагружения.

## Список литературы

1. Белов В.В., Пергаменщик Б.К. Крупные аварии на ТЭС и их влияние на компоновочные решения главных корпусов / Вестник МГСУ, 2013, с. 61-69.
2. РД 153-34.1-17.424-2001 Методические указания по расследованию причин повреждений деталей роторов паровых турбин электростанций.
3. СО 153-34.17.440-2003 Инструкция по продлению срока эксплуатации паровых турбин сверх паркового ресурса.
4. СТО 70238424.27.100.005-2008. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования.
5. Смирнов А.Н., Быкова Н.В., Абабков Н.В., Фенстер Б.Р. Анализ повреждаемости роторов паровых турбин (обзор)/Вестник КГТУ, 2014, 2, с.38-46.
6. Надежность теплоэнергетического оборудования ТЭС и АЭС/ Под ред. А.И. Андрущенко – М.: Высшая школа, 1991, 303 с.
7. Инденбаум В.С., Случаев М.А. Ревизия и ремонт паровых турбин коммунальных электростанций / М.: М-во коммунал. хоз. РСФСР, 1954, 211с.
8. РД 153-34.1-17.457-99. Методические указания по проведению акустико-эмиссионного контроля цельнокатаных роторов паровых турбин ТЭС.
9. СТО ВТИ 17.001–2010. Методика неразрушающего контроля валов роторов среднего и низкого давления без снятия насадных дисков при ремонте оборудования.
10. СТО Мосэнерго 3.3.001-2009. Методика неразрушающего контроля валов роторов среднего и низкого давления без снятия насадных дисков при ремонте оборудования.
11. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
12. Бархатов В.А. Моделирование ультразвуковых волн методом конечных разностей во временной области. Двумерная задача. Оптимальные алгоритмы. Анализ погрешностей. Поглощающие области вблизи границ сетки / Дефектоскопия, 2009, №6, с.58-75.

# ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА СОБЫТИЙ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПО ДАННЫМ ДАТЧИКА ИНТЕГРАЛЬНОЙ АКУСТИКИ

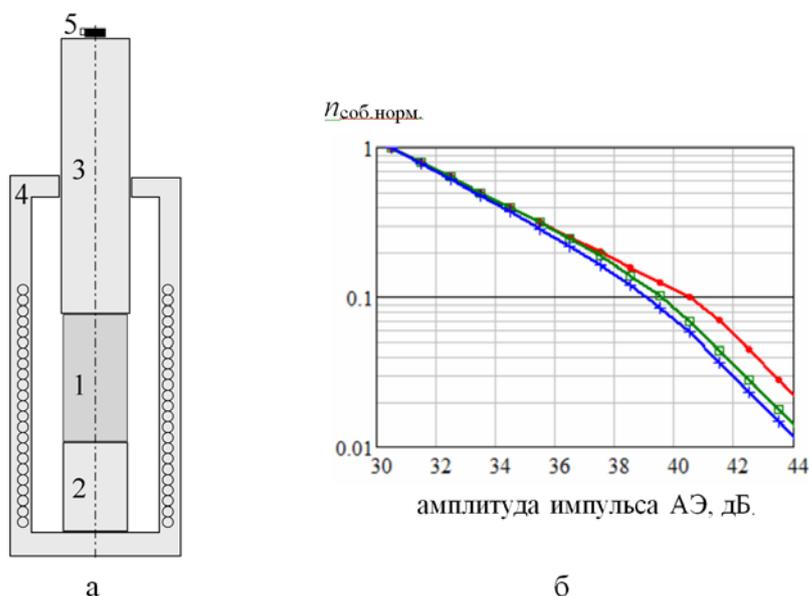
Казначеев П.А.<sup>1</sup>, Майбук З.-Ю.Я.<sup>1</sup>, Пономарев А.В.<sup>1</sup>,  
Смирнов В.Б.<sup>1,2</sup>, Бондаренко Н.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия,  
[p\\_a\\_k@mail.ru](mailto:p_a_k@mail.ru)

<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

В лабораторных исследованиях акустической эмиссии (АЭ) в образцах горных пород иногда используется небольшое число датчиков АЭ, которого недостаточно для локации и определения энергии событий АЭ-актов микроразрушений. С помощью датчиков регистрируются индивидуальные параметры импульсов АЭ, а при анализе определяются статистические параметры потока импульсов, например, распределение числа импульсов АЭ по амплитудам [АЕТest, 2017]. Это распределение, безусловно, связано с распределением событий АЭ в образце по энергиям. Поэтому возникает вопрос: можно ли оценить статистические параметры потока событий ТАЭ по известным статистическим параметрам потока импульсов и каким образом?

В наших исследованиях термостимулированной акустической эмиссии (ТАЭ) используется только один датчик АЭ (датчик интегральной акустики), что обусловлено принципиальным устройством лабораторной установки (рис. 1а).



**Рис. 1.** Схема лабораторной установки по изучению ТАЭ (а) и нормированное теоретическое распределение импульсов ТАЭ по амплитудам при «двухзвенном» распределении событий ТАЭ по энергиям (б). 1 – образец горной породы; 2 – подставка; 3 – акустический волновод; 4 – печь; 5 – пьезоэлектрический датчик АЭ. Красная, зеленая и синяя кривые соответствуют модельному закону распределения при поглощении в породе 0, 100 и 1000 дБ/м

Особенности ТАЭ – это в целом меньший по сравнению с механическими испытаниями уровень интенсивности АЭ и сильное изменение поглощения акустических волн в породах при нагреве. Поэтому перед нами стояли две задачи: определить, как влияет распределение событий АЭ по энергиям на распределение импульсов АЭ по ам-

плитудам с учетом этих особенностей, и предложить способы оценки статистических параметров потока событий по потоку импульсов.

Для определения влияния мы исходили из предположения, что распределение событий ТАЭ по энергиям (закон повторяемости) в образце описывается законом, аналогичным закону Гутенберга-Рихтера в сейсмологии:

$$\log_{10}(N_E) = a - b \cdot \log_{10}(E) \quad (1)$$

где  $N_E$  – число событий с энергиями в интервале  $[E, E+dE]$ ,  $a$  и  $b$  – параметры аппроксимации. Основным интересом представляет значение  $b$  («b-value»,  $b > 0$ ), характеризующее наклон графика повторяемости. При этом предполагается, что график может описываться выражением (1) с постоянными  $a$  и  $b$  на всем интервале энергий («однозвенный» закон) или иметь кусочно-линейный характер, с двумя вариантами значений  $a$  и  $b$  на двух интервалах амплитуд («двухзвенный» характер). Физически второй вариант обоснован наличием аналогии в сейсмологии [Amitrano, 2012] и возможностью существования различных механизмов генерации событий ТАЭ.

Отношение энергии, падающей на датчик АЭ, к энергии события ТАЭ (итоговый коэффициент  $K_{OS}$  "ослабления" энергии события), в децибелах равен:

$$K_{OS} = - K_{OH} - K_{OP} - K_{OP}' - K_{OP}'' \quad (2)$$

где слагаемые в правой части – это коэффициенты ослабления энергии события, соответственно, из-за угла между направлением распространения волны и осью образца ( $K_{OH}$ ), из-за расхождения волны ( $K_{OP}$ ), из-за поглощения волны в образце ( $K_{OP}'$ ), из-за поглощения волны в волноводе ( $K_{OP}''$ ). Ослабление из-за поглощения в породе дает наибольший вклад при реально наблюдаемых значениях удельного коэффициента поглощения 100-1000 дБ/м [Васин, 2006].

Статистическая реализация (моделирование) распределения импульсов ТАЭ по амплитудам показала, что при «однозвенном» законе повторяемости оно имеет тот же наклон. Распределение при «двухзвенном» законе показано на рис. 1б. Для оценки эволюции b-value было предложено оценивать в скользящем временном окне наклон графика распределения импульсов минимум в двух соседних интервалах амплитуд, например, 36-41 дБ и 41-46 дБ. Анализ экспериментальных данных показал интересную особенность – во-первых, определенные таким образом b-value отличаются от b-value на всем интервале амплитуд 36-41 дБ. Во-вторых, оказалось, что в области меньших амплитуд наклон графика повторяемости может быть более крутым, чем в области больших амплитуд (т.е. не «выпуклая», как на рис. 1б, а «вогнутая» кривая). Это обстоятельство показывает необходимость более подробного исследования вопроса.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке совместным российско-индийским проектом РНФ-DST India: грант РНФ № 16-47-02003, грант INT/RUS/RSF/P-13 Департамента науки и технологии Правительства Индии.*

### Список литературы

1. Васин Р.Н., Никитин А.Н., Локаичек Т., Рудаев В. Акустическая эмиссия квазиизотропных образцов горных пород, инициированная температурными градиентами // Физика Земли. 2006. № 10. С. 26-35.
2. AE Test. Сайт о пакете AE Workbench, акустико-эмиссионном методе контроля, программном и аппаратном обеспечении АЭК // Комаров А. – Электрон. дан. – 2017. – URL: <http://www.aetest.ru>. – Дата обращения: 24.12.2017.
3. Amitrano D. Variability in the power-law distributions of rupture events // Eur. Phys. J. Special Topics. 2012. Vol. 205. P. 199-215.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СТРАГИВАНИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПО ПРОГРАММЕ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Горкунов Э.С., Гладковский С.В., Друкаренко Н.А.,  
Каманцев И.С., Худорожкова Ю.В.

*Институт машиноведения УрО РАН,  
г. Екатеринбург, Россия  
[gsv@imach.uran.ru](mailto:gsv@imach.uran.ru)*

Существенной проблемой при оценке статической трещиностойкости конструкционных сталей и сплавов методами механики разрушения в соответствии с требованиями ГОСТ 25.506-85 является определение на экспериментальной диаграмме «нагрузка-раскрытие трещины» величины нагрузки ( $P_c$ ), при которой происходит страгивание трещины. Для малопластичных материалов при выполнении условий плоской деформации разрушение образцов с наведенными усталостными трещинами происходит на линейном участке диаграммы, а нагрузка страгивания трещины соответствует первому хрупкому скачку трещины. В случае более пластичных сталей и сплавов, а также при реализации условий плоского напряженного состояния при испытаниях более тонких образцов нагрузка страгивания трещины происходит в условиях упругопластической деформации, а точка  $P_c$  располагается в нелинейной области диаграммы нагружения. Для определения величины нагрузки  $P_c$ , необходимой для расчета показателей статической трещиностойкости металлов и сплавов ( $K_{Ic}$ ,  $K_C$ ,  $K_{Ic}^J$ ) находят применение различные методы неразрушающего контроля, основанные на выявлении изменений фазового состава, физических свойств и локальной температуры в вершине растущей трещины [1-2].

В связи с этим в работе показана возможность использования метода акустической эмиссии (АЭ) для выявления момента страгивания трещины при испытаниях на статическую трещиностойкость образцов из сталей различного структурного класса. Эффективность применения метода АЭ при испытаниях на трещиностойкость определяется тем, что формирование в вершине усталостной трещины локализованной зоны пластической деформации (ЛЗПД), а также скачкообразный прирост длины усталостной трещины при достижении критической нагрузки  $P_c$  вызывает появление импульсов АЭ. При этом число и интенсивность импульсов характеризуют состояние материала в области предразрушения в вершине трещины.

Определение момента и соответствующей величины нагрузки страгивания трещины и ее сопоставление с сигналами АЭ проведены на примере высокопрочных мартенситно-старяющихся сталей (МСС) ЧС4У и ЭП678, а также двухфазной ( $\gamma+\epsilon$ ) стали 05Г20С2 со структурой метастабильного аустенита. Усталостная трещина на компактных СТ-образцах с концентратором напряжений в виде V-образного надреза из исследуемых марок сталей была выращена с использованием высокочастотной резонансной испытательной машины MIKROTRON (RUMUL). Статическое нагружение образцов с усталостными трещинами производилось на гидравлической испытательной машине Tinius Olsen Super L60 с записью диаграмм нагружения в координатах «нагрузка - раскрытие трещины», по которым рассчитывались значения показателей статической трещиностойкости  $K_{Ic}$  и  $K_C$ . Запись сигналов АЭ производилась с использованием одноканальной системы регистрации сигналов акустической эмиссии AMSY-5, позволяющей регистрировать и анализировать акустические волны, возникающие в конструкционных материалах в процессе их деформации и разрушения.

С целью выявления информативного сигнала АЭ, наиболее полно характеризующим момент хрупкого проскока трещины, были проведены испытания образцов тол-

щиной 12 мм МСС ЧС4У после обработки на максимальную прочность. Это позволило получить корректные значения параметра разрушения  $K_{IC}$  данной стали в условиях плоской деформации. Сопоставление диаграмм нагружения и сигналов АЭ показало однозначное соответствие между параметрами АЭ и моментом срыва максимальной нагрузки. Кроме того, в момент достижения пика на диаграмме нагружения фиксируются сигналы с другими частотными компонентами. После обработки зарегистрированных сигналов АЭ было установлено, что наиболее информативным параметром является показатель RMS (среднеквадратичное значение напряжения на выходе датчика).

При статических испытаниях образцов стали 05Г20С2 толщиной 2,7 мм при комнатной температуре реализуются условия плоского напряженного состояния, что приводит к завышению показателя  $K_c$  по сравнению с истинными значениями трещиностойкости  $K_{Ic}$ , определенными на образцах больших размеров в условиях плоской деформации. Значение статической трещиностойкости при использовании в расчетной формуле нагрузки страгивания трещины, соответствующей максимуму величины сигнала RMS составило  $K_c = 82,4 \text{ МПа м}^{1/2}$ . При этом статическая трещиностойкость стали 05Г20С2 по результатам пересчета экспериментального значения критерия упругопластической механики разрушения  $J_{Ic}$ , полученного на кондиционных образцах толщиной 25 мм, составила величину  $K_{Ic}^J = 80,1 \text{ МПа м}^{1/2}$ .

Таким образом, проведенные испытания выявили высокую эффективность записи сигналов АЭ при испытаниях конструкционных сталей на статическую трещиностойкость в условиях упругопластической деформации. При этом установлено, что наибольшее приближение значений  $K_c$  на образцах малой толщины (2,7 мм) в условиях плоского напряженного состояния к истинным значениям  $K_{Ic}$  стали 05Г20С2 достигается при определении усилия страгивания трещины  $P_Q$  по максимуму сигнала RMS на совмещенной диаграмме «нагрузка-раскрытие трещины-сигналы АЭ».

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ грант №16-08-01077\_а.*

## Список литературы

1. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / Вильдеман В.Э., Третьяков М.П., Третьякова Т.В. и др./под ред. В.Э. Вильдемана. М.: Физматлит. 2012. – 204с.
2. Плехов О.А., Пантелеев И.А., Леонтьев В.А. Особенности выделения тепла и генерации сигналов акустической эмиссии при циклическом деформировании армко-железа // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. № 5. С. 37-43.
3. Гладковский С.В., Каманцев И.С., Владимиров А.П. и др. Комплексное исследование кинетики роста усталостной трещины в двухфазной ( $\gamma+\epsilon$ ) метастабильной Fe-Mn стали // Сварка и диагностика: сб. докл. международного форума (Екатеринбург, 25-27 ноября 2014г.) – Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 240-246.

## АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Сагайдак А.И.

АО «НИЦ» «Строительство», г. Москва, Россия,  
[sagaidak-niizhb@mail.ru](mailto:sagaidak-niizhb@mail.ru)

Бетон является основным строительным материалом, и применение метода АЭ для контроля качества в строительстве открывает широкие возможности для повышения надежности и безопасности зданий и сооружений. В докладе приводятся результаты выполненных работ проведенных в НИИЖБ имени А.А. Гвоздева, г. Москва.

Проведенные исследования на внецентренно сжатых бетонных и железобетонных конструкциях позволили разработать методику по оценке напряженно-деформированного состояния строительных конструкций [1, 2] методом АЭ. По результатам исследований установлено, что метод АЭ позволяет оценить уровни напряжений в бетоне конструкций при ее загрузке в пределах  $0,35 - 0,95 \delta/R$  используя для этого тестовое статическое нагружение величиной  $0,05 \dots 0,1$  от предела прочности бетона. Определены границы применения эффекта Кайзера для внецентренно-сжатых бетонных и железобетонных конструкций. Установлено что в армированном бетоне эффект Кайзера сохраняется устойчиво на более высоком уровне нагружения ( $0,7 \dots 0,9 \delta/R$ ) по сравнению с бетонными образцами, где при превышении уровня  $0,6 \dots 0,7 \delta/R$  существует разброс данных. С повышением прочности бетона конструкции нижняя граница проявления эффекта Кайзера повышается.

Сцепления арматуры с бетоном обеспечивает совместную работу бетона и арматуры и способствует перераспределению усилий в конструкциях при силовых воздействиях. Изучению сцепления арматуры с бетоном посвящено большое количество работ. Такие исследования были проведены и нами при оценке эффективности разработанного в НИИЖБ имени А.А. Гвоздева нового арматурного профиля. Эксперимент проводился с учетом сравнения данных по сцепления арматуры с бетоном арматуры различного профиля, диаметра и класса бетона по прочности на сжатие. Методика испытаний заключалась в вытягивании из бетонного куба арматурного стержня. В ходе эксперимента применялся метод АЭ. По результатам эксперимента была разработана методика оценки качества сцепления арматуры с бетоном. Метод АЭ позволяет с новых позиций оценивать влияние профиля, диаметра арматуры на жесткость сцепления арматуры с бетоном. Локационные возможности метода АЭ представляет данные о характере напряженно-деформированного состояния бетона в приграничной со стержнем области при приложении нагрузки к стержню. [3].

Несущую способность конструкций, имеющих повреждения, можно оценивать методом АЭ с помощью циклических нагружений и мониторинга АЭ активности на этапе нагружения и сброса нагрузки. Влияние повреждений определяют с использованием коэффициентов нагрузки и разгрузки, представляющие собой отношение суммарной активности АЭ на первом цикле нагружения или разгрузки к суммарной активности АЭ на циклах нагрузки-разгрузки. Коэффициент нагрузки основан на положениях эффекта Кайзера, суть которого состоит в том, что при повторном нагружении в конструкции без существенных повреждений сигналы АЭ отсутствуют или их количество значительно меньше, чем на первом цикле нагружения. Таким образом, если коэффициент нагрузки больше 1, это свидетельствует об отсутствии дефектов, если меньше 1 - указывает на наличие повреждений. Для изгибаемых элементов были получены графические материалы, по которым можно оценить влияние повреждений на несущую способность конструкции.

Еще одним практическим применением расширяющим область применения метода АЭ может быть методика оценки качества крепления анкеров, устанавливаемых в

затвердевший бетон и предназначенных для крепления несущих, ограждающих строительных конструкций. [4, 5, 6]. Особенностью методики является возможность прогнозировать предельную несущую способность анкера с использованием метода АЭ при приложении тестовых циклических нагрузок.

Метод АЭ был использован нами по разработке методики прогноза прочности бетона по акустическим характеристикам свежеприготовленной бетонной смеси. По результатам исследований были определены параметры сигналов АЭ позволяющие оперативно (через четыре-пять часов после изготовления бетона) прогнозировать прочность бетона в проектном возрасте. При этом точность прогноза составляла более 90%. [7].

Проведенные исследования и разработанные оригинальные методики позволяют расширить область применения метода АЭ в строительстве. Следующим этапом является разработка нормативных документов по применению метода АЭ для контроля качества в строительстве и мониторинга строительных конструкций.

### Список литературы

1. Применение метода акустической эмиссии для оценки напряженно-деформированного состояния сжатых элементов бетонных и железобетонных конструкций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 /Сагайдак Александр Иванович. М., 1992. - 20 с
2. Сагайдак А.И. Исследование эффекта Кайзера в сжатых железобетонных элементах - Экспериментальные и теоретические исследования строительных конструкций. Сб. научн. тр. ЦНИИСК им. Кучеренко. М.,1990 – 172 с. С 127-129
3. V. Bardakov, A. Sagaidak Testing of reinforcement and concrete bond by the method of acoustic emission Abstract book of World conference on acoustic emission – 2017 Xian, Shanxi, China
4. Сагайдак А.И. Применение метода акустической эмиссии для оценки качества заделки закладных деталей. Бетон и железобетон №5. 1998 г. С 15-16
5. Сагайдак А.И., Крылов С.Б. Способ контроля несущей способности закладных деталей. А.С. России №2147736200
6. Сагайдак А.И. Применение метода акустической эмиссии для диагностики состояния кирпичной кладки - Промышленное и гражданское строительство, №9, 2004 г, С.26-27
7. Бардаков В.В., Сагайдак А.И. Прогнозирование прочности бетона в процессе его твердения при помощи метода акустической эмиссии – Дефектоскопия 2017, №6 С.436-443

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

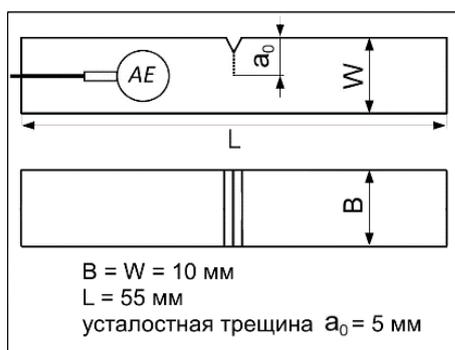
**Кетов В. М., Henschel S., Krüger L.**

*TU Bergakademie Freiberg, 09599 Freiberg, Germany*  
[volodymyr.kietov@iwt.tu-freiberg.de](mailto:volodymyr.kietov@iwt.tu-freiberg.de) / [ketowwladimir@gmail.com](mailto:ketowwladimir@gmail.com)

В ряде работ были исследованы механические свойства чугунов и процессы происходящие при их разрушении, а так же определены значения вязкости разрушения [1–6]. С целью более полного понимания процессов, происходящих при разрушении чугуна, различными авторами проводились измерения акустической эмиссии (АЭ) во время статических и динамических испытаний образцов [7–9]. Источником АЭ в чугунах может служить пластическая деформация металла, образование и рост трещины, хруп-

кое разрушение, повреждение частиц графита либо других неметаллических частиц. Анализ указанных работ показал, что понимание АЭ в процессе деформации и разрушения чугунов не может считаться полным.

Из высокопрочного ферритного чугуна с шаровидным графитом марки GJS-400-15 (содержание перлита >3 %) были изготовлены образцы по Шарпи, рис 1.

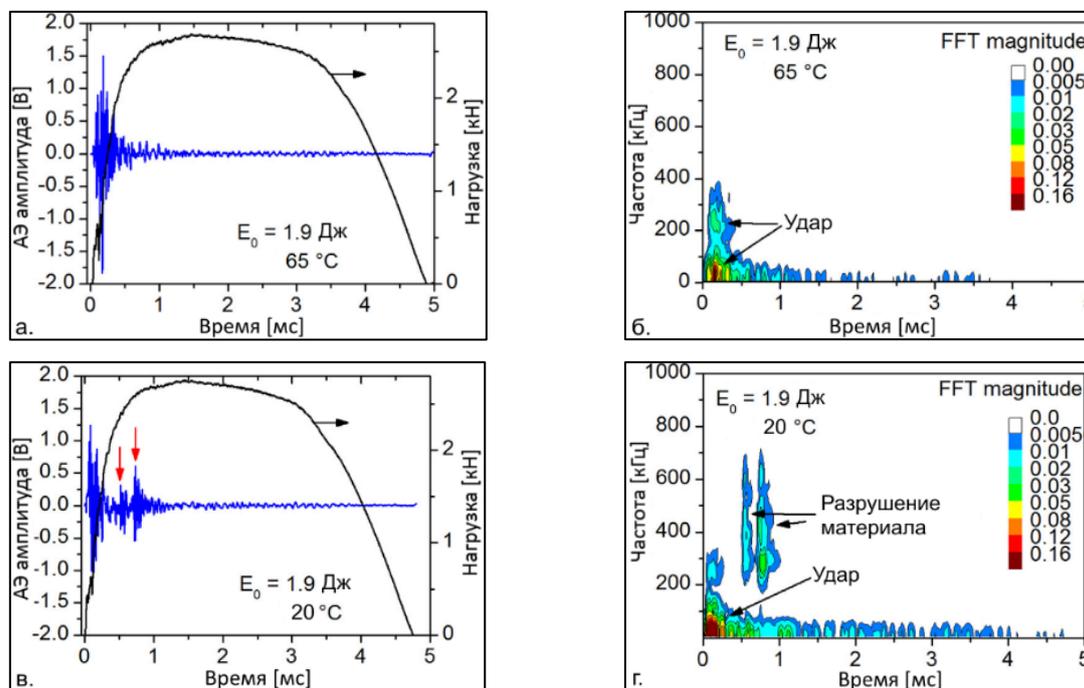


**Рис. 1.** Геометрия образцов и позиция АЭ датчика

Испытания проводились на маятниковом копре с энергиями удара от 0,7 до 3,5 Дж. Акустический датчик PICO (РАС) с предусилителем 40 дБ располагался на расстоянии около 10 мм от остерия трещины. Подробное описание проведенных экспериментов приведено в [10].

Для того чтобы исключить влияние высокоамплитудных сигналов происходящих от хрупкого разрушения, первая серия испытаний была проведена при повышенных температурах: 50 и 65° С. Микроскопическое исследование показало вязкое распространение трещины без признаков хрупкости. Акустический сигнал таких испытаний показан на рис. 2а, б.

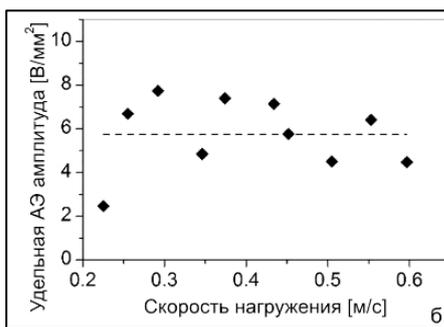
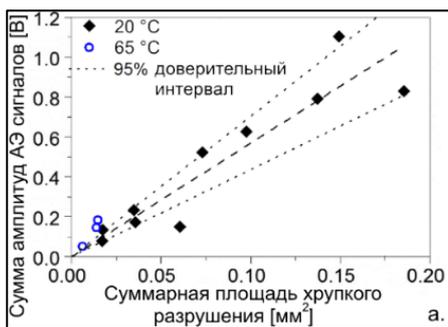
Отчётливо выделяется сигнал в начале испытания, источником которого является удар маятника по образцу. Предполагаемые АЭ сигналы, которые могли бы быть соотнесены с пластической деформацией либо разрушением неметаллических включений и графита, не были зафиксированы (либо были неотличимы от шума). Причиной этого могли послужить частотные характеристики датчика – недостаточная чувствительность в частотном диапазоне 100 – 300 кГц. Фрактограммы образцов испытанных при 20° С показывают наличие хрупких участков. В соответствии с этим, АЭ сигнал содержит высокочастотные компоненты, рис. 2в, г.



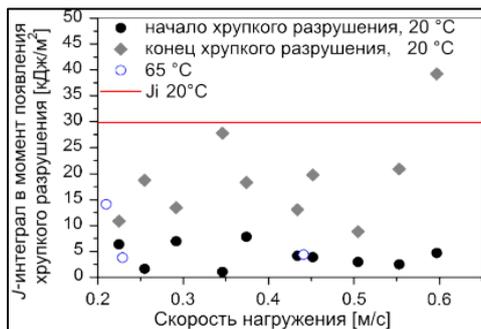
**Рис. 2.** Диаграмма изменения нагрузки и акустический сигнал: а, б: температура 65° С, энергия удара – 1,9 Дж; в, г: температура 20° С, энергия удара – 1,9 Дж.

Была выявлена корреляция между суммарной площадью хрупких участков и суммарной энергией акустических сигналов. Данные представлены на рис. 3а. Так же бы-

ло установлено, что удельная АЭ энергия, приходящаяся на  $1 \text{ мм}^2$  площади хрупкого разрушения, не зависит от скорости нагружения в исследованных пределах, рис. 3б.



**Рис. 3.** а: зависимость эмитированной акустической энергии от площади образовавшегося хрупкого разрушения; б: зависимость удельной АЭ энергии от скорости нагружения



**Рис. 4.** Появление хрупкого разрушения

На основе проведенных экспериментов были получены численные значения вязкости разрушения исследуемого материала. Значения  $J_d$  рассчитывались согласно ASTM E 1820. Значения вязкости разрушения были получены линейной аппроксимацией  $R$ -кривой в точку  $\Delta a = 0$  и составили  $J_i = 30 \text{ кДж/м}^2$ .

Измерения АЭ выявили характерную особенность поведения исследуемого материала: локальные хрупкие повреждения начинают происходить гораздо раньше, чем нагрузки достигнут критической энергии инициации трещины  $J_i$ , посчитанной согласно стандартной методике, Рис. 4.

Результаты представленной работы подробно изложены в [10].

Результаты представленной работы подробно изложены в [10].

1. Pusch G, Henkel S, Biermann H, Hübner P, Ludwig A, Trubitz P et al. Determination of fracture mechanics parameters for cast iron materials under static, dynamic and cyclic loading. In: Hütter G, Zybell L, editors. Recent trends in fracture and damage mechanics. Cham: Springer; 2016, p. 159–196.
2. Baer W, Wossidlo P, Abbasi B, Cassau M, Häcker R, Kossert R. Large scale testing and statistical analysis of dynamic fracture toughness of ductile cast iron. Eng. Fract. Mech. 2009;76(8):1024–36.
3. Hütter G, Zybell L, Kuna M. Micromechanisms of fracture in nodular cast iron: From experimental findings towards modeling strategies – A review. Eng. Fract. Mech. 2015;144:118–41.
4. Hütter G, Zybell L, Kuna M. Micromechanical modeling of crack propagation in nodular cast iron with competing ductile and cleavage failure. Eng. Fract. Mech. 2015;147:388–97.
5. Berdin C, Dong MJ, Prioul C. Local approach of damage and fracture toughness for nodular cast iron. Eng. Fract. Mech. 2001;68(9):1107–17.
6. Nilsson K-F, Blagoeva D, Moretto P. An experimental and numerical analysis to correlate variation in ductility to defects and microstructure in ductile cast iron components. Eng. Fract. Mech. 2006;73(9):1133–57.
7. Kobayashi T, Yamada S. Evaluation of static and dynamic fracture toughness in ductile cast iron. Metall. Mater. Trans. A 1994;25(11):2427–36.
8. Sjögren T, Svensson IL. Studying elastic deformation behaviour of cast irons by acoustic emission. Int. J. Cast Metal. Res. 2013;18(4):249–56.
9. Carpenter SH, Zhu Z. Correlation of the acoustic emission and the fracture toughness of ductile nodular cast iron. J. Mater. Sci. 1991;26(8):2057–62.
10. Kietov V, Henschel S, Krüger L. Study of dynamic crack formation in nodular cast iron using the acoustic emission technique. Eng. Fract. Mech. 2018;188:58–69.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ГИДРИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТИТАНА, МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

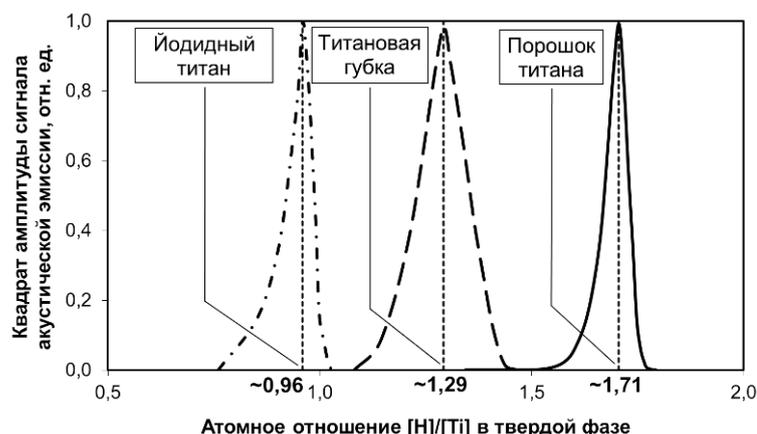
Кузнецов А.А., Кунавин С.М., Бережко П.Г., Жилкин Е.В., Царев М.В., Ярошенко В.В., Мокрушин В.В., Юнчина О.Ю., Митяшин С.А.

*«Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», г. Саров Нижегородской обл., Россия*

[tsarev@dep19.vniief.ru](mailto:tsarev@dep19.vniief.ru)

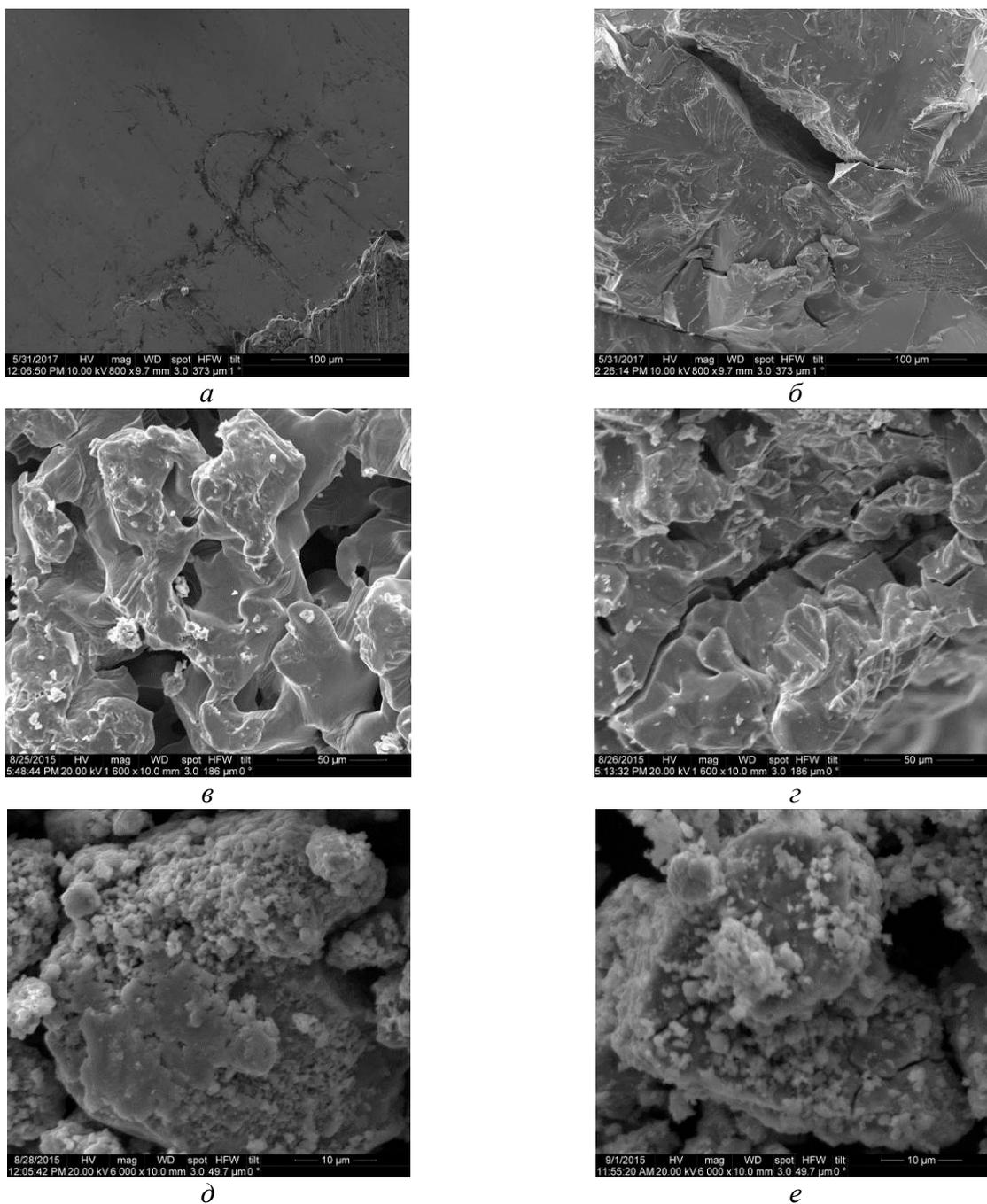
В работе исследованы изменения, происходящие с образцами металлического титана при гидрировании, которые сопровождаются возникновением сигналов акустической эмиссии высокой амплитуды (см., напр., [1-6]). Объектами исследования являлись образцы титана, находящегося в различном исходном состоянии: в виде крупных кусков йодидного титана размером  $\sim 20$  мм; в виде титановой губки с характерным размером кусков  $\sim 10$  мм и в виде мелкодисперсного порошка, изготовленного из этой губки, размер частиц которого составлял менее  $\sim 40$  мкм. В работе исследовалась кинетика взаимодействия указанных материалов с водородом, регистрировались сигналы акустической эмиссии, сопровождающие процесс гидрирования, а также исследовалась структура образцов до и после гидрирования с помощью электронного микроскопа.

Обработка полученных данных позволила получить зависимости квадрата амплитуды сигнала акустической эмиссии от величины атомного отношения  $[H]/[Ti]$  в твердой фазе, приведенные на рис. 1. Эти зависимости свидетельствуют, что выраженную акустическую активность, заметно превышающую уровень фонового сигнала, все исследуемые образцы проявляли не на начальной стадии реакции, а только при достижении некоторой степени насыщения титана водородом. При этом во всех опытах максимальное значение квадрата амплитуды сигнала акустической эмиссии для йодидного титана достигалось при меньшем отношении  $[H]/[Ti]$  по сравнению с титановой губкой, и, тем более, порошком титана.



**Рис. 1.** Характерные зависимости квадрата амплитуды сигнала акустической эмиссии от величины атомного отношения  $[H]/[Ti]$  в твердой фазе при гидрировании йодидного титана, титановой губки и полученного из нее порошка

Анализ электронно-микроскопических изображений исследуемых образцов позволил заключить, что наиболее вероятной причиной возникновения акустических сигналов высокой амплитуды является образование трещин в гидрируемых образцах вследствие нарастания внутренних напряжений, вызванных структурными изменениями в материале. При этом полученные результаты свидетельствуют, что характерные размеры образующихся трещин сопоставимы с характерными размерами частиц гидрируемых образцов (рис. 2).



**Рис. 2.** Характерные электронно-микроскопические изображения йодидного титана (*а, б*), титановой губки (*в, г*) и полученного из нее порошка (*д, е*) до и после гидрирования соответственно

### Список литературы

1. Hiroshi I. et al. J. Alloys Compd. 2007; 446–447: 681-686.
2. Didier-Laurent S. et al. Power Sources. 2008; 179 (1): 412-416.
3. Etiemble A. et al. Int. J. Hydrogen Energy. 2014; 39 (19), 10169-10174.
4. Merson E. et al. J. Alloys Compd. 2015; 645: 460-463.
5. Yiliang Y. et al. Mater. Sci. Eng., A. 2016; 655: 277-282.
6. Kuznetsov A. et al. Int. J. Hydrogen Energy. 2017; (42): 22628-22632.

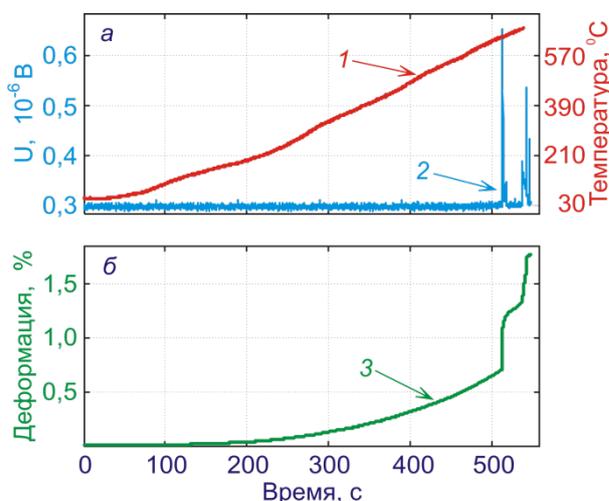
# МЕХАНИЗМЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Плотников В.А., Макаров С.В.

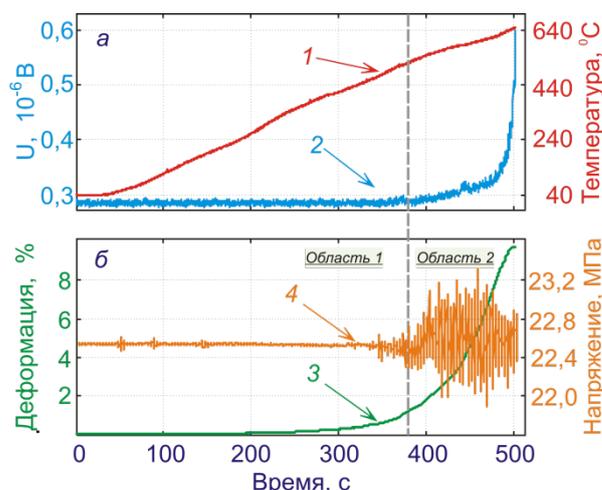
Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия  
[plotnikov@phys.asu.ru](mailto:plotnikov@phys.asu.ru)

Для изучения дислокационных механизмов акустической эмиссии необходимо от жесткой (традиционной  $\sigma$ - $\epsilon$ ) схемы нагружения деформируемого материала переходить к мягкой схеме нагружения. Такой переход обусловлен особенностью протекания элементарных дислокационных процессов в ходе деформирования. Если деформационный процесс осуществляется в условиях жесткой схемы нагружения, то наряду с дислокациями, осуществляющими элементарный сдвиг наблюдаются дислокации, накапливающиеся в структуре деформируемого материала и определяющие упрочнение. В условиях мягкой схемы нагружения накопление деформации осуществляется дислокациями, выходящими на поверхность, накопления дислокаций не наблюдается, особенно в ходе деформирования при высоких температурах, когда наблюдается динамический возврат.

Характерной особенностью накопления деформации в ходе нагрева нагруженного образца (рис.1) является двойственный характер деформации – монотонный при низких температурах и скачкообразный при высоких. Монотонное накопление деформации сопровождается монотонной акустической эмиссией, деформационным скачкам соответствуют высокоамплитудные акустические сигналы.



**Рис. 1.** Высокоамплитудные импульсы акустической эмиссии (а) и скачкообразный характер накопления деформации (б) в алюминии при механическом напряжении вблизи предела текучести в неизотермическом цикле. 1 – температурная кривая, 2 – зависимость среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии от времени, 3 – деформационная зависимость.



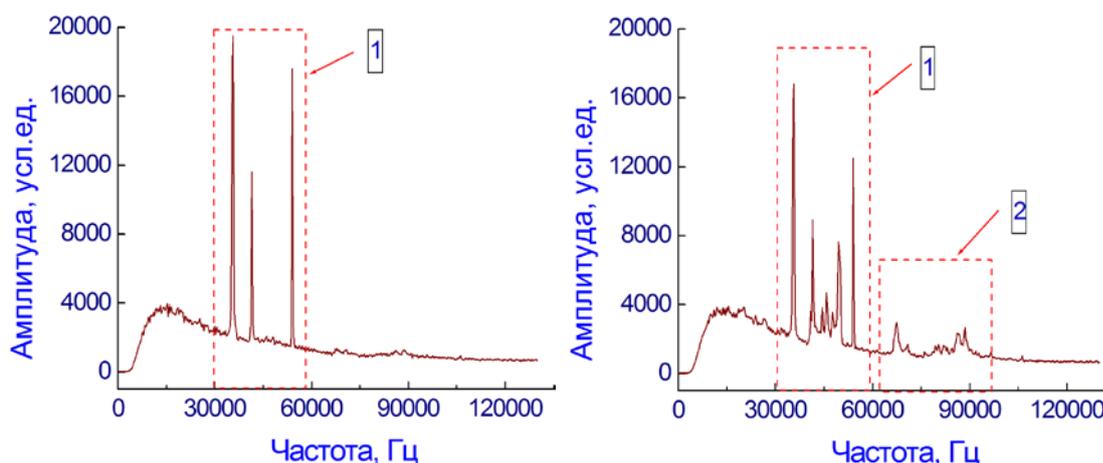
**Рис. 2.** Квазискачкообразный характер накопления деформации в алюминии (б) и формирование высокоамплитудного пика среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии (а) при механическом напряжении около предела текучести в неизотермическом термомеханическом цикле для алюминия. 1, 2, 3 – аналогично рис. 1, 4 – механическое напряжение в цикле.

Таким образом, можно выделить низкотемпературную (область 1) и высокотемпературную (область 2) накопления деформации и соответственно две области акустической эмиссии. На монотонных участках (низкая скорость накопления деформации)

накопление деформации контролируется термически активированным переползанием дислокаций, в момент деформационного скачка (скорость накопления деформации высокая) накопление деформации происходит за счёт процесса зернограничного проскальзывания, осуществляемого путём скольжения зернограничных дислокаций к тройным стыкам.

При напряжении около предела текучести (рис. 2) характер накопления деформации меняется. Наблюдается квазимонотонный характер накопления деформации как в области 1, так и в области 2. Однако в области 2 наблюдается осцилляции механического напряжения, свидетельствующие о квазипериодичности процессов упрочнения и разупрочнения скачкообразном накоплении деформации, отдельные скачки которой не разрешаются измерительной системой. Акустическая эмиссия в области 2 представляет собой акустический пик. Резкое возрастание среднеквадратичного напряжения в высокотемпературной области (область 2) свидетельствует с одной стороны о существенном увеличении колебательной энергии акустической эмиссии в деформируемом объёме образца, с другой – о корреляции между макроскопическими скачками деформации и высокоамплитудной акустической эмиссией.

Для установлении этой связи необходимо анализировать спектральный состав акустической эмиссии. На рис. 3 приведены спектр акустической эмиссии, фиксируемый в ходе монотонного накопления деформации, и спектр – в ходе скачкообразного накопления деформации.



**Рис. 3.** Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии, соответствующая монотонному (1) и скачкообразному (2) накоплению деформации при нагреве нагруженного образца

Характерной особенностью спектра сигналов акустической эмиссии является дискретный характер спектральной плотности в низкочастотной (ниже 100 кГц) области и перераспределение спектральной плотности в частотную область 60 – 95 кГц в ходе скачкообразного накопления деформации. Дискретный характер спектральной плотности сигналов акустической эмиссии свидетельствует, что наша система образец – волновод представляет собой систему резонаторов, распределяющих колебательную энергию первичных элементарных излучателей акустической эмиссии по нашим спектральным диапазонам. Указанный диапазон 60 – 95 кГц соответствует геометрии резонатора с линейным размером 30 мм. Этот резонатор и представляет собой деформируемый объём образца, в котором формируются стоячие продольные и поперечные волны. Размер резонатора определяют набор длин волн исходя из условия стоячей волны  $L = k\lambda/2$ . Здесь  $L$  – геометрический размер резонатора,  $\lambda$  – длина волны,  $k$  – номер резонанса, соответственно при  $k = 1$  длина волны соответствует первому (основному) резонансу.

Именно стоячие волны осуществляют синхронизацию элементарных деформационных актов в ходе деформационного скачка. То есть деформационный скачек есть результат совместного действия термических флуктуаций, механических напряжений, определяющих величину статических смещений атомов, и колебательной энергии акустической эмиссии, определяющей величину динамических смещений атомов в элементарном деформационном акте.

Таким образом, представленные спектры акустической эмиссии являются вторичным эффектом по отношению к первичному акустическому сигналу. Эти вторичные акустические эффекты представляют собой поле стоячих акустических волн, сформированных первичными сигналами акустической эмиссии на естественных резонаторах системы образец-волновод. Первичным источником акустической эмиссии является выход на поверхность ансамбля дислокаций одной системы скольжения, формирующей одну полосу деформации.

## ОЦЕНКА КРИТИЧНОСТИ СОСТОЯНИЯ ДЕФОРМИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ

Дамаскинская<sup>1</sup> Е.Е., Пантелеев<sup>2</sup> И.А., Гафурова<sup>3</sup> Д.Р., Фролов<sup>1</sup> Д.И.,  
Гиляров<sup>1</sup> В.Л.

<sup>1</sup> *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,  
Санкт-Петербург, Россия*

<sup>2</sup> *Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН,  
Пермь, Россия*

<sup>3</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия*

[Kat.Dama@mail.ioffe.ru](mailto:Kat.Dama@mail.ioffe.ru)

Для прогнозирования развития процесса разрушения и оценки степени критичности состояния деформированных материалов необходимо понять физические причины, вызывающие качественный переход от стадии дисперсного (стабильного) накопления повреждений к критической (или опасной) стадии, и найти критерий этого перехода.

В работе проведены прямые исследования накопления дефектов на разных этапах деформирования гетерогенного материала (гранита) с помощью двух неразрушающих методов: акустической эмиссии (АЭ) и рентгеновской компьютерной микротомографии (КТ).

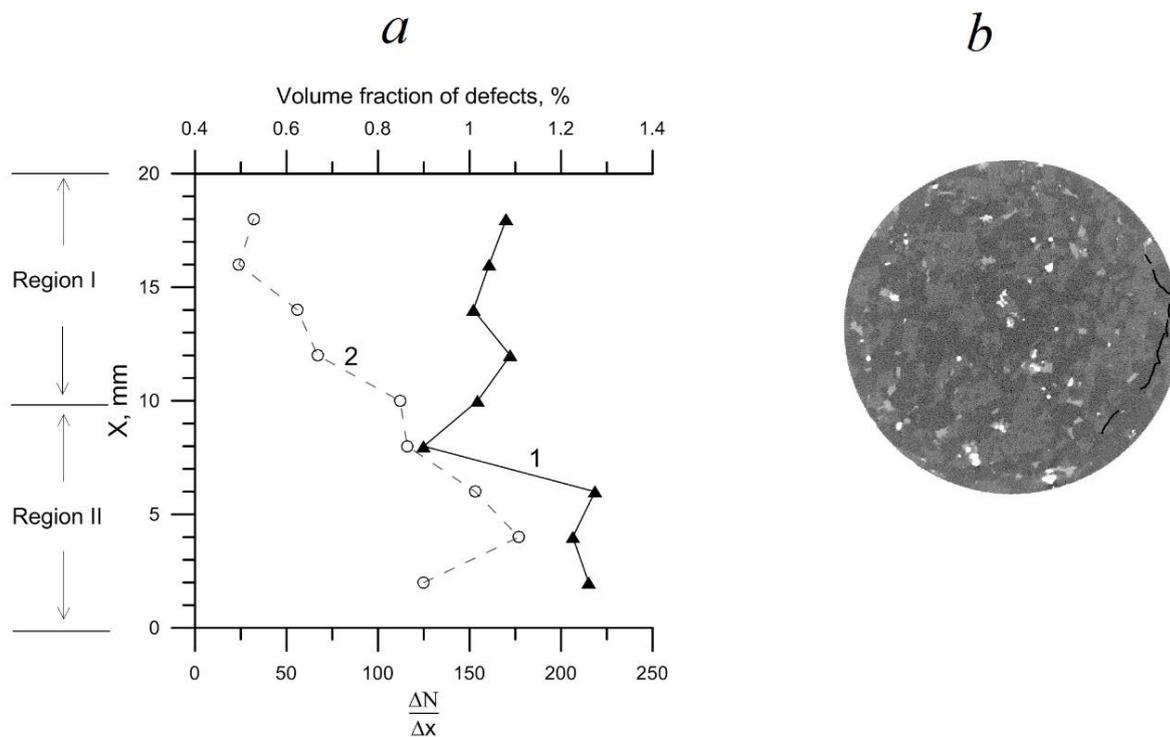
Исследование дефектной структуры образцов горных пород методом рентгеновской микротомографии до и после механических испытаний проводилось с помощью томографа ScyScan 1172 (Bruker, Belgium). Пространственное разрешение томографических изображений составило ~3 мкм.

Квазистатические испытания цилиндрических образцов (d=10 mm, h=20 mm) гранита Westerly проводились в условиях одноосного сжатия на электромеханической испытательной машине Shimadzu AGX-Plus. Для мониторинга акустической эмиссии в режиме real-time в процессе деформирования был использован аппаратный комплекс Amsy-5 Vallen System. Два широкополосных пьезопреобразователя акустической эмиссии AE105A с полосой 450-1150 kHz крепились к торцам образца, что позволило осуществить линейную локацию источников сигналов АЭ. В процессе эксперимента формировалась база данных, в которой записаны параметры отдельных сигналов АЭ - вре-

излучения, координата источника и энергия. Точность определения координат источников сигналов АЭ  $\sim 2$  mm.

Образцы гранита деформировали поэтапно. После каждого этапа образец разгружался и выполнялась томографическая съемка. Для каждого из 11 исследованных образцов было проведено 11 этапов нагружения и томографической съемки. В каждом из образцов удается выделить область, в которой распределение числа сигналов АЭ по энергии аппроксимируется степенной функцией. В этой области наблюдается повышенная концентрация источников сигналов АЭ (Region II на рис.1). Компьютерная томография показывает, что в данной области объемная доля дефектов выше, чем в остальном объеме. В то же время, в других частях образца энергетическое распределение сигналов АЭ можно аппроксимировать экспоненциальной функцией.

Установлено, что анализ функционального вида (степенной или экспоненциальной) энергетических распределений АЭ-сигналов позволяет выделить область образца, в которой система дефектов перешла в состояние самоорганизованной критичности и образовались крупные трещины. Этот результат согласуется с данными рентгеновской томографии.



**Рис.1.** Последняя стадия деформирования. Распределение объемной доли дефектов (кривая 1) и числа сигналов АЭ (кривая 2) вдоль высоты образца (а); пример томографического среза (b), на котором черная линия – образовавшаяся трещина.

Таким образом, форма энергетического распределения сигналов АЭ может использоваться как индикатор текущего состояния деформированного материала и критерий перехода к критическому этапу разрушения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты 16-05-00237, 17-05-00720).*

# АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СВИНЦА

Салита Д.С.<sup>1</sup>, Поляков В.В.<sup>1,2</sup>, Егоров А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия,

<sup>2</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

[pvv@asu.ru](mailto:pvv@asu.ru)

Изучение закономерностей акустической эмиссии в свинцовых сплавах представляет существенный интерес в связи с тем, что низкая температура плавления этих материалов обеспечивают формирование при комнатных температурах механизмов пластической деформации и разрушения, возникающих в большинстве металлов и сплавов при достаточно высокой температуре. Это обстоятельство делает свинцовые сплавы удобным модельным объектом для исследования закономерностей акустической эмиссии.

В настоящей работе использовались образцы свинцового сплава с различной структурой, которая задавалась за счет изменения термических условий при рекристаллизации из расплава. Химический состав сплава контролировался с помощью рентгенофлуоресцентной спектроскопии и характеризовался высоким процентным содержанием легирующих добавок (Pb – 89,1%, Sb – 5,1%, Cd – 3,2, Ga – 3,2%, Cu – 0,3%, Fe – 0,3%). Легирующие добавки обеспечивали рост механических свойств и расширяли области практического использования материала. Испытания проводились для отдельных групп образцов с разными средними размерами кристаллитов  $R$ , от относительно малых значений  $R \sim 0,1 \dots 1$  мм до крупных зерен с  $R \sim 5 \dots 10$  мм. Образцы подвергались растяжению на установке механических испытаний с регистрацией приложенной нагрузки и степени деформации, одновременно проводились измерения среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии  $U$  [1, 2].

Кривые нагружения свинцовых сплавов с разной структурой имели качественно одинаковый вид, на них можно было выделить две стадии с разными значениями коэффициента деформационного упрочнения. Типичные результаты измерений характеристик акустической эмиссии  $U$  в зависимости от времени нагружения  $t$  приведены на рис. 1.

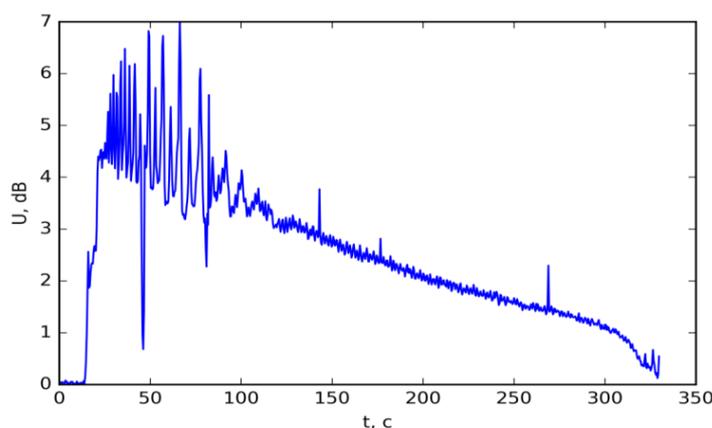


Рис. 1. Акустическая эмиссия в свинцовом сплаве

Из рисунка видно, что для кривых  $U(t)$  выделялись максимумы на участке, соответствующем пределу текучести, далее кривые монотонно спадали. Было выявлено существенное влияние структуры материала на вид акустико-эмиссионных сигналов. В случае крупнозернистого сплава наблюдалась группа мощных максимумов, медленно спадавших с ростом деформации. В случае мелкозернистого сплава максимумы были

выражены более слабо, при росте деформации они быстро исчезали. Выявленное различие может быть обусловлено изменением вклада зернограничного проскальзывания в деформацию свинцового сплава [3]. Именно, если максимумы акустической эмиссии связаны с выходом на границы раздела зернограничных дислокаций, то в случае мелких зерен движение этих дислокаций затруднено из-за высокой плотности тройных стыков и, как следствие, максимумы акустической эмиссии малы. Аналогично для крупных зерен плотность тройных стыков меньше и движение зернограничных дислокаций сопровождается более мощным акустическим излучением.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00914.*

### **Список литературы**

1. Поляков В.В., Егоров А.В., Свистун И.Н. Исследование особенностей акустической эмиссии при пластической деформации и разрушении пористых металлов. Дефектоскопия. 2001. №9. С. 69-72.
2. Салита Д.С., Поляков В.В. Влияние структуры свинцового сплава на акустическую эмиссию при пластической деформации и разрушении. Известия АлтГУ. 2017. №1. С. 54-57.
3. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Елсукова Т.Ф. Физическая мезомеханика зернограничного скольжения в деформируемом поликристалл. Физическая мезомеханика. 2011. Т.14. С.15-22.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАДИЙ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ**

**Дмитриев А.А.<sup>1</sup>, Поляков В.В.<sup>1,2</sup>, Лепендин А.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия,*

<sup>2</sup> *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,*

*г. Томск, Россия*

[pvv@asu.ru](mailto:pvv@asu.ru)

Сигналы акустической эмиссии, формирующиеся в процессах пластической деформации и разрушения материалов, отражают вклады различных механизмов и источников излучения, действующих на разных стадиях деформационного упрочнения. В силу сложности формирующихся сигналов физическая интерпретация этих процессов непосредственно по акустико-эмиссионным данным достаточно затруднительна. Это обстоятельство делает актуальным использование новых релевантных параметров акустической эмиссии. В настоящей работе в качестве таких параметров использовались коэффициенты многоуровневых дискретных вейвлет-преобразований, которые описывали энергетические и частотные особенности регистрировавшихся акустико-эмиссионных сигналов.

Экспериментальные исследования проводились для алюминиевого сплава АМг5м, широко используемого в современном авиастроении [1, 2]. Образцы сплава подвергались одноосному статическому растяжению вплоть до разрушения по «жесткой» схеме нагружения с постоянной скоростью деформирования. По измерившимся

механическим характеристикам рассчитывались кривые деформационного упрочнения  $\sigma(\epsilon)$  в истинных координатах. По поведению коэффициента деформационного упрочнения  $K(\epsilon)$  выделялись стадия линейного упрочнения I, две стадии параболического упрочнения II и III и стадия предразрушения IV. Стадии I и II отличались равномерной пластической деформацией, на стадии III проявлялось явление прерывистой текучести и происходила локализация деформации в полосах Портевена – Ле Шателье [3], на стадии IV к этому явлению добавлялось трещинообразование.

Наряду с механическими характеристиками измерялись среднеквадратичное напряжение  $U$  и скорость счета  $\dot{N}$  акустической эмиссии. Акустико-эмиссионные сигналы регистрировались в частотном интервале от 50 до 700 кГц. Экспериментальные результаты анализировались в виде зависимостей величин  $U$  и  $\dot{N}$  от деформации  $\epsilon$ . Измерения показали, что на стадии I формировался пик акустической эмиссии, который сменялся высокоамплитудными осцилляциями на стадии II и далее, в областях прерывистой текучести III и IV, всплесками сигналов разной амплитуды.

Для обработки экспериментальных данных весь акустико-эмиссионный сигнал разбивался на отдельные временные блоки, к каждому из которых применялось дискретное вейвлет-преобразование [4]. Непосредственно при обработке сигналов привлекалось 9-уровневое вейвлет-разложение Добеши. Коэффициенты вейвлет-разложения использовались в качестве новых информативных параметров акустической эмиссии, по которым строились низкочастотные огибающие для каждого из временных блоков регистрируемого сигнала. Связь полученных характеристик со стадиями деформационного упрочнения выявлялась с помощью метода главных компонент [5]. При таком описании экспериментальные характеристики отдельных блоков сигнала выступали в качестве точек многомерного пространства, при этом точки, относившиеся к блокам с близкими свойствами, располагались вблизи друг от друга и образовывали кластеры. Проведенная обработка показала, что использование в качестве релевантных характеристик акустической эмиссии коэффициентов многоуровневых дискретных вейвлет-преобразований позволило установить связь между видом акустико-эмиссионных сигналов и соответствующей стадией деформационного упрочнения.

Развитый подход может быть применен при акустико-эмиссионной диагностике процессов пластической деформации и разрушения в алюминиевых сплавах.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00914.*

### **Список литературы**

1. Дмитриев А.А., Поляков В.В., Лепендин А.А. Исследование пластической деформации алюминиевых сплавов с использованием вейвлет-преобразований сигналов акустической эмиссии. Письма о материалах. 2018. Т. 8. Вып. 1.
2. Дмитриев А.А., Поляков В.В., Колубаев Е.А. Диагностика алюминиевых сплавов со сварными соединениями на основе анализа сигналов акустической эмиссии. Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2017. Т.14. №4.
3. Криштал М.М. Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации. Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7, № 5.
4. S.A. Mallat. Wavelet Tour of Signal Processing. Academic Press, 2009.
5. Егоров А.В., Поляков В.В. Применение метода главных компонент при вихретоковом контроле алюминиевых сплавов. Дефектоскопия. 2015. №10.

## СПОСОБ КОНТРОЛЯ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ПОДШИПНИКОВ И УСТРОЙСТВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Петерсен Т.Б., Самохвалов А.Б., Черниговский В.Ю.,  
Курносков Д.А.

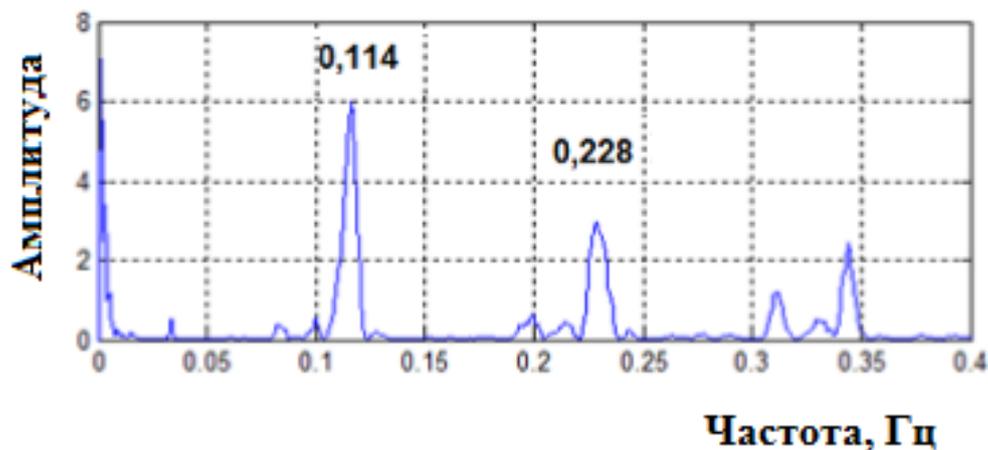
ООО «ДИАПАК», Москва, Российская Федерация,  
[tpetersen@diapac.ru](mailto:tpetersen@diapac.ru)

Основные трудности при проведении непрерывного АЭ мониторинга целостности объектов химической и нефтехимической промышленности связаны с высоким уровнем и нестационарным характером технологических шумов, а также механических шумов, создаваемых компонентами вспомогательных механизмов [2-3]. С другой стороны, большая статистика данных и цикличность режимов работы объекта обеспечивают принципиальную возможность классификации источников АЭ в условиях сильной изменчивости АЭ образов, обусловленной, в частности, влиянием геометрии объекта и эффектами распространения акустических волн [2].

С учетом вышесказанного, наша стратегия проведения мониторинга химических реакторов основывалась на регистрации и записи максимально возможного количества информации, включая АЭ данные, технологические параметры (давление, температура, скорость потока среды и другие), а также сведения о происходящих физических событиях и режимах работы объекта. Один из способов борьбы с нестационарными шумами включал применение плавающих порогов. Кроме потоков сигналов и оцифрованных форм сигналов, превышающих пороги, непрерывно регистрировали акустические шумы. Длина записи оцифрованного сигнала, которая, как правило, не превышает  $1K=1024$  точек, была установлена равной  $4K$ . Большой размер выборки, многократные срабатывания типичных акустических источников, а также использование исторических данных позволили повысить достоверность результатов обработки. Обработка данных включала в себя использование методов анализа временных рядов сигналов и оцифрованных форм сигналов [1].

Было установлено, что наибольшие риски отказа работоспособности реакторов связаны с критичностью вспомогательного динамического оборудования, входящего в состав реакторов. В связи с тем, что методы анализа вибраций практически не пригодны для случаев низких оборотных скоростей вращающегося оборудования (в данном случае 15 об/мин), встала задача контроля средствами АЭ не только реактора, но также динамических устройств. В рамках данной задачи был предложен способ сбора и обработки данных, который позволил оценивать работоспособность устройств, в частности, оснащенного лопастями вала и подшипников с учетом различных сценариев снижения их работоспособности и отказов, включая биения, повышенное трение и разрушения [4].

Новизна данного способа заключается в том, что низкие частоты (0,01 – 2 Гц), связанные с вращением оборудования, извлекают из модулированного высокочастотного шума, зарегистрированного АЭ системой, непосредственно в режиме реального времени. Другая опция предлагаемого способа акустического контроля связана с возможностью обнаружения аномального шума подшипника, вызванного недостатком смазки в системе подшипника. Своевременное обнаружение и сигнализация о проблемах, связанных с техническим обслуживанием системы, позволяют предотвращать избыточное трение и износ оборудования, предупреждать значительные затраты при замене узлов и агрегатов и продлевать срок службы компонентов системы.



**Рис. 1.** Спектральные пики детектированного шума, возникшие на основной частоте  $F = 0,114$  Гц разрушения сепаратора подшипника

Кроме описанных дополнительных возможностей в рамках АЭМ производился традиционный контроль целостности объектов, при этом использовались энергетические, динамические и концентрационные АЭ показатели и критерии, адаптированные в процессе эксплуатации для конкретных объектов контроля.

#### **Выводы**

Предложен и апробирован способ, в котором низкочастотная шумовая акустическая диагностика и высокочастотный АЭ контроль осуществляются одновременно, с использованием одних и тех же каналов сбора данных. Практические результаты, полученные при эксплуатации, показывают эффективность и перспективы такого комплексного способа акустического контроля для мониторинга состояния и целостности ОПО и вспомогательных устройств.

#### **Список литературы**

1. E.C. Ifeachor and B.W.Jervis, Digital signal processing. A practical approach.// Second Edition, Sheffield Hallam University, 2004, 989 p.
2. Петерсен Т.Б., Шемякин В.В., Черниговский В.Ю. Обработка и анализ данных АЭ мониторинга в условиях высоких шумов. // Ронкд 15, секция 09, Доклады конференции, Москва 2014
3. T.B. Petersen , V.V. Shemyakin , V. Chernigovsky. Noise diagnostics at AE monitoring of hazardous industrial assets. //Advances in Acoustic Emission.Technology: Springer Science+Business Media New York, 2015, pp.93-102.
4. T.B. Petersen, V.V. Shemyakin, A.B. Samokhvalov ,V. Chernigovsky.
5. The advanced acoustic emission technique for condition monitoring of industrial facilities. // 1st
6. World Congress on Condition Monitoring-WCCM 2017WCCM 2017 , S.3E, № 213, London 2017.

## ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ТРЕНИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ПО МАГИСТРАЛЬНЫМ НЕФТЕГАЗОПРОВОДАМ СКРЕБКОВ И ПОРШНЕЙ

Лапшин Б.М., Овчинников А.Л.

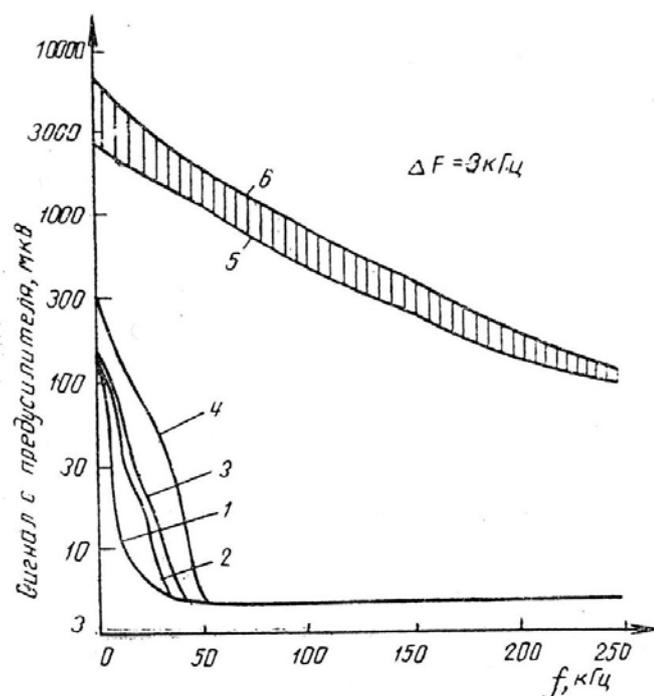
ООО «Фонон», г. Томск, Россия,  
[fonon@bk.ru](mailto:fonon@bk.ru)

Российский государственный стандарт «Акустическая эмиссия» разделяет акустическую эмиссию на акустическую эмиссию материала, вызванную динамической локальной перестройкой его структуры и акустическую эмиссию трения, вызванную трением поверхностей твердых тел. Как правило, акустическая эмиссия трения рассматривается как фактор, мешающий исследованию акустической эмиссии материалов, и основная задача при этом ставится таким образом, чтобы отделить акустическую эмиссию материалов от акустической эмиссии трения и по возможности исключить последнюю. Нами была поставлена обратная задача – использовать акустическую эмиссию (АЭ) трения для контроля прохождения различного рода объектов перемещаемых перекачиваемыми продуктами внутри трубопровода. Такими объектами могут быть, очистные скребки, поршни, герметизаторы, снаряды-калибры и диагностические устройства.

На первом этапе экспериментов на лабораторной установке исследовались характеристики АЭ трения. Применялись образцы, изготовленные из материалов, применяемых на практике: полиуретана, полиэтилена высокого давления и маслостойкой резины. Использовался также образец в виде металлической щетки. Стенд позволял имитировать как сухое так и мокрое трение образца о стенку трубы. Основные результаты этих исследований следующие:

- любое перемещение средств очистки и диагностики по трубопроводу вызывает возникновение сигналов АЭ
- частотный спектр АЭ трения при движении по трубопроводу простирается от нуля до 500 кГц
- увеличение скорости перемещения приводит к увеличению уровня сигнала по всему частотному спектру как в отсутствие, так и при наличии жидкости в трубопроводе;
- при сухом трении (без жидкости) уровень сигнала несколько больше, чем при наличии жидкости;

Важным этапом АЭ контроля является выбор оптимального частотного диапазона работы АЭ аппаратуры. Наиболее часто критерием такого выбора является наилучшее отношение сигнал/шум. На нефте-газопроводах могут быть два типа мешающих акустических шумов: шумы, связанные с движением нефти и газа по трубопроводу и шумы, производимые в окружении трубопровода и проникающие на стенку трубы. Частично шумы трубопровода были исследованы ранее в задачах контроля герметичности. Для определения частоты регистрации проводились экспериментальные исследования всех акустических шумов, которые могли иметь место на реальном работающем нефтепроводе. Для этого на одном из участков нефтепровода Александровское – Анжеро-Судженск делался шурф до стенки нефтепровода (диаметр трубы 1020 мм, толщина стенки 14 мм). В шурфе на стенку трубы устанавливался широкополосный приемный преобразователь с подключенным широкополосным предварительным усилителем. Сигнал регистрировался спектроанализатором. Во время проведения исследований по нефтепроводу пропускались манжетно-резиновый очистной скребок (СМР) и скребок переменного диаметра (СПД). Имитировались также различного рода шумы окружающего трубопровода. Результаты исследований приведены на рис. 1.



**Рис.1.** Спектральная плотность (АЧХ) акустических сигналов работающего нефтепровода. 1 – собственный шум аппаратуры; 2,3 – шум течения нефти при скоростях, соответственно, 1,3 и 1,4 м/сек; 4 – шум течения нефти после прохождения очистного скребка; 5,6 – АЭ трения, создаваемая, соответственно, очистным скребком типа СМР и очистным скребком типа СПД

Прохождение очистных скребков по нефтепроводу сопровождались мощными широкополосными всплесками АЭ в диапазоне частот от 0 до 250 кГц, в то время как фоновый шум сосредоточен в низкочастотной области спектра (кривые 2 и 3). Тип очистного скребка незначительно влиял на амплитуду АЭ (кривые 5 и 6). Эффективная ширина полосы частот помех достигала 50 кГц, при этом их мощность с повышением частоты снижается. С повышением скорости течения амплитуда шума увеличивалась, что согласуется с результатами исследований других авторов. После прохождения очистного скребка в трубе продолжительное время сохранялся несколько повышенный акустический шум по отношению к шуму, имевшему место до прохождения очистного скребка (кривая 4). При этом наблюдались всплески акустических сигналов, свидетельствующих о наличии в потоке нефти различных механических примесей (галька, песок и т.д.) по видимому, оторванных от стенок трубы очистным скребком.

По результатам проведенных исследований был выбран частотный спектр регистрации ВТО по АЭ трения равным 150-180 кГц. В качестве критерия использовалось наилучшее отношение сигнал/шум.

После этого была поставлена серия экспериментальных исследований АЭ трения ВТО на действующих нефтепроводах с реальными очистными скребками. Во время проведения экспериментов по нефтепроводу были пропущены три очистных устройства СКР-3, СКР-2 и СКР-4. В результате было получено, что уровень сигналов АЭ трения в диапазоне частот 150-180 кГц достаточен для достоверной регистрации прохождения ВТО. Акустические шумы связанные с движением нефти по трубопроводу и шумы производимые в окружении трубопровода никакого влияния не оказывают. Порог регистрации установлен оптимально не было зафиксировано пропусков и ложных срабатываний.

## АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ УСТАНОВКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗМЕРА ЗЕРНА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

**Ярославкина Е.Е., Ярославкин А.Ю., Бакабрдин А.А.,  
Бочкарев А.В., Ионов М.К.**

*ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,  
г. Самара, Россия*

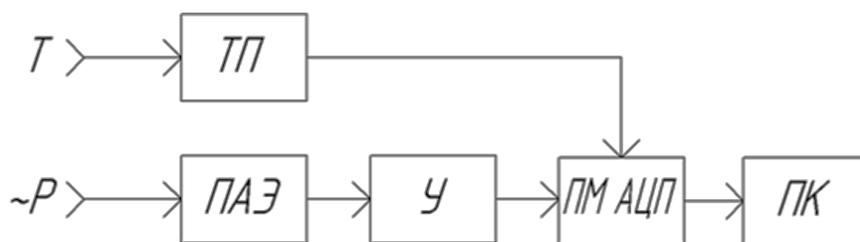
Структура металла, главным образом величина зерна, влияющая на прочностные характеристики изделия, является одним из важнейших показателей качества кристаллических материалов, поскольку данные характеристики определяют стоимость металла как продукта производства [1].

В настоящее время для контроля качества литого алюминия применяют металлографический анализ с помощью подготовки шлифа. Это очень долгий и затруднительный процесс. Его отрицательной чертой является тот факт, что анализ структуры проводится уже после литья слитка, что исключает возможность обратимости формирования дефектной структуры сплава. Наряду с этим всё большую актуальность приобретает проблема поиска новых непрерывных способов оценки качества слитка при литье по каким-либо параметрам. Одним из перспективных способов оценки структуры металла является использование метода акустической эмиссии (АЭ) - излучения упругих волн, возникающих в процессе перестройки внутренней структуры твердых тел при их кристаллизации - процесса образования участков кристаллической решетки в жидкой фазе и роста кристаллов из образовавшихся центров [2-4].

Одним из перспективных способов решения этой проблемы представляет собой создание программно-аппаратного комплекса, для прогнозирования в процессе литья размеров макроструктуры для управления структурой и свойствами литых изделий из алюминиевых сплавов с целью повышения их качества и надежности при эксплуатации. Принцип действия комплекса основан на регистрации и анализе характера прохождения акустических волн в упругой среде, которой является алюминиевый расплав. Формируемая аналитическая база данных сопоставляется с результатами металлографического анализа литых изделий в твердом состоянии. В результате формируются корреляционные зависимости в связанной системе «жидкое-твердое», на основании которых осуществляется комплексный прогноз в координатах «структура-свойства», позволяющий еще на стадии литья производить корректировку технологии подготовки расплавов к литью.

Для обработки данных акустической эмиссии было принято на текущем этапе внедрить два алгоритма подсчета событий как импульсов, превышающих некоторое пороговое значение, за все время кристаллизации и за отдельные промежутки времени. Выбор был сделан исходя из анализа первых опытов: амплитуды отдельных импульсов соответствующих событий отличались сравнительно слабо, чтобы считать этот параметр информативным. При отсутствии необходимости учитывать амплитуду наиболее емкими являются алгоритмы подсчета числа событий. К тому же по числу событий также измеряется смежный с механическими свойствами параметр пористости алюминия, описанный в [5].

Структурная схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Как показано на рис. 2, изменение температуры и механические колебания воспринимаются первичными преобразователями. Температура воспринимается термопарой, акустическая эмиссия – преобразователем акустической эмиссии. Кроме того, сигнал АЭ необходимо усилить.



**Рис. 2.** Структурная схема установки:  
 $T$  – температура,  $\sim P$  – изменение давления (механические колебания),  
 ТП – термопара, ПАЭ – преобразователь акустической эмиссии, У – усилитель,  
 ПМ АЦП – программируемый многоканальный АЦП,  
 ПК – персональный компьютер

В блок ПАЭ на рис. 2 включен также преобразователь заряда в напряжение, поскольку используемые пьезоэлектрические преобразователи имеют зарядовый выход. Фильтрация сигналов и получение требуемых численных/графических характеристик осуществляется в программируемом многоканальном АЦП за счет встроенного цифрового сигнального процессора, который предназначен для осуществления цифровой обработки сигналов. Полученные данные поступают на персональный компьютер, используемый исключительно для отображения записи АЭ. В дальнейшем планируется дополнить установку как минимум еще одной термопарой для возможности фиксации градиента температуры, от которого зависит закон перемещения фронта кристаллизации и, как следствие, закон формирования АЭ. Кроме того, для снижения погрешности планируется ввести в схему также второй преобразователь АЭ, который позволит производить измерения в дифференциальном режиме (из-за разного расположения преобразователей полезный сигнал будет сдвинут по фазе для одного преобразователя относительно другого, а помеха – нет).

Проведенные эксперименты показали, что сигнал АЭ при текущих условиях проведения опытов имеет ярко выраженный пик в области 28 Гц, а в последние секунды опыта образец издает звук, который можно охарактеризовать как хруст, что может свидетельствовать о подтверждении смещения резонансной частоты АЭ кристаллизуемого расплава с уменьшением соотношения жидкая/твердая фаза.

### Список литературы

1. Фещенко В.Н. Справочник конструктора. Книга 1. Машины и механизмы: учеб.-практ. пос. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 400с.
2. Ланге П.К., Ярославкин А.Ю. Информационно-измерительная и управляющая система для определения размера зерна металлического сплава с использованием метода акустической эмиссии // Сборник трудов «Информационно-измерительные и управляющие системы». СамГТУ, 2012. № 2(7).- С. 42–46.
3. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. – М.: Изд-во стандартов, 1976. -276с.
4. Жекамухов М.К., Шокаров Х. Б. Акустические волны кристаллизации и плавления веществ. Нальчик: ЕБГУ, 1997. - 303 с.
5. Акустические методы контроля и диагностики. Часть II: учеб. пособие / Л.А. Оглазнева, А.Н. Калиниченко. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2009. – 292 с.

# СТОХАСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ДИСЛОКАЦИОННОГО АНСАМБЛЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СООТВЕТСТВУЮЩАЯ ЕЙ АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ

Виноградов А.Ю.<sup>1,2)</sup>, Ясников И.С.<sup>2)</sup>,

<sup>1)</sup> Университет естественных и технических наук, Тронхейм, Норвегия.

<sup>2)</sup> Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия;  
[yasnikov@phystech.edu](mailto:yasnikov@phystech.edu)

Пластическая деформация металлов по своей природе является пространственно неоднородным и прерывистым во времени процессом вследствие дискретного характера движения дислокаций. Именно дискретность дислокационных процессов является причиной локальных флуктуаций деформации и напряжения. При этом неотъемлемым атрибутом эволюции дислокационной структуры в процессе пластического течения, который позволяет контролировать его кинетику, является акустическая эмиссия (АЭ).

Временные ряды сигнала АЭ выглядят как случайные данные, которые могут быть описаны авторегрессионным процессом первого порядка  $AR(1)$  (или его непрерывной версией, известной как процесс Орнштейна-Уленбека), и удовлетворяют стохастическому дифференциальному уравнению:

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{U}{\tau_r} + \tilde{\varepsilon}(t) \quad (1)$$

где в правой стороне выражения (1) стоит гауссов шум  $\tilde{\varepsilon}(t)$ , а  $\tau_r$  обозначает характерное время релаксации. Стохастические свойства этого процесса однозначно определяются экспоненциально затухающей автокорреляционной функцией:

$$R_{UU}(\tau) = \langle U(t)U(t+\tau) \rangle = \sigma_{UU}^2 \exp(-|\tau|/\tau_r) \quad (2)$$

где  $\sigma_{UU}^2$  - дисперсия сигнала АЭ и она выступает как мера мощности случайного процесса АЭ. Односторонняя функция спектральной плотности связана при этом с автокорреляционной функцией  $R_{UU}(\tau)$  через ее преобразование Фурье и по теореме Винера-Хинчина имеет лоренцевский профиль:

$$G(f) = 4 \int_0^{\infty} R_{UU}(\tau) \exp(-i2\pi f \tau) d\tau = 4\sigma_{UU}^2 \frac{\tau_r}{1 + (2\pi f \tau_r)^2} = 4\sigma_{UU}^2 \frac{f_0}{f_0^2 + 4\pi^2 f^2} \quad (3)$$

где  $f_0 = 1/\tau_r$  обозначает характеристическую частоту, которая определяется временем релаксации  $\tau_r$ , которое служит мерой временной корреляции между отдельными событиями во временном ряду АЭ. В целом, динамическая система может иметь несколько времен релаксации, или, в предельном случае, времена релаксации могут быть распределены непрерывно, так что сумма лоренцевских спектров (3), превращается в хорошо известный спектр шума  $1/f$ , который отличается своим чрезвычайно большим временем «памяти» к прошедшим событиям. Очевидно, что чем шире функция  $G(f)$  тем уже функция  $R_{UU}(\tau)$ , и наоборот. Для спектра (3) частота  $f_0 = 2\pi f_m$  пропорциональна значению медианной частоты функции спектральной плотности. Именно по этой причине, что из множества возможных частотных характеристик функции спектральной плотности АЭ мы выбрали медианную частоту в качестве наиболее предпочтительной характеристики. Таким образом, увеличение значения медианной частоты означает уменьшение времени корреляции в последовательности событий АЭ, т.е. уменьшение памяти о прошедших событиях. И наоборот, снижение значения медианной частоты означает усиление влияния последних событий на настоящее и будущее временного

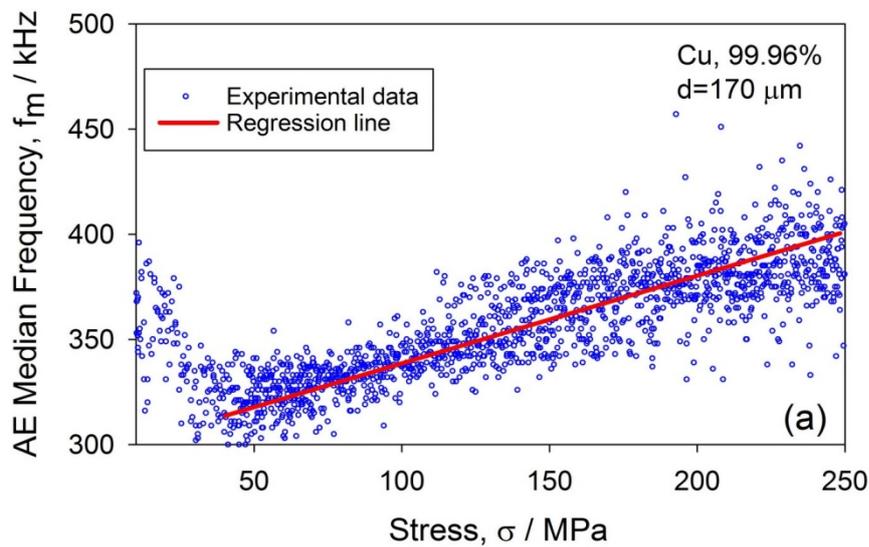
ряда. Постоянная величина медианной частоты отражает устойчивые статистические свойства временного ряда АЭ.

Время релаксации  $\tau_r$  определяется дислокационной кинетикой и естественным образом связано с длиной свободного пробега дислокации  $\langle L \rangle$  и средней скоростью ее движения  $\langle V \rangle$  соотношением  $\tau_r = \langle L \rangle / \langle V \rangle$ . При этом практически для всех дислокационных конфигураций, возникающих в процессе пластической деформации, порядок  $\langle L \rangle$  определяется зависимостью  $\langle L \rangle = 1 / \sqrt{\rho}$ . И в тоже самое время  $\langle V \rangle$  может быть выражена при постоянной скорости пластической деформации  $\dot{\epsilon}$  из соотношения Орована  $\langle V \rangle = M \dot{\epsilon} / b \rho_m$ , где  $b$  - величина вектора Бюргера подвижных дислокаций и  $\rho_m$  - их плотность;  $M$  - фактор Тейлора, который определяется кристаллографической текстурой поликристалла. Отсюда для медианной частоты  $f_m$  вытекает следующее выражение:

$$f_m = \frac{f_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau_r} = \frac{M\dot{\epsilon}}{2\pi b\rho_m} \sqrt{\rho} \quad (4)$$

Очевидно, что при условии  $\rho_m = const$  и в силу соотношения Тейлора  $\sigma = \alpha GbM \sqrt{\rho}$  мы легко можем получить, что  $f_m \sim \sqrt{\rho} \sim \sigma$ .

На рисунке 1 показано поведение медианной частоты функции спектральной плотности мощности АЭ как функции напряжения в поликристалле меди со средним размером зерна 170 мкм. Пропорциональность между медианной частотой и механическим напряжением очевидна, по крайней мере, после I стадии деформации, где происходило очень быстрое размножение мобильных дислокаций и условие постоянства их плотности не выполнялось.



**Рис.1.** Медианная частота функции спектральной плотности мощности АЭ как функция напряжения в поликристалле меди со средним размером зерна 170 мкм

Таким образом, медианная частота является одной из наиболее предпочтительных характеристик функции спектральной плотности АЭ и адекватно отражает стохастическую динамику дислокационного ансамбля при пластической деформации широкого класса металлических материалов.

# КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

Эльманович В.И., Колбин А.Л., Скворцов А.А.

ООО «Диагностика и анализ риска», г. Волгоград, Россия,  
[info@volgograd.ru](mailto:info@volgograd.ru)

В последние годы в нефтехимической промышленности, а именно производстве этилена и пропилена из углеводородного сырья для изготовления змеевиков печей пиролиза широко используются высоколегированные сплавы на никелевой основе – стали типа 25Cr–35Ni+Nb (Centralloy G 4852 Mi-cro) и 35Cr–45Ni+Nb (Centralloy ET 45 Micro). Внедрение данных материалов позволило значительно повысить рабочие температуры змеевиков печей пиролиза, с получением пирогаза с максимальным содержанием этилена и пропилена. Также внедрение новых материалов существенно сказалось на повышении производительности, при производстве указанной продукции. Наряду с этим были выявлены и недостатки при использовании змеевиков: 1) относительно низкая фактическая стойкость 50% от расчетного ресурса; 2) отсутствие возможности контроля фактического технического состояния на протяжении всего периода эксплуатации традиционными методами.

В докладе представлены проблемы использования змеевиков и предложены варианты по проведения неразрушающего контроля для мониторинга механизмов повреждения, а также приводится ряд научно-исследовательских мероприятий, выполненных, для решения задачи.

Приведены результаты контроля на образцах новых труб из отечественного и зарубежного материалов, а затем на действующем змеевике, в период остановки и ремонта.

Рассмотрена возможность использования акустико-эмиссионного контроля для мониторинга действующих механизмов повреждения (ДМП) и определения возможных дефектов. Задачей исследования являлось: 1) определение акустических свойств труб центробежнолитых труб из высоколегированных сталей типа Centralloy ET 45 Micro и Centralloy G 4852 (скорости распространения упругих волн, коэффициенты затухания и т.п.); 2) определение акустико-эмиссионных свойств вышеуказанных труб (скорость затухания импульса от момента достижения им максимального значения амплитуды до ухода под порог, зависимость временных параметров импульсов АЭ (PDT, SCETO, Dead Time) от расстояния до источника - имитатора; 3) определение численных значений параметров в амплитудном критерии опасности источников АЭ.

Также при обработке файлов АЭ был проведен анализ осциллограмм, записанных АЭ импульсов.

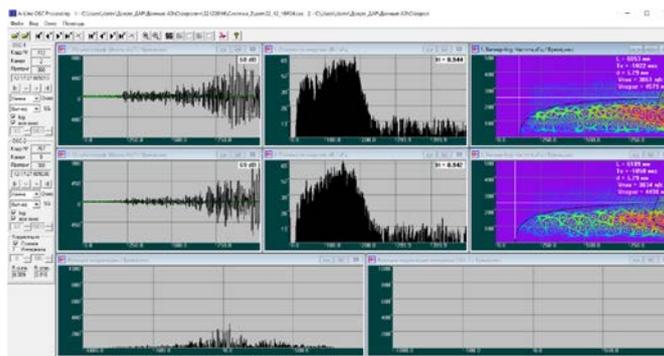


Рис.1. Результаты расчета типичных спектрограмм, полученных при АЭ контроле на примере трубы №1 (Scomark Engineering)

В дополнении к этому были проведены механические испытания образцов металла на растяжение, как при комнатной, так и при повышенных температурах, с одновременной регистрацией сигналов акустической эмиссии. Образцы были отобраны от участков труб с выявленными (ЗКН) при контроле методом магнитной памяти металла.

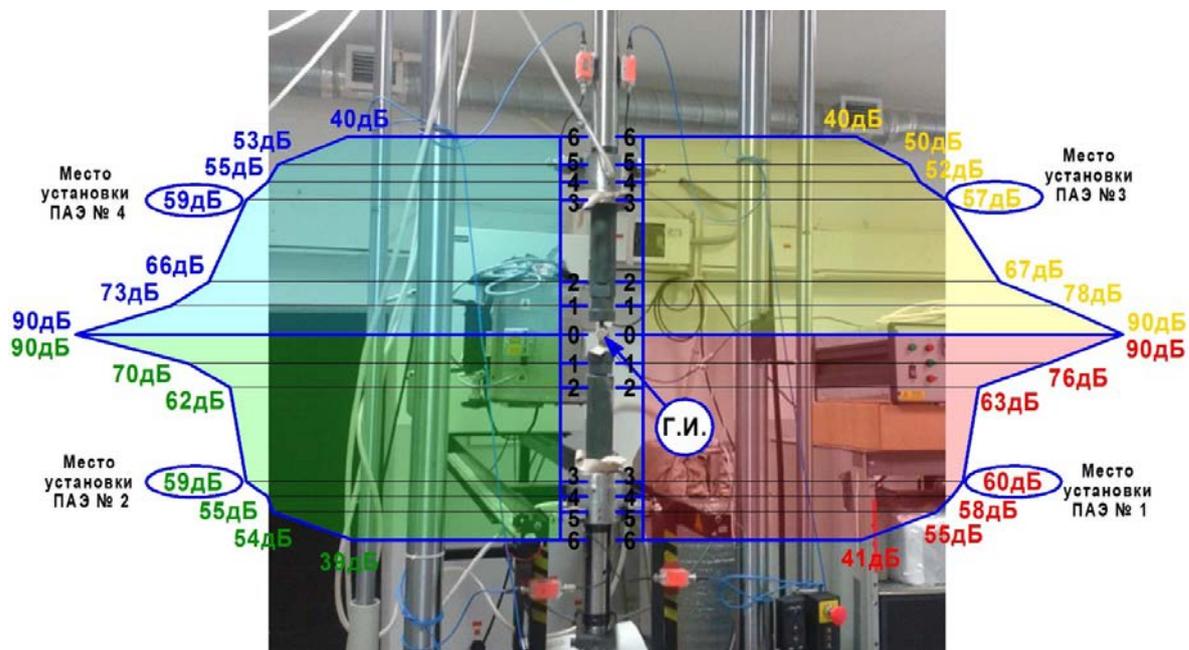


Рис. 2. Измерение затухания калиброванного акустического сигнала

В испытаниях при комнатной температуре АЭ регистрировалась пятью преобразователями, четыре из которых были установлены на захватах, а пятый непосредственно на образец. При высокотемпературных испытаниях для регистрации АЭ использовались четыре преобразователя.

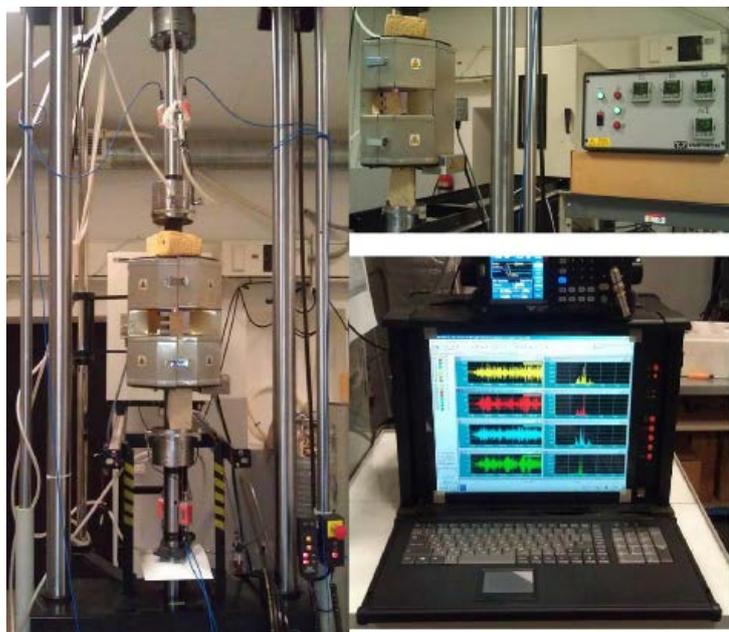
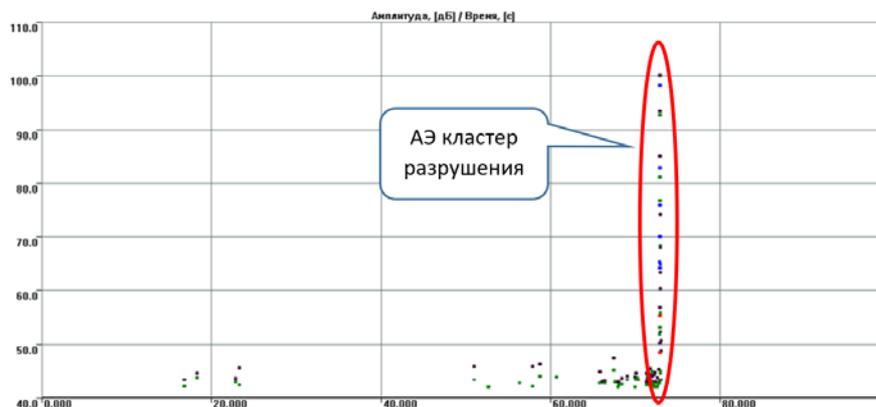
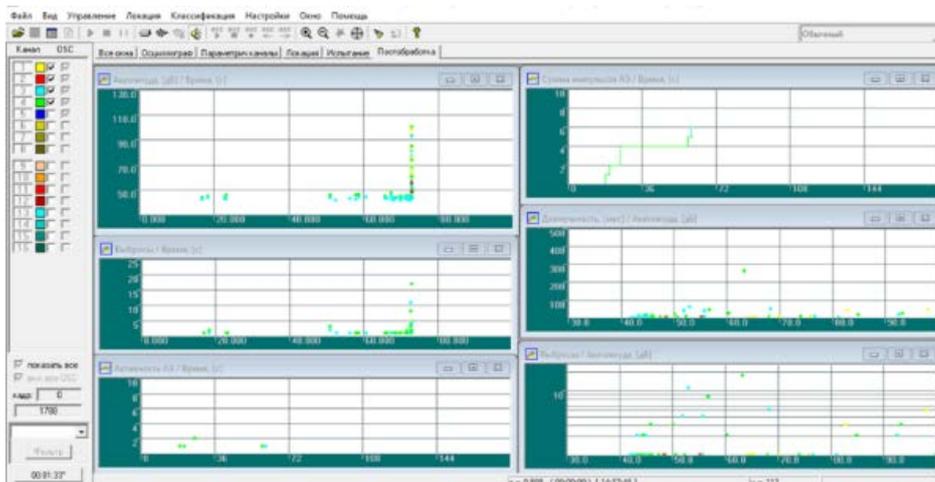


Рис. 3. Испытание образцов на растяжение на гидравлической машине Instron 8802 со штатной системой поддержания заданной температуры) и системой регистрации акустической эмиссии A-Line 32D



**Рис. 4.** Акустико-эмиссионная активность при испытании образцов на статическое растяжение при комнатной температуре

В докладе рассмотрена возможность использования акустико-эмиссионного контроля для мониторинга действующих механизмов повреждения (ДМП) и определения возможных дефектов. Приведены выводы о проделанной работе и применимости методов неразрушающего контроля.

## АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА ВТ1-0 ПОСЛЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

**Волков А.Е., Черняева Е.В., Арутюнян А.Р.**

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*

[lena@smel.math.spbu.ru](mailto:lena@smel.math.spbu.ru)

Проведены систематические исследования влияния циклического нагружения титановых образцов на акустическую эмиссию (АЭ) при их последующем индентировании. Из сплава ВТ1-0 (Ti – 0.05%Fe – 0.01%Si – 0.015%W – 0.01%Zr, Mn, Cr, Ni, Mo, Al, V, Sn, Pd, C, Cu, B, Co, Nb <0.005%) были изготовлены стандартные образцы толщиной 1,5 мм с рабочей частью 20x4 мм. Два образца были доведены до разрушения растяжением, а остальные были подвергнуты циклическому нагружению на сервогидравлической машине Si-Plan SH-B с частотой  $f = 5$  или 100 Гц, минимальным напряжением  $\sigma_{\min}$

= 0, и максимальным напряжением  $\sigma_{\max} = 130, 160, 200, 260$  и  $530$  МПа. Затем проводили индентирование твердосплавным коническим индентором в местах, распределенных по всей длине образцов, с записью сигналов акустической эмиссии (АЭ). Максимальная нагрузка на индентор составляла  $1000$  Н. Регистрацию сигналов проводили с использованием датчика MSAE-1300WB-C с усилителем MSAE FA010. Общее усиление сигналов составляло  $80$  дБ. В таблице 1 приведены усредненные по нескольким (от 2 до 5) образцам результаты испытаний.

Во всех разрушенных образцах в зоне разрушения энергия сигналов АЭ уменьшалась, а их медианная частота увеличивалась, как это ранее было отмечено для образцов из стали трубопроводов, работающих в условиях малоциклового усталости [1].

Наиболее близкими по параметрам к сигналам АЭ, полученным на образцах, разрушенных квазистатическим растяжением, были сигналы, зарегистрированные при  $f = 5$  Гц и  $\sigma_{\max} = 530$  МПа. При  $f = 100$  Гц с ростом  $\sigma_{\max}$  происходило уменьшение количества циклов до разрушения, и при этом наблюдали увеличение средней энергии сигналов АЭ и их медианной частоты в зоне разрушения. Степень искажения спектральных портретов (зависимости спектральной плотности мощности от частоты), вызванных циклическим нагружением, оценивали по величине коэффициента Пирсона  $R$  в зоне разрушения ( $R = 1$  соответствовало спектру материала в исходном состоянии).

Таблица 1

$f$ , Гц		5		100		
$\sigma_{\max}$ , МПа		260	530	130	160	200
	Растяжение					
$N_p$		18500	15	1430000	306000	103000
$E_{\text{ср}}$ , про-изв.ед.	2140	2570	2150	1660	2450	2610
$F_{\text{med}}$ , кГц	148	152	146	143	145	152
$R$	0,97	0,949	0,983	0,973	0,965	0,937

$N_p$  – среднее количество циклов до разрушения;

$E_{\text{ср}}$  – средняя энергия сигналов АЭ по длине образца;

$F_{\text{med}}$  – средняя медианная частота в сигналов в зоне разрушения;

$R$  – средний коэффициент Пирсона отклонения формы спектра сигналов в зоне разрушения от спектра сигналов при индентировании образцов в исходном состоянии.

Поскольку сигнал АЭ обусловлен релаксацией напряжений, вызванной пластическим сдвигом, то его частота должна коррелировать с длиной пробега группы дислокаций, порождающего сдвиг, а энергия – с количеством дислокаций в группе. При усталостных испытаниях плотность дислокаций леса возрастает. Следовательно, размер областей, охватываемых пластическими сдвигами, уменьшается. Таким образом, следует ожидать увеличения частоты сигналов АЭ. Также ввиду уменьшения размеров областей сдвигов количество участвующих в таких них дислокаций уменьшается, что должно приводить к уменьшению энергии сигналов. Оба этих явления и наблюдаются в эксперименте. Изменения в строении областей сдвига приводят также к изменению формы спектра сигналов, что и отражается изменением коэффициента Пирсона.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-01-00335*

1. Черняева Е.В., Мерсон Д.Л., Бигус Г.А., Галкин Д.И. Применение метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля состояния основного металла и сварных соединений трубопроводов, работающих в условиях малоциклового усталости //Сварка и диагностика, 2010. - №2. – С.50-57

# МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ МЕЖКРИСТАЛЛИТНОМУ КОРРОЗИОННОМУ ОХРУПЧИВАНИЮ ПРИ РАБОТЕ С АГРЕССИВНЫМИ СРЕДАМИ

Прилуцкий М.А., Никандров Д.А.

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*  
[dimannikandr@mail.ru](mailto:dimannikandr@mail.ru)

С помощью данной методики осуществляются теоретические и экспериментальные исследования, связывающие акустические параметры со стадией поврежденности материала изделия, определяющие зависимости акустического сигнала от результата воздействия микроиндентора на материал изделия, оценивающие стадию поврежденности и напряженно-деформированное состояние по данным микроиндентирования и акустическим параметрам.

Основное влияние на межкристаллитное коррозионное охрупчивание материала оказывают кислород и водород при сварке, а также рабочее агрессивное вещество (к примеру: хлоридсодержащие или хлороводородсодержащее). Закись железа FeO (не успевшая разложиться при быстром охлаждении железа при сварке) располагается по границам зерен металла в виде игл стекловидной формы и является источником микронадрезов, а комплексы (к примеру: SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> и др.) – легкоплавкие ликваты, которые после затвердевания становятся хрупкими. В этих местах склонен задерживаться водород, который не успевает выделиться при быстром охлаждении сварочной ванны (к тому же его атомы соединяются в молекулы). Также водород может окисляться, образуя водяной пар. Возникающее межкристаллитное коррозионное охрупчивание и снижение пластичности материала, вызванное агрессивной средой, превышение проектной нагрузки и изменение напряженно-деформированного состояния, все эти факторы могут привести к разрушению технологического трубопровода и повлиять на надежность конструкции в целом.

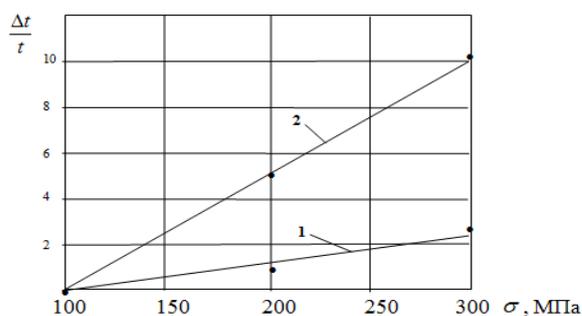
Акустический метод оценки остаточных напряжений основан на регистрации зависимости скорости распространения волны от упругих постоянных высокого порядка, зависящих от напряжений. Метод заключается в возбуждении ультразвуковых волн (продольные, сдвиговые поперечные или поверхностные волны) в исследуемом объекте и измерении изменения скорости распространения этих волн в зависимости от напряжения [1, 2, 3].

Был проведен комплекс экспериментальных исследований на образцах с целью выяснения возможности использования головных волн в задачах контроля механических напряжений и сравнения этих возможностей с возможностями объемных и поверхностных волн.

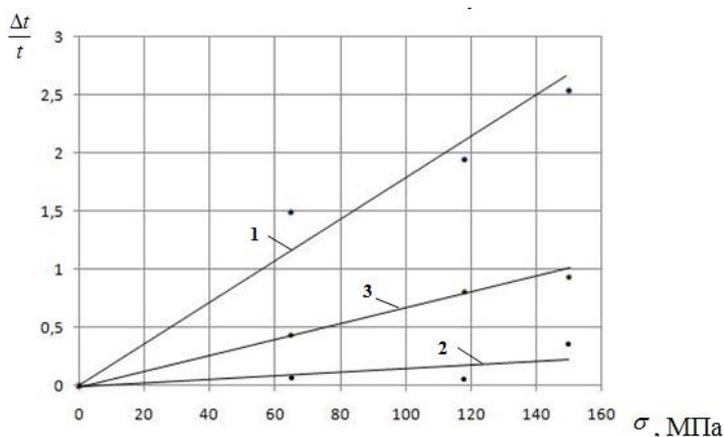
На рис. 1 приведены акустоупругие кривые (зависимости относительных изменений задержек от напряжения) для головных и рэлеевских волн. Исходными считались значения задержек, соответствующие напряжению 100 МПа.

На рис. 2 приведены акустоупругие кривые (зависимости относительных изменений задержек от напряжения) для головной волны в разных направлениях относительно действия нагрузки.

Исследование влияния упругих напряжений на величину задержки импульсов головных волн показало наличие акустоупругого эффекта, сопоставимого по величине с акустоупругим эффектом для объемных волн. Головные волны обладают рядом преимуществ, связанных с простотой их возбуждения по сравнению с поперечно поляризованными объемными волнами и значительно меньшей чувствительностью к состоянию поверхности по сравнению с Рэлеевскими волнами.



**Рис. 1.** Акустоупругие кривые для Рэлеевских (1) и головных (2) волн



**Рис. 2.** Акустоупругие кривые для головных волн: 1 – вдоль нагрузки, 2 – поперёк нагрузки, 3 – под 45°

Нано- микроиндентирование становится эффективным методом в решении многих проблем пластической деформации и разрушения, прогноза надежности и ресурса изделий, работающих в условиях износа, усталости, динамических и ударных нагрузок, в условиях низких температур и хрупкого разрушения.

Чтобы спровоцировать появление сигналов АЭ, объект контроля надо нагрузить. Данный метод наиболее часто объединяют с разрушающими методами, механическими испытаниями или технологическими операциями. Наиболее перспективно совместить метод АЭ с безобразцовым методом контроля и диагностики качества металла реализующим микроразрушающее воздействие на объект контроля, а именно с методом индентирования. Работы совмещающие эти два метода контроля состояния металла встречаются в [4, 5].

В работе оцениваются перспективы методики, совмещающей методы индентирования и акустических методов. Методика нацелена на повышение безопасности эксплуатации опасных производственных объектов, информативности и надежности контроля с использованием акустической эмиссии, акустической тензометрии и индентирования.

1. Акустическая тензометрия и структуроскопия железнодорожных колес: монография/ В. В. Муравьев, О. В. Муравьева, В. А. Стрижак [и др.]; отв. ред. В. В. Муравьев. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2014. – 180 с.
2. Никитина Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. – Н. Новгород: ТА-ЛАМ, 2005. – 208 с.
3. Основы диагностики технических устройств и сооружений / Г. А. Бигус, Ю. Ф. Даниев, Н. А. Быстрова, Д. И. Галкин. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015 – 445, [1] с.: ил.
4. Матюнин, В. М. Методы твёрдости в диагностике материалов. Состояние проблемы и перспективы / В. М. Матюнин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003.-№6.- С. 37-42
5. Колмаков, А. Г. Методы измерения твёрдости. Справочное издание / А. Г. Колмаков, А. Ф. Терентьев, М. Б. Бакиров. - М.: Интермет Инжиниринг, 2000. - 128 с.

# АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ИСПЫТАНИЯХ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

Сульженко В.А., Яковлев А.В., Казаков В.А.

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
[V\\_Sulzhenko@ksrc.ru](mailto:V_Sulzhenko@ksrc.ru)

В судостроительной отрасли наиболее широко используются такие традиционные методы неразрушающего контроля (НК), как радиографический (РГК) и ультразвуковой (УЗК). Метод АЭ-контроля пока не нашел должного применения. Одной из причин сложившейся ситуации является отсутствие отраслевых нормативных документов, регламентирующих применение метода АЭ при изготовлении и испытаниях объектов морской техники. В то же время проблема достоверности НК в отрасли стоит достаточно остро, учитывая конструктивную сложность объектов морской техники, а также зачастую труднодоступность их отдельных районов для проведения полноценного контроля методами УЗК и РГК.

В качестве удачного примера можно привести работу, которая была выполнена совместно специалистами ФГУП «Крыловский государственный научный центр», НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» и АО «Адмиралтейские верфи» при решении важной для судостроения проблемы контроля монтажных сварных соединений судовых трубопроводных систем. В результате проведения комплекса экспериментальных работ в лабораторных и цеховых условиях была разработана методология АЭК судовых трубопроводных систем при их пневматических испытаниях, выпущена методика АЭК по оценке качества монтажных швов, включающая критерии оценки степени

их дефектности, которая была введена в отраслевой стандарт.

Применение разработанной методологии АЭ-контроля позволило:

- уменьшить трудоемкость изготовления судовых трубопроводов путем замены их гидравлических испытаний на прочность на испытания сжатым воздухом с понижением испытательного давления, которые не требуют последующих трудоемких операций по осушке трубопроводных систем;

- повысить достоверность и надежность оценки качества монтажных швов, учитывая их труднодоступность для качественного проведения РГК из-за высокой плотности монтажа трубопроводов (непровар на рисунке 1);

- повысить эффективность контроля качества судовых трубопроводов за счет выявления наибо-

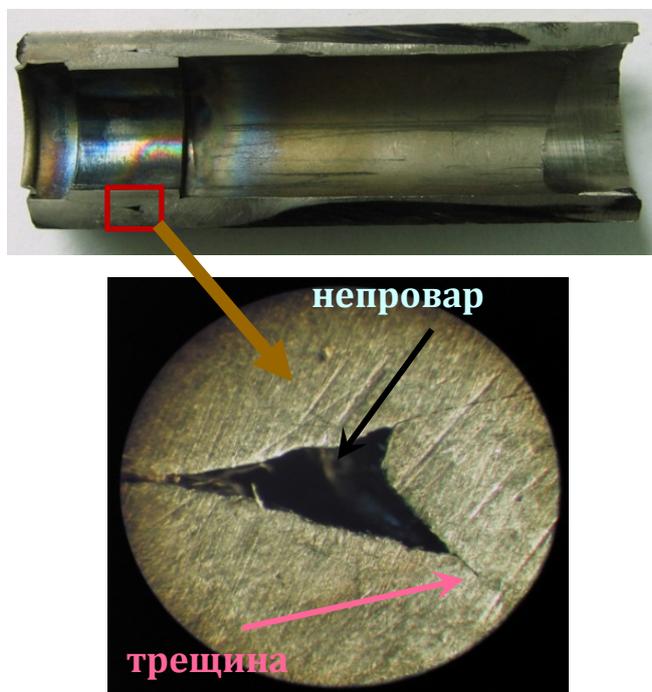


Рис. 1. Фрагмент участка трубопровода с дефектным сварным швом

лее опасных дефектов типа трещин (см. рисунок 1), что, в конечном итоге, обеспечивает эксплуатационную надежность объектов морской техники.

В настоящее время метод АЭК успешно используется на заводах отрасли при проведении пневматических испытаний судовых трубопроводных систем на строящихся объектах. В общей сложности к настоящему времени выполнены работы на 15-ти объектах, проконтролировано около 11 тыс. монтажных сварных швов. В результате применения АЭ-контроля почти в 250 швах выявлены недопустимые дефекты типа трещин, пропущенные методом РГК.

Не менее важной задачей является оценка качества сварных швов ответственных узлов объектов морской техники в процессе их изготовления.

В случае выполнения многопроходной сварки, что характерно для судостроения, особенно важно своевременное обнаружение и удаление дефектов. Однако контроль качества выполнения сварного соединения штатными методами РГК и УЗК осуществляется фрагментарно, по мере заполнения разделки. Отличительная особенность метода АЭК заключается в возможности выявления недопустимых дефектов непосредственно в процессе выполнения сварочных проходов.

Кроме того, методы УЗК и РГК имеют следующие особенности:

– они ориентированы на оценку степени опасности дефекта, соответственно, по эквивалентной площади или по размеру отпечатка на снимке, но не учитывают степень остроты создаваемой дефектом концентрации, приводящей к росту локальных эксплуатационных напряжений, которые и определяют реальную степень опасности дефектов;

– контроль штатными методами НК выполняется в статических условиях, т.е. оценка степени опасности дефекта проводится без учета действующих локальных напряжений, что может приводить к перебраковке.

В то же время в процессе сварки могут образовываться дефекты относительно небольших геометрических размеров (трещины), но которые склонны к развитию под действием локальных остаточных сварочных напряжений, возникающих в процессе остывания сварного шва, и которые, как правило, становятся потенциальными источниками усталостных разрушений. Метод АЭ по своей физической сути ориентирован на выявление именно подобных дефектов.

В частности, в титановых сварных швах при выполнении сварки с нарушениями газовой защиты образуются объемные окисления. Опасность этих дефектов заключается в том, что на стадии остывания сварочной ванны они являются источниками массового образования начальных микротрещин, которые при эксплуатации могут объединяться в магистральную трещину и приводить к аварийной ситуации. Причем объемные окисления практически не обнаруживаются традиционными методами НК. В то же время, для метода АЭК выявление подобных дефектов не представляет трудностей.

Однако для успешного применения прогрессивного метода АЭК в технологии сварки, особенно при выполнении ручной электродуговой сварки покрытыми электродами, требуется решение комплекса сложных методологических задач.

Включение в технологический процесс заводского контроля метода АЭ не заменяет, а дополняет комплекс традиционно используемых методов НК, каждый из которых обладает своими достоинствами и преимуществами. По сути, метод АЭ расширяет возможности контроля качества сварных швов и обеспечивает выявление небольших по размерам, но опасных, развивающихся дефектов.

Поэтому получение максимальной эффективности и достоверности при оценке качества ответственных сварных соединений объектов морской техники возможно только при оптимальном использовании всего комплекса методов НК.

## ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОЛОГИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА СВАРКИ СУДОКОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Сульженко В.А., Яковлев А.В., Карлов С.А., Казаков Н.А.

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
[V.Sulzhenko@ksrc.ru](mailto:V.Sulzhenko@ksrc.ru)

Специалистами ФГУП «Крыловский ГНЦ» накоплен большой опыт по использованию метода АЭ-диагностики для контроля качества сварных швов непосредственно в процессе сварки. Наибольшую методическую сложность представляет АЭ-контроль качества выполнения сварных соединений с помощью ручной электродуговой сварки покрытыми электродами.

Процесс сварки неизбежно сопровождается высокой интенсивностью и большими объемами регистрируемой информации, основную часть которой составляют помехи различного вида. Необходимость фильтрации акустической информации непосредственно в ходе сварки, т.е. в реальном масштабе времени, предъявляет очень высокие требования к быстродействию аппаратуры АЭ и к ее программно-алгоритмическому обеспечению. В частности, обязательным условием является возможность измерения и вычисления основных параметров импульсов в платах сбора данных. Это позволяет выполнять фильтрацию очевидных помех по заданным критериям уже на аппаратном уровне. При этом для дискриминации помех, как на этапе сбора данных, так и на этапе их пост-обработки, необходимо иметь многоуровневую систему комбинированных фильтров.

Важной задачей при контроле качества выполнения сварки является обработка и критериальный анализ отфильтрованной информации с целью определения опасности выявляемых источников АЭ, т.е. допустимости или недопустимости выявленного дефекта и принятия решения о необходимости его выборки. Для этого нужно иметь объективную систему классификации обнаруженных источников АЭ. В аппаратуре КАЭМС (ФГУП «Крыловский ГНЦ») для каждого из зарегистрированных импульсов по методу «нечеткой логики» вычисляется интегральный параметр «Обобщенная Степень Опасности» по совокупной оценке функции принадлежности трех основных информативных параметров широкополосного сигнала: пиковой амплитуды, волновой формы и высокочастотности. Параметр «Обобщенная Степень Опасности» характеризует степень приближения импульса к высокоамплитудному, дискретному и высокочастотному импульсу АЭ-природы, типичному для акта микроразрушения.

Сварные швы судокорпусных конструкций зачастую имеют «неправильную» геометрическую форму, а свариваемые элементы при этом могут иметь полости большого диаметра, через которые прохождение акустических колебаний невозможно. Кроме того, в районе контролируемого сварного шва, как правило, находятся элементы насыщения, также препятствующие распространению сигналов АЭ. В результате, применение при контроле подобных объектов традиционных подходов для определения координат источников по известным уравнениям локации встречает большие трудности.

Для решения задачи определения местоположения источника АЭ в сварных швах сложной формы специалистами ФГУП «Крыловский ГНЦ» разработан алгоритм локации, в котором координаты источника АЭ извлекаются из массива данных по адресу, определяемому комбинацией номеров приемных каналов аппаратуры и соответствующих им задержек во времени регистрации акта излучения. Для этого на этапе подготовки к АЭ-контролю по линии сварного шва производится имитация сигналов источником Су-Нильсена. Полученная акустическая информация обрабатывается в специали-

зированной программе, которая преобразует исходные данные в конфигурационный файл настройки.

Бесспорным достоинством этого алгоритма является также возможность привязки к реперным точкам, например, к границам разметки участков РГК.

Разработанный локационный алгоритм был интегрирован в программу анализа АЭ-информации аппаратуры КАЭМС и апробирован на АО «ПО «Севмаш» при выполнении работ по АЭ-диагностике качества сварных швов судокорпусных конструкций.

Процесс ручной электродуговой сварки покрытыми электродами сопровождается помехами от шлаковой корки, которые по акустическим характеристикам могут быть практически неотличимы от сигналов, излучаемых трещиной. Для представления информации, зарегистрированной при АЭК процесса сварки, в методологии ФГУП «Крыловский ГНЦ» используется координатно-временное распределение. Это позволяет анализировать акустическую картину при остывании локального района сварного шва, когда влияние сигналов помех минимально, а дефект способен активно развиваться под действием термических напряжений.

В частности, на рисунке 1 показано координатно-временное распределение событий АЭ, зарегистрированных аппаратурой КАЭМС при выполнении фрагмента сварочных работ. Здесь по оси X показаны участки РГК (№4÷№14) и относительное расположение ПАЭ (№17, №18 и №12), а по оси Y – время выполнения сварочных работ.

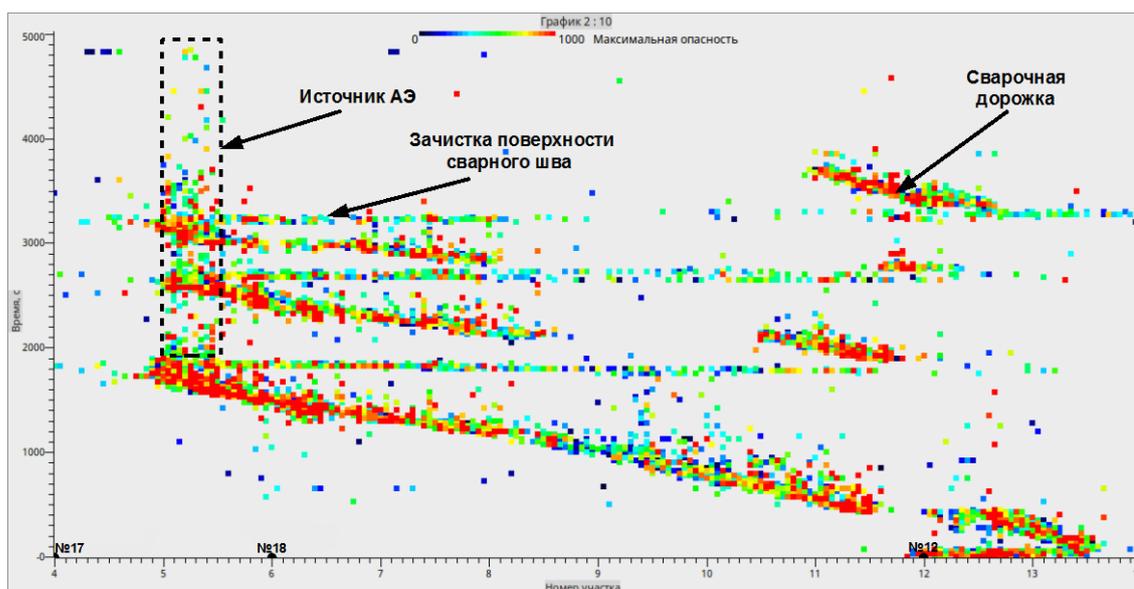


Рис. 1. Координатно-временное распределение событий АЭ

Из представленного рисунка следует, что на участке №5 сварного шва зарегистрирован источник АЭ, обладающий совокупностью следующих признаков:

- активное излучение сигналов АЭ с высокой степенью опасности по параметру «Обобщенная Степень Опасности» в локальном месте сварного шва после прохождения сварочной дугой данного участка шва, т.е. на начальной стадии его остывания;
- повторная регистрация активного источника АЭ-сигналов в данном месте сварного шва на последующих проходах.

По методологии АЭ-контроля, используемой ФГУП «Крыловский ГНЦ», перечисленные критерии являются необходимыми признаками наличия в сварном шве недопустимых развивающихся дефектов, выявление которых является основной задачей метода АЭ-контроля.

# АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ СОУДАРЕНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Бехер С.А., Сыч Т.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения»,  
г. Новосибирск, Российская Федерация,  
[beher@stu.ru](mailto:beher@stu.ru), [tatyna979@mail.ru](mailto:tatyna979@mail.ru)

В работе рассматривается применение ударного воздействия для возбуждения акустико-эмиссионных (АЭ) сигналов и анализ их характеристик. В практике неразрушающего контроля соударение тел может порождать акустические сигналы, которые оказываются мало информативными, либо создают помехи, в этом случае требуется анализ и селекция сигналов. Ударные воздействия также могут использоваться непосредственно при проведении контроля для возбуждения информативных АЭ сигналов. В работе [1] рассмотрена модель для анализа акустического тракта как единой системы, и позволяет изучать параметры сигналов при ударном воздействии калиброванных элементов с известной массой об объект.

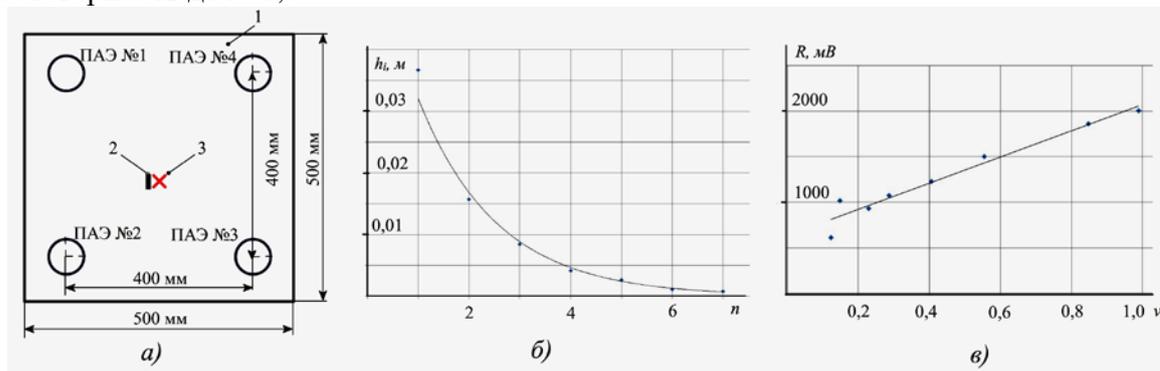
**Целью** настоящей работы является совершенствование методов калибровки преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ), исследование информативных параметров сигналов АЭ, возникающих при соударении твердых тел.

Разработка новых средств и способов калибровки АЭ аппаратуры представляет собой актуальную научно-практическую задачу, в том числе это связано с ограниченным количеством нормативных документов национального уровня, регламентирующих акустико-эмиссионную диагностику. В [2] установлены общие требования проведения АЭ испытаний, требования к источнику, калибровочному блоку, условиям проведения калибровки ПАЭ установлены только в отраслевых документах [3,4]. Согласно этим требованиям при калибровке ПАЭ для возбуждения акустической эмиссии используются дискретные источники АЭ в виде излома графитового стержня или капиллярной стеклянной трубки [2,3]. Подобные источники генерируют направленный акустический сигнал.

Исследования выполнены на стальной пластине (рис. 1, а) толщиной 8 мм, на схеме показаны места установки антенны преобразователей (ПАЭ №1-4) и место установки тензорезистора Куова KSP-6-350-E4 с базой 6 мм. Для регистрации и анализа АЭ сигналов использовалась акустико-эмиссионная диагностическая система СЦАД-16.02/03 с частотой дискретизации 2 МГц, с одновременной регистрацией быстродействующей тензометрической системой «Динамика-3» локальных деформаций пластины в месте удара. Специальное устройство позволяет регулировать высоту сбрасывания  $h$  калиброванных элементов, в экспериментах была использована сфера диаметром  $d$  6 мм. Системой регистрируется серия  $n$  АЭ сигналов, возникающих при падении калиброванного элемента с высоты  $h_{min} \dots h_{max}$ . По результатам экспериментов сбрасывания сферы с 40 точек с шагом 5 см, максимальная высота  $h_{max}$  составила 2 м, установлено, что размах первого регистрируемого сигнала, имеющего в серии  $n$  максимальную амплитуду, возрастает с увеличением высоты, зависимость амплитуда-скорость представляет собой линейную функцию, угол наклона функции одинаковый для двух пар ПАЭ. Последующий анализ проведен для одного из равноудаленных АЭ каналов, при этом коэффициент парной корреляции формы по каналам составил от 0,95 до 0,97.

Сфера в момент удара имеет приобретенную за время свободного падения скорость  $v$ , материал пластины под действием силы  $F=const \cdot s^{3/2}$  сжимается, вызванные ударом деформации  $s$  и сопровождающий их переходный процесс приводит к возникновению импульсного АЭ сигнала при соударении тел. Теоретическая модель может

быть построена на основе теории Герца [4]. Получена серия АЭ сигналов для малых высот  $h$  и сил контактного взаимодействия  $F$ , пластическую деформацию в месте удара можно считать малой. Сфера в начальный момент контакта имеет максимальную скорость, взаимодействует с материалом объекта время  $\Delta T$ , после чего проводит серию ударов  $n$  до полной потери энергии, поднимаясь на высоту  $h_i$ , повторные удары имеют уже меньшую кинетическую энергию и скорость. На рис.1, б показана расчетная высота  $h_i$  последующего движения сферы после начального удара при высоте сбрасывания  $h_{min}$  5 см, зависимость описывается экспоненциальным законом  $y=a \cdot e^{bx}$  с коэффициентами корреляции 0,99 во всех случаях. Параметры затухания следующие – для минимальной высоты  $h=0,05$  м:  $a=0,06$ , и  $b=-0,644$ ; для медианы высоты  $h=1$  м:  $a=0,48$ , и  $b=-0,86$ ; для максимальной высоты  $h=2$  м:  $a=2,5$ , и  $b=-1,57$ . С увеличением высоты сбрасывания сферы энергетические потери при начальном ударе о пластину возрастают, поэтому параметр затухания  $b$  и градиент снижения скорости  $v$  повторных ударов с увеличением  $h$  возрастает, количество повторных ударов  $n$  с высотой уменьшается. На рис.1, в показаны полученные экспериментальные результаты возрастания размаха сигнала от начальной скорости при ударе, зависимость описывается линейной функцией с корреляцией  $k=0,95$ . Амплитудные параметры не являются достаточно устойчивыми, поэтому в дальнейшем анализируется среднеквадратическое отклонение каждого зарегистрированного единичного сигнала на начальном отрезке 75 мкс, что увеличивает достоверность до  $k=0,97$ .



**Рис.1.** (а) – экспериментальная установка: 1 – пластина толщиной 8 мм,

2 – место установки тензорезистора, 3 – место соударения тел,

(б) – высоты  $h_i$ , для сферы  $d = 6$  мм, (в) – зависимость размаха  $R$  АЭ сигнала от высоты сбрасывания  $h_i$  и скорости  $v$ , м/с в начальный момент удара

Предложенные источники акустико-эмиссионных сигналов позволяют получить акустические сигналы с постоянной амплитудой, направленностью и частотным распределением, что может быть использовано для совершенствования средств калибровки АЭ систем и разработки новых способов калибровки ПАЭ.

### Список литературы

1. Bekher, S. Development of methodology for the calculation and experimental investigation of acoustic emission signals / S. A. Bekher, and T. V. Sych// AIP Conf. Proc. 1915, 020001-1–020001-5.
2. ГОСТ Р 52727-2007 Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования. - Введ. 2007-10-01. - М.: Стандартинформ, 2007. - 18 с.
3. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов, РД 03-300-99, 01.10.1999 г.
4. Петерсен, Т.Б. Акустическая эмиссия при соударении твердых тел. Часть 1 / Контроль. Диагностика. - 2010. - № 2. - С. 18-24.

## ЭМПИРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ

<sup>1</sup>Науменко А.П., <sup>2</sup>Язовский А.В.

1. ФГБОУ ВО Омский государственный технический университет

2. ООО «Нефтехимремонт», Омск, Россия,

[alexpn@oport.ru](mailto:alexpn@oport.ru)

Основу алгоритмов выделения и анализа акустико-эмиссионных (АЭ) сигналов составляют опорные или эталонные параметры АЭ сигналов, которые характеризуют определенные виды состояний объекта контроля. Поэтому исследование характеристик АЭ сигналов, генерируемых объектам в условиях, приближенных к реальным механизмам разрушения, является актуальной задачей [1, 2].

Исходной информацией для анализа характеристик сигналов послужили данные, полученные с помощью мобильной АЭ системы контроля при проведении гидроиспытаний газового баллона БГА 190. В процессе контроля фиксировались параметры АЭ импульсов и сигналы (рис. 1, 2).

По результатам визуального и измерительного контроля перед испытаниями был обнаружен подрез в центре продольного шва обечайки баллона глубиной 2 мм и длиной 8 мм. Также по результатам рентгеновского контроля было обнаружено скопление пор в месте соединения продольного шва обечайки и кольцевого шва приварки днища длиной 25 мм, максимальный диаметр пор составляет 4 мм. Оба этих дефекта являются недопустимыми для данного объекта контроля.

Процесс нагружения проходил в четыре этапа. Первый этап – набор давления до  $50 \text{ кг/см}^2$  в течение 460 с, затем постоянное давление поддерживалось в течение 600 с. Набор давления характеризуется сигналами, имеющими малые амплитуды, длительности и энергию, которые связаны с шумом при заполнении сосуда, треском деревянного основания под сосудом. Сигнал, характеризующий разрушение основного металла, отражает отрыв одного угла металлической пластины, которая содержит данные о сосуде.

Второй этап – набор давления до  $60 \text{ кг/см}^2$  в течение 216 с характеризуется в начале (в течение 60 с) резким увеличением активности АЭ, частично связанным с шумом при заполнении. В этот момент фиксируются импульсы от пластины, подреза, горловины бака и от врезки через которую ведется заполнение. Большое количество сигналов с амплитудами больше 70 дБ и частотой  $50 \pm 10 \text{ кГц}$ .

На третьем этапе осуществлялось повышение давления до  $70 \text{ кг/см}^2$  в течение 279 с, в течение которого фиксировались незначительные импульсы. На 57 с (1338 с на рис. 2) зафиксирован мощный импульс – отрыв второго угла пластины.

Четвертый этап – повышение давления до  $78 \text{ кг/см}^2$  в течение 135 с, при этом резко возрастает АЭ активность. В течение 90 с наблюдалось относительное затишье, затем последовала серия мощных импульсов и на 132с (1692 с на рис. 2) в течение секунды произошло разрушение сварного шва врезки горловины в месте максимальной деформации (как выяснилось впоследствии, шов выполнен с конструктивным непроваром с внутренней стороны сосуда).

Статистический анализ параметров АЭ сигналов позволил определить диапазоны амплитуд, энергетических параметров и длительностей, соответствующие стадиям разрушения ОК (табл. 1) и максимумы распределения значений (табл. 2).

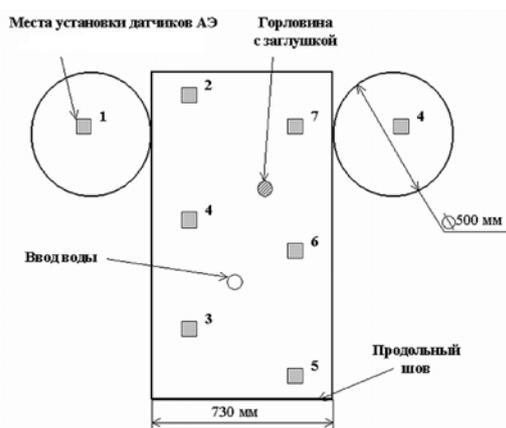
Процесс разрушения характеризуется сигналами, которые зафиксированы за  $20\text{--}25 \text{ кг/см}^2$  до начала разрушения. Следует принять во внимание слишком быстрый набор давления. Собственно процесс разрушения длился около 40 с. Постоянный сигнал (начало течи) в течение 1 с фиксируется лишь в момент разрушения, а перед этим зафиксирована серия сигналов длительностью 60–80 мс.

**Таблица 1.** Диапазоны значений параметров АЭ сигналов

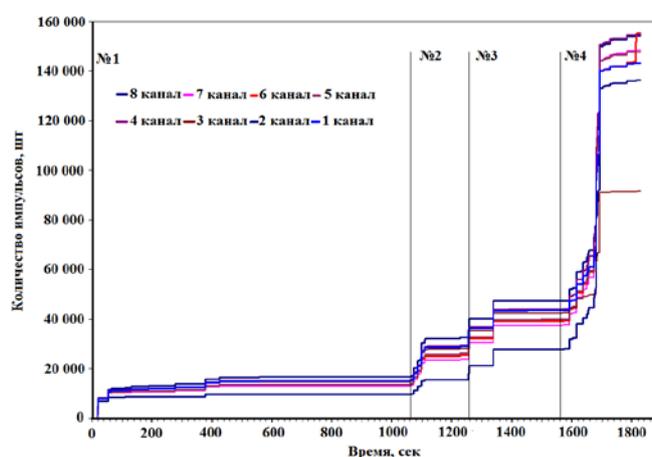
Этапы нагружения ОК	Диапазон амплитуд, дБ	Диапазон энергетических параметров, мВ·мс.	Диапазон длительностей, мс
1 этап	65...90	25...400	27...66
2 этап	62...87	25...75	27...66
3 этап	88...90	325...425	66
4 этап	60...90	25...500	32...66

**Таблица 2.** Максимумы распределения значений параметров АЭ сигналов

Этапы нагружения ОК	Максимум амплитуд, дБ	Максимум энергетических параметров, мВ·мс.	Максимум длительностей, мс
1 этап	71	25	66
2 этап	71	25	66
3 этап	89	375	66
4 этап	75	25	66



**Рис. 1.** Схема установки датчиков на баллоне



**Рис. 2.** Суммарное количество импульсов по каналам

Из анализа статистических характеристик параметров АЭ сигналов видно, что наиболее информативным параметром при определении процесса разрушения сосуда высокого давления является зависимость накопленного числа импульсов АЭ от нагрузки. Характерным является показательный или экспоненциальный характер графика накопленного числа импульсов. Именно четвертый этап нагружения отличается от других этапов наличием очень большого количества АЭ сигналов от дефекта со значительными величинами всех параметров. При критическом росте трещины возникают потоки АЭ импульсов, которые накладываются друг на друга, что приводит к выделению импульсов большой длительности. Поэтому для выделения таких потоков необходимо использовать автоматический алгоритм изменения порога дискриминации импульсов.

1. Неразрушающий контроль. Том 7. Справочник. Под общ. ред. В.В. Клюева. Кн. 1. Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. – Машиностроение, 2006. 829 с.
2. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Ивлиев и др. – Новосибирск, Наука, 2011. – 272с.

## КОНТРОЛЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Бардаков В.В.<sup>1</sup>, Сагайдак А.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Интерюнис-ИТ», Москва, РФ

[bardakovvv@interunis-it.ru](mailto:bardakovvv@interunis-it.ru)

<sup>2</sup> АО «НИЦ «Строительство», Москва, РФ

Надежности и безопасности существующих инфраструктурных объектов (мосты, стадионы и т.д.) в последнее время уделяется все больше и больше внимания [1]. Ко многим из подобного рода объектов предъявляются требования повышенной безопасности, поскольку они были построены еще во второй половине прошлого века и, в ряде случаев находятся в неудовлетворительном состоянии. Одним из ключевых конструктивных элементов данных конструкций являются балочные железобетонные элементы, «работающие» на изгибные нагрузки. Традиционно оценка технического состояния железобетонных конструкций осуществлялась на основе визуальных испытаний или периодического контроля. Однако подобного рода контроль не позволяет фиксировать резкие изменения в состоянии конструкции между осмотрами, является крайне трудоемким, а также имеет низкую достоверность [2]. В связи с этим, актуальной задачей является проведение мониторинга подобного рода объектов. Перспективным методом, который может справиться с данной задачей является метод акустической эмиссии (АЭ).

В ходе выполнения данной работы, был проведен ряд экспериментальных исследований по испытанию железобетонных балок на трехточечный изгиб циклически увеличивающейся нагрузкой, вплоть до разрушения, с сопровождением методом АЭ. В общей сложности было испытано 6 железобетонных балок, отличающихся друг от друга составом, прочностью, а также типом армирования и, как следствие разрушающей нагрузкой. Помимо этого, также были исследованы составы с использованием фибробетона.

Анализ полученных в ходе экспериментов данных состоял из двух этапов. На первом этапе была проведена оценка результатов в соответствии с существующими методиками и подходами по оценке целостности и структурного состояния железобетонных конструкций, при помощи метода АЭ. На основании полученных результатов были выявлены достоинства и недостатки, а также определена корректность применимости существующих методик и подходов.

На втором этапе оценка результатов осуществлялась на основании самостоятельного анализа. При этом были предложены собственные подходы к анализу данных, а также оценке целостности и структурного состояния изгибаемых железобетонных конструкций при помощи метода АЭ.

### Список литературы

1. Michael C Forde, Sabrina Colombo et al. Predicting the Ultimate Load Capacity of Concrete Bridge Beams from the «Relaxation Ration» Analysis of AE Signals. Progress in Acoustic Emission XVIII. Japan. 2016. Pp. 359-364.
2. Бардаков В.В., Барат В.А., Терентьев Д.А., Чернов Д.В., Осипов К.О. Особенности применения метода акустической эмиссии при мониторинге мостовых конструкций. Контроль. Диагностика 1(211). Москва. Январь 2016. Стр. 32-39.

# АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА

Холодов С.С., Бигус Г.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия,  
[holodovs@mail.ru](mailto:holodovs@mail.ru)

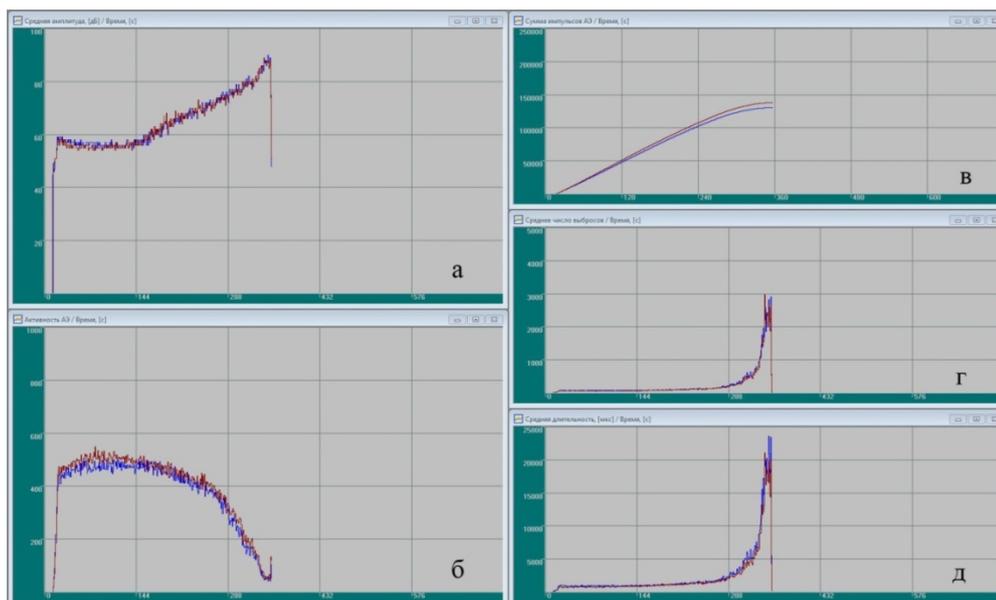
Целью исследования являлась оценка возможности применения АЭ для определения момента зарождения микротрещин в стеклопластике и прогнозирования предела прочности стеклопластика при одноосном растяжении.

Исследования проводились на бездефектных образцах стеклопластика толщиной 1,8 мм, длиной 400 мм и шириной 35 мм. Образцы вырезались из плит со схемой армирования  $[0]_4$ , изготовленных методом вакуумной инфузии на основе равнопрочной стеклорогожи STR 024/500/125 и модифицированного винилэфирного. Образцы имели форму лопатки для локализации разрушения в рабочей зоне.

Испытания образцов исследуемого стеклопластика на растяжение по ГОСТ 25.601-80 показали, что диаграмма деформирования при растяжении в направлении основы имеет квазилинейный вид вплоть до разрушения. Относительное удлинение небольшое и составляет порядка 2%, значение предела прочности находится в диапазоне от 350 до 470 МПа.

Нагружение со скоростями 2, 5 и 10 мм/мин осуществляли на универсальной электромеханической испытательной машине. Применялась АЭ система A-Line 32D (DDM). Использовались два ПАЭ GT200. В качестве среды для обеспечения акустического контакта между образцом и ПАЭ использовался пластилин.

Наибольшую информативность и качественные зависимости от времени, а как следствие от величины напряжения в образце, показали следующие параметры АЭ: амплитуда сигнала  $A$ , активность  $\dot{N}_\Sigma$ , число импульсов  $N_\Sigma$ , число выбросов сигнала  $N$ , длительность импульса  $D$ . Пример изменения указанных величин в ходе испытания представлен на рисунке 1.



**Рис. 1.** Зависимости амплитуды сигнала  $A$  (а), активности  $\dot{N}_\Sigma$  (б), числа импульсов  $N_\Sigma$  (в), числа выбросов сигнала  $N$  (г), длительности импульса  $D$  от времени при скорости нагружения 2 мм/мин

Уровень шумов на разных образцах составлял 28-29 дБ для каждого канала акустико-эмиссионной системы. Было установлено, что в момент зажатия образцов в захватах образуются интенсивные сигналы АЭ со средней амплитудой  $A$ , равной 40-57 дБ, обусловленные деформационными процессами материала на микроуровне в зоне приложения сжимающей нагрузки от захватов. Установлено, что через некоторое время происходит затухание процессов генерации сигналов акустической эмиссии. Активность АЭ  $\dot{N}_\Sigma$  через 1 минуту снижается в 20 раз, через 20 минут – в 100 раз. Таким образом, для исключения регистрации сигналов АЭ от захватов испытательной машины каждый образец выдерживали перед испытанием.

В момент начала нагружения образцов возникали дополнительные деформационные процессы материала на микроуровне, что приводило к устойчивой регистрации на начальном уровне нагружения сигналов АЭ со средней амплитудой  $A$ , равной 54-59 дБ.

При дальнейшем непрерывном монотонном нагружении со скоростью 2 мм/мин характер регистрируемых сигналов АЭ не изменяется. Первые высокоамплитудные сигналы с  $A > 90$  дБ появляются при напряжениях, составляющих 37 – 42 % от предела прочности образца. Они связаны с началом растрескивания полимерной матрицы. Данные сигналы регистрируются вплоть до разрушения образца.

Число выбросов сигналов АЭ  $N$  и длительность импульсов АЭ  $D$  резко возрастают при напряжениях более 90% от предела прочности образца. Это связано с началом отслоения волокон от матрицы и разрывом волокон. Начало данного процесса явно не выражено во времени и установить зависимость данных параметров сигналов АЭ от величины напряжения не удалось.

Анализ разрушенных образцов показал, что характер их разрушения одинаков и подтверждает сделанные выводы. Общий вид образцов после разрушения представлен на рисунке 2.

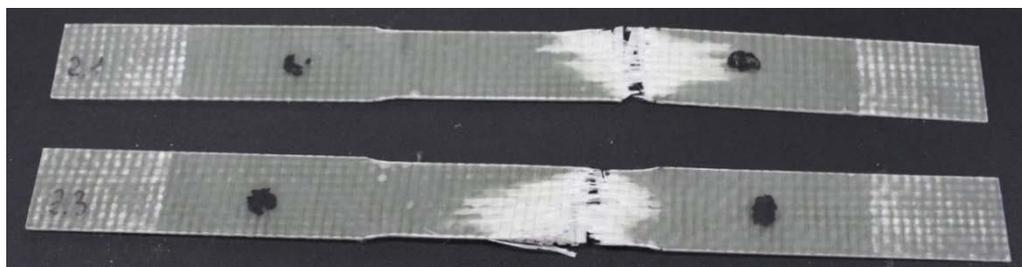


Рис. 2. Вид образцов после разрушения

Исследования показали воспроизводимость результатов при скорости нагружения 2 мм/мин. При данной скорости не регистрируются шумы от механизмов испытательной машины. При скоростях нагружения 5 и особенно 10 мм/мин регистрируются дополнительные сигналы АЭ в верхней части образца, связанные с передвижением подвижной траверсы испытательной машины. При этом кривая зависимости средней амплитуды имеет не линейный характер после точки перелома.

1. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. Диагностика технических устройств. М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014 – 615 с.
2. Переверзев Е.С., Борщевская Д.Г., Бигус Г.А., Тихий В.Г., Тремба Т.С., Лимонов В.А. Исследование характеристик прочности стеклопластика методом акустической эмиссии. Механика композиционных материалов, 1986, №5, с. 920-924.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ОБНАРУЖЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ОБРАЗЦАХ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СТАЛИ 20, ИМЕЮЩИХ ЛИТУЮ СТРУКТУРУ

Бигус Г.А., Травкин А.А.

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия,*

Целью проведенной работы являлось определение дефектоскопических признаков обнаружения усталостных повреждений методом акустической эмиссии при статическом нагружении литых объектов, изготовленных из стали 20. Литую структуру стали 20 имеет большое количество машин и механизмов, в т.ч. и ответственных, среди которых следует выделить литые детали тележки грузового железнодорожного вагона и крупногабаритную трубопроводную запорную арматуру.

Для разработки дефектоскопических признаков обнаружения усталостных повреждений были проведены экспериментальные исследования, в задачи которых входило выращивание усталостных трещин в образцах под действием циклических нагрузок и испытание образцов с усталостной трещиной в условиях квазистатического нагружения. Экспериментальные работы проводились на базе кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана на установке, в состав которой входила разрывная машина Instron 300DX, акустико-эмиссионная система ALine-32D, экстензометр для определения локальных деформаций.

Первый этап экспериментальных исследований – циклические испытания образцов – моделировал процесс развития усталостных трещин в конструкции под действием эксплуатационных нагрузок. Образцы для испытаний были вырезаны из объекта, имеющего литую структуру, и подвержены механической обработке. В рабочей области образца эрозионным способом был нанесен концентратор напряжения, моделирующий металлургический дефект в объекте, изготовленном литьем.

На образец на расстоянии 60 мм. от концентратора напряжений были установлены широкополосные преобразователи акустических эмиссии марки GT300, принимающие сигналы в процессе испытаний.

Начальный этап циклических испытаний соответствовал накоплению повреждений в области концентратора. Данные процессы генерируют акустико-эмиссионные сигналы с амплитудами не превышающими амплитудного порога дискриминации. Начиная с некоторого количества циклов, система фиксирует сигналы с амплитудами выше амплитудного порога дискриминации. Детальный анализ этих сигналов показал, что они регистрируются каждые 15 секунд, что соответствует времени одного цикла при значении нагрузки, составляющей 80% от максимального значения нагрузки цикла. На основании данных фрактографического анализа было обнаружено, что данные сигналы соответствуют процессу распространения усталостной трещины на величину усталостной бороздки, составляющей 0,25 мкм.

Таким образом, подсчет количества сигналов позволяет контролировать приращение усталостной трещины в режиме реального времени. Регистрация сигналов акустической эмиссии от роста трещины позволила определить пороговый коэффициент интенсивности напряжений. Значение коэффициента интенсивности напряжений  $K_{AЭ}$ , определяемое значением нагрузки, при которой регистрируются сигналы акустической эмиссии, соответствует пороговому коэффициенту интенсивности напряжений  $K_{th}$ . Оценка порогового коэффициента интенсивности напряжений по результатам эксперимента дает следующие результаты:  $K_{th} = 16,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

Второй этап экспериментальных исследований, включающий статические испытания образцов с усталостными трещинами, моделировал создание локального напря-

женно-деформированного состояния в вершине усталостной трещины, возникающего при проведении акустико-эмиссионного контроля. В процессе проведения акустико-эмиссионного контроля эксплуатационные циклические нагрузки заменяются статическим нагружением. Максимальное напряжение при статических испытаниях, как правило, на 25% превышает максимальные напряжения при рабочих нагрузках. Было обнаружено, что минимальный размер усталостного повреждения в образце из стали 20, выявляемого при статических испытаниях методом акустической эмиссии, составляет 0,25 мм.

Были определены дефектоскопические признаки определения усталостной трещины минимального размера в условиях статических испытаний. К ним относится регистрация сигналов акустической эмиссии в процессе предварительного статического нагружения, регистрация сигналов акустической эмиссии при превышении статических напряжений уровня, соответствующего циклическим испытаниям, наличие сигналов при сбросе нагрузки.

В процессе проведения экспериментальных исследований на основании данных спектрального анализа сигналов акустической эмиссии от роста усталостной трещины при статических испытаниях на разных этапах ее развития было обнаружено увеличение доли высокочастотной составляющей по мере развития усталостного повреждения. Таким образом, определив коэффициент равный отношению спектральной плотности сигнала акустической эмиссии, приходящейся на высокочастотную составляющую, к спектральной плотности сигнала приходящейся на низкочастотную составляющую, представляется возможным определять размер усталостного повреждения.

С помощью вейвлет-анализа было установлено, что при распространении трещины происходит излучение симметричной и антисимметричной волн Лэмба нулевого порядка. Излучение симметричной волны Лэмба нулевого порядка происходит на частоте 412 кГц, излучение антисимметричной волны Лэмба нулевого порядка – на частоте 125 кГц.

### **Выводы**

При проведении работы получены следующие основные результаты:

1. С помощью данных акустической эмиссии была произведена регистрация процесса распространения трещины. Для усталостного механизма распространения повреждения (приращение длины трещины на величину шага бороздки за каждый цикл) для образца, имеющего литую структуру стали 20, характерно генерирование по одному сигналу акустической эмиссии амплитудой 45 - 47 дБ в пределах каждого цикла при достижении коэффициента интенсивности напряжений значения  $K_{th} = 16,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

2. При проведении экспериментальных исследований было установлено появление и постепенное преобладание высокочастотной составляющей в спектре сигнала акустической эмиссии от усталостной трещины по мере увеличения её длины.

3. С помощью вейвлет - анализа было установлено, что волновой пакет, излучаемый усталостной трещиной, состоит из симметричной и антисимметричной волн Лэмба нулевого порядка, имеющих различные частотные характеристики и значения фазовой скорости.

4. Было исследовано поведение образцов с усталостными трещинами, подвергавшихся статическим нагружениям. Определен минимальный размер усталостного повреждения, выявляемого в условиях статических испытаний. Определена связь между усталостным повреждением, характеризуемым линейными размерами, и параметрами процесса излучения акустических волн от усталостной трещины в процессе статических испытаний. Получены критерии обнаружения усталостной трещины в процессе статических испытаний.

## АНАЛИЗ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПОМОЩИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Костенко П.П., Терентьев Д.А., Барат В.А.

ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ», Москва

Определение состояния и степени износа трубопроводов является важной задачей, как в целях обеспечения безопасной эксплуатации, так и в целях оптимизации ремонтных расходов. Одной из основных причин аварий является их коррозионный износ и, как следствие, утонение и разрушение стенок. В качестве количественной характеристики коррозионного износа применяются значения остаточной толщины стенки объекта и площади коррозионных повреждений.

Компанией «ИНТЕРЮНИС-ИТ» был разработан метод для контроля значения интегральной толщины в области между двумя акустическими датчиками, установленными на объекте на дистанции от 1 до 50 м друг от друга [1]. Метод основан на явлении зависимости групповой скорости волн Лэмба от произведения частоты сигнала и толщины стенки. Для определения интегральной толщины объекта необходимо установить по краям контролируемого отрезка 2 акустических датчика, излучить одним из датчиков сигнал в объект и принять его другим, рассчитать спектрограмму принятого сигнала, выявить на ней дисперсионные кривые и сравнить их с теоретическими, соответствующими различным значениям толщины стенки объекта на отрезке между датчиками.

Ввиду сильной зашумленности сигналов и зачастую неполном проявлении дисперсионных кривых эта операция плохо поддается автоматизации и её приходится производить вручную, что значительно осложняет и замедляет обработку больших объемов данных. Так, усовершенствование процесса обработки спектрограмм играет важную роль для развития метода интегральной толщинометрии. Для выявления дисперсионной картины в данной работе была использована искусственная нейронная сеть.

Эффективным решением для задачи классификации шумовых и полезных сигналов представляется использование свёрточной нейронной сети – специальной архитектуры, нацеленной на эффективное распознавание изображений [2]. При подаче на вход сети изображений спектрограмм сигналов, сеть производит классификацию спектрограмм на имеющие дисперсионные кривые и не имеющие. Обученная свёрточная сеть правильно определила наличие дисперсионных кривых у 95% спектрограмм тестовой выборки.

Затем на спектрограммах, выделенных на первом этапе, для определения интегральной толщины используется сеть прямого распространения, многослойный перцептрон [3], обученный на основе спектральных параметров распознавать интегральную толщину объекта контроля.

В результате работы значительно упрощен процесс обработки данных при использовании метода интегральной толщинометрии. Получен опыт обработки данных акустической эмиссии с помощью искусственных нейронных сетей.

1. Терентьев Д.А. Интегральная толщинометрия. В мире НК.2014,№1.С.59-62.
2. Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio, P. Haffner. Gradient-based learning applied to document recognition. Proc. Of the IEEE, 1998.
3. С. Хайкин. Нейронные сети: Полный курс: Издание второе, исправленное: Пер. с англ. Университет McMaster. Гамильтон, Онтарио, Канада. Издательский дом «Вильямс», 2008

## О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПАЭ

**\*Иванов В.И., \*\*Сазонов А.А., \*\*Шелобков В.И.**

\*НИИИИИ МНПО «Спектр», [ivi444@mail.ru](mailto:ivi444@mail.ru),

\*\*ГИАП ДИСТЦентр, [gdc@giapdc.ru](mailto:gdc@giapdc.ru),

Москва, Россия

Преобразователь акустической эмиссии (ПАЭ) является критическим элементом канала прохождения информации от источника АЭ к выходу блоков обработки сигналов и представления результатов диагностирования. Несмотря на уже более, чем полувековое использование пьезоэлектрических преобразователей в практике АЭ контроля и диагностики, ПАЭ все еще в большой степени представляют собой, если не «черный», то «серый ящик». «Серость» связана не столько со свойствами только самого ПАЭ, сколько с необходимостью рассматривать влияние волновых характеристик объекта контроля на параметры и характеристики самого ПАЭ.

Ограниченность знания характеристик и параметров ПАЭ вносит большую неопределенность в интерпретацию результатов диагностирования и оценку степени опасности дефектов, являющихся источниками АЭ. Возникает ряд проблем, касающихся объема и достоверности извлекаемой при АЭД информации. Сколько и какую информацию мы теряем в ПАЭ - это задача, которая определяет результативность диагностирования и влияет на безопасность как во время выполнения испытаний, так и на безопасность дальнейшей эксплуатации контролируемого объекта. В этой связи необходимо оценивать качество и количество информации теряемой при прохождении сигнала АЭ через ПАЭ.

Любой четырехполюсник, к которым можно отнести и ПАЭ, можно описать пятью способами: дифференциальным уравнением; переходной характеристикой; импульсной характеристикой (ИХ); передаточной функцией; совокупностью амплитудно- и фазово-частотных характеристик (АЧХ, ФЧХ). Несмотря на такое разнообразие характеристик наиболее часто используются АЧХ, несмотря на то, что АЧХ без ФЧХ можно считать «инвалидной» характеристикой [1]. ФЧХ при калибровке ПАЭ с использованием твердотельных блоков не определяются. А однозначная связь АЧХ с ФЧХ имеет место только для минимально-фазовых систем, тогда как волновая система ПАЭ-объект диагностирования не является таковой. До сих пор в паспортах ПАЭ представлены только амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) в виде зависимости  $U(f)$  [В(Гц)]. Некоторые фирмы представляют чувствительность ПАЭ в размерности [В/МПа]. При этом неизвестно каким образом получены величины давления и в какой среде эти давления измерены.

К сожалению наиболее адекватный метод описания ПАЭ с использованием импульсных характеристик, предложенный в РД 03-300-00 [1, 2], пока не используется в должной мере.

ПАЭ во многом определяет класс аппаратуры метода АЭ, выводя ее из класса относящегося к средствам измерения. Это связано с большой степенью неопределенности параметров сигналов на входе и выходе ПАЭ и диапазона изменения параметров сигналов АЭ в объекте. При большом разбросе и неопределенности параметров входных сигналов, обусловливаемом каналом распространения сигналов АЭ и волновыми свойствами ПАЭ, жесткие требования к погрешностям измерения параметров сигналов становятся излишними.

Можно констатировать, что до сих пор фактически не определен адекватный метрологический статус АЭ систем, а также их составляющих, в частности ПАЭ. Кроме того, отсутствует единообразие в методиках аттестации (калибровки?, поверки?) ПАЭ. Представляется, что аппаратура АЭ должна быть отнесена к классу информационно-

диагностических систем и поэтому системы АЭ и ПАЭ, как важные составляющие аппаратуры, должны проходить калибровку и проверку работоспособности, но не поверку.

В отличие от уровня понимания работы преобразователей (вибродатчиков) в вибродиагностике, понимание работы ПАЭ находится на более низком уровне. Так для вибродатчиков имеет место четкая классификация их на виброметры, велосиметры и акселерометры. Считается, что сигналы на выходе виброметров соответствуют перемещению поверхности контролируемого объекта в месте установки датчика вибрации, велосиметры дают информацию о скорости этого перемещения, а акселерометры – об ускорении. Сложнее с пьезо-преобразователями в АЭ, которые находят преимущественное применение в практике АЭД. Для них определенно можно говорить относительно связи величины выходного сигнала с параметром перемещения (скорости или ускорения) только для определенных конструкций ПАЭ, а также условий приема сигналов, режима согласования выхода ПАЭ и входа усилителя прибора.

Можно задать вопрос – как электрический сигнал, получаемый на выходе ПАЭ, связан с параметрами колебаний частиц среды в акустической волне? А именно – этот сигнал соответствует перемещению частиц среды, скорости этих частиц или ускорению, или ни тому, ни другому, ни третьему? В статье [3] авторы считают, что на выходе ПАЭ с сильно демпфированным пьезоэлементом в виде пирамиды NIST, который используется преимущественно для калибровки других ПАЭ, имеем сигнал, соответствующий скорости смещения частиц среды.

Принципиальное отличие ПАЭ от вибродатчиков состоит в том, что ПАЭ являются акустическим устройством, которое описывается волновыми характеристиками, тогда как вибродатчики являются условно сосредоточенными элементами, что существенно упрощает анализ этих устройств. Волновые свойства ПАЭ связаны с тем, что длины волн принимаемого АЭ сигнала соизмеримы с размерами активного элемента ПАЭ. Кроме того, волновые и размерные свойства ПАЭ проявляются в апертурном эффекте.

При описании информационных возможностей ПАЭ по мнению авторов доклада должны использовать параметры импульсной характеристики (ИХ), поскольку ИХ, наглядно отображая все необходимые для оценки источников АЭ параметры ПАЭ, в то же время могут быть получены достаточно простыми измерениями. В последнее время в зарубежной литературе большое внимание уделяется анализу импульсных характеристик ПАЭ, как это сделано в статье [4]. При этом заявлено (без особых доказательств), что разные типы ПАЭ выдают на выходе сигналы отображающие, как скорости, так и ускорения частиц среды в волне. Представляется целесообразным разобраться в этом вопросе и выработать соответствующие рекомендации.

### Список литературы

1. Иванов В.И., Барат В.А., Акустико-эмиссионная диагностика: справ. М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 368 с.
2. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов. РД 03-300-99.
3. Glaser S.D., Weiss G.G. Body waves recorded inside an elastic half-space by an embedded, wideband velocity sensor. *J. Acoust. Soc. Am.* **104** (3), Pt. 1, September 1998. 1404-1412.
4. Ono K., Cho I. and Matsuo T. Transfer Functions of Acoustic Emission Sensors. *J. Acoust. Emiss.* 26, 72-90 (2008).

## АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСУДОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Быков С.П., Скрябиков И.Н.

*АО «ИркутскНИИхиммаш»*

На предприятиях химической промышленности используется оборудование, изготовленное из полимерных и композитных материалов. Преимуществом использования такого оборудования является то, что оно способно работать с агрессивными средами, практически не взаимодействуя с ними. В ряде случаев использование полимерных и композитных материалов обусловлено технологическими процессами, в которых наличие металлов и их солей недопустимо.

Среди конструкционных полимеров выделяют однородные, незаполненные пресмассы и композиты на основе смол с наполнителями в виде тканей, волокон и листовых материалов. Нами были проведены исследования на изделиях из материалов, входящих в обе обозначенные группы. К первой относится полипропилен, ко второй — композитный стеклопластик, усиленный эпоксидной смолой.

Проблема длительной эксплуатации такого оборудования заключается в изменении свойств полимеров под действием внешних факторов: температуры, давления, ультрафиолета, агрессивности среды и т.п. [1]. Следствием таких воздействий является образование локальных неоднородностей структуры (растрескивание, расслоение) и выход объекта из строя.

Коррозионная стойкость не всегда является характеристикой, определяющей ресурс эксплуатации. Процессы старения, накопления повреждений и замедленного разрушения могут привести к отказам и существенно сократить срок безопасной службы.

Ввиду отсутствия общепринятых методик диагностирования и неразрушающего контроля, позволяющих достоверно определить состояние данного оборудования и дать заключение о возможности его дальнейшей эксплуатации, возникла необходимость в проведении комплексных исследований с применением акустико-эмиссионного (АЭ) метода. Для проведения исследований были использованы два аппарата: один аппарат выполнен из стеклопластика, другой — из полипропилена.

Исследуемые аппараты были изготовлены немецкой фирмой «Laudon-Lehmann» и находились в эксплуатации более двадцати лет. Согласно литературным данным, нормативный срок службы таких аппаратов составляет  $10^5$  часов (11,5 лет) с момента изготовления.

Сосуд, изготовленный из полипропилена PPL-Vestolen P6422/DIN16963, состоял из сварной цилиндрической обечайки, приварного плоского днища и плоской крышки, толщина стенки - 9 мм (обечайка), диаметр – 400 мм, высота – 700 мм. Сосуд из стеклопластика W45 DIN 16946, усиленного эпоксидной смолой, имел цельнонамотанную обечайку, эллиптическое днище и приварную эллиптическую крышку с обжатой горловиной, толщина стенки данного сосуда – 12 мм, диаметр – 520 мм, высота обечайки – 1400 мм.

Перед проведением испытаний на заполненных водой аппаратах проведены работы по калибровке и определены акустические характеристики: скорость распространения волн и ослабление сигнала. Большое влияние на результаты калибровки оказывают: характеристики имитатора (способ создания возмущения, повторяемость и т.п.), соотношение размерных характеристик возмущения и объекта контроля (длина волны - толщина), а так же способ регистрации импульса. Получение осциллограмм АЭ-сигналов позволяет подойти к решению задачи определения местоположения источника с позиции более тонкого анализа АЭ-излучения, основанного на современных мето-

дах обработки сигналов, одним из таких методов является анализ сигналов на основе вейвлет-преобразований.

Результатом непрерывных вейвлет-преобразований является трехмерное частотно-временное представление сигнала, которое увеличивает объем информации о нем и дает данные как о временных, так и о спектральных особенностях сигнала [2].

Применение вейвлет-технологий позволяет не только решать методические вопросы калибровки и регистрации сигналов АЭ, но и получать по минимальному количеству калибровочных сигналов дисперсионные кривые для волн Лэмба, хорошо совпадающие с данными расчетов.

Анализ результатов испытания аппарата, изготовленного из полипропилена, показывает, что амплитуды АЭ-сигналов в процессе подъема давления оставались в одном диапазоне значений (от 40 дБ до 80 дБ), который можно охарактеризовать как средний, активность низкая. Применение локально-динамического критерия к зарегистрированным сигналам позволяло классифицировать источники излучения на всех этапах нагружения.

Анализ локационной карты показывает, что, несмотря на низкую активность материала в процессе разрушения, локализация источников в основном совпала с зоной разрушения в районе шва приварки разъемного фланца к корпусу.

После проведения гидроиспытаний из аппарата были изготовлены образцы для растяжения на разрыв. Испытания образцов сопровождалась АЭ-контролем. В ходе испытаний гладких образцов (без концентраторов) сигналы АЭ практически отсутствуют, а процесс деформирования до разрушения дает относительное удлинение порядка 500%. При наличии острого концентратора (надреза) пластическое деформирование образца отсутствует, разрушение становится практически хрупким (относительное удлинение не превышает 2%), в процессе разрушения генерируются высокочастотные импульсы АЭ.

Анализ данных АЭ-контроля при гидроиспытаниях аппарата, изготовленного из стеклопластика, показывает, что сигналы АЭ регистрировались на протяжении всего испытания из локализованной зоны разрушения. Выполнена оценка опасности источников АЭ в соответствии с локально-динамическим критерием.

Стеклопластик имеет высокую эмиссивность, характер и активность сигналов АЭ хорошо отражают динамику процесса разрушения. Класс источников в процессе испытания менялся от первого до четвертого (катастрофически опасный) по локально-динамическому критерию, согласно ПБ 03-593-03.

По аналогии с предыдущим из данного аппарата были изготовлены образцы и испытаны на разрыв с использованием метода АЭ. Результаты испытания образцов подтвердили высокую эмиссивность стеклопластика и акустические характеристики, обеспечивающие контролепригодность методом АЭ.

В результате исследований, выполненных на образцах и сосудах, предложен способ определения скорости распространения акустических импульсов в объекте контроля с использованием вейвлет-преобразований, способ оценки ослабления импульсов, разработана методика контроля действующего оборудования из полимерных материалов на основе метода АЭ.

### **Список литературы**

1. Эмануэль Н.М., Бучаченко А.Л. Химическая физика старения полимеров, М.:Наука, 1984, 342с.
2. Астафьева Н.М. Вейвлет анализ. Основы теории и примеры применения. Успехи физических наук.1996,т.166, №11.

# ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ «АЕ STRATEGY»

Шитов Д. В., Жуков А. В.

ООО «Стратегия НК», г. Екатеринбург, Россия  
[22sdv@strategnk.ru](mailto:22sdv@strategnk.ru)

Вероятность выявления опасных дефектов при акустико-эмиссионном контроле зависит от множества факторов: квалификации специалиста АЭ, правильности выбора рабочего частотного диапазона, выбора преобразователя, настройки АЭ оборудования, оценки свойств акустического тракта, выбора критерия оценки АЭ источника и т.д.

Отсутствие рекомендаций по настройке оборудования приводит к тому, что результат АЭ контроля во многом зависит от опыта и личного мнения оператора АЭ контроля. Данный факт создаёт ситуации, когда разные специалисты на одном и том же объекте при одинаковых условиях испытаний получают различные результаты контроля.

Для обеспечения единого подхода при АЭ контроле магистральных газопроводов научным центром ООО «Газпром ВНИИГАЗ» совместно с ООО «Стратегия НК» разработана «Методика проведения акустико-эмиссионного контроля магистральных газопроводов ПАО «Газпром».

На основании Методики [1], с учётом требований нормативной документации [2], для получения достоверных результатов АЭ контроля ООО «Стратегия НК» разработало программное обеспечение (ПО) «АЕ Strategy. Pipeline», позволяющее решать следующие задачи:

- 1) разработка технологии контроля (карты контроля), включающей в себя:
  - вычисление параметров настройки АЭ систем на основе исходных данных об объекте контроля;
  - выбор оптимального преобразователя АЭ;
  - расчет допустимого расстояния между преобразователями;
- 2) автоматическая фильтрация данных АЭ контроля;
- 3) автоматическое определение местоположения дефекта и его классификация по степени опасности;
- 4) подготовка отчетной документации по АЭ контролю.

Алгоритмы вычисления параметров настройки АЭ системы основываются на данных об объекте контроля, законах затухания волн [3] с учётом особенностей их распространения в объекте [4]. По результатам анализа исходных данных пользователь в реальном времени получает готовую «Технологию контроля» на основе которой выполняются работы.

ПО «АЕ Strategy.Pipeline», в реальном времени информирует специалиста о последовательности выполняемых операций и даёт рекомендации в случае отклонений от предложенной технологии контроля.

Разработанное программное обеспечение «АЕ Strategy.Pipeline», позволяет унифицировать проводимые работы по АЭ контролю однотипных объектов, автоматизирует процесс обработки данных, снижает вероятность возникновения ошибки из-за неверных параметров АЭ системы, обеспечивает возможность слежения за источниками АЭ при периодическом контроле, снижает трудозатраты.

## Список литературы

1. Методика проведения акустико-эмиссионного контроля магистральных газопроводов ПАО «Газпром».

2. ПБ 03-593-03 «Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов».
3. Жарков К.В., Меркулов Л.Г., Пигулевский Е.Д. Затухание нормальных волн в пластине со свободными границами. //Акустический журнал. 1964, том X, вып.2, с.163-166.
4. Pollock A. Metals handbook. Vol. 17, ASM International, 1989, с.278-294.

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ НА КЕМЕРОВСКОМ АО «АЗОТ»**

**Медведев А.Г., Малайков Д.Б.**

*КАО «Азот», Цех по техническому диагностированию  
опасных производственных объектов (ЦТД ОПО),  
г. Кемерово, Россия  
[ursa1975@mail.ru](mailto:ursa1975@mail.ru)*

Обеспечение промышленной безопасности при эксплуатации основных производственных фондов – одна из остро стоящих проблем в России. Особенно актуально это для промышленных предприятий, производственные мощности которых построены до конца семидесятых - середины восьмидесятых годов. В настоящее время в КАО «Азот» эксплуатируется технологическое оборудование, начиная от изготовленного в пятидесятых годах и заканчивая современным оборудованием импортного и отечественного производства, смонтированным в последние годы и включает на сегодняшний день только зарегистрированных сосудов и трубопроводов более четырех тысяч единиц.

Надежность и безопасность работы опасных производственных объектов обеспечивается целым комплексом мероприятий и, в том числе, средствами и методами неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД). Акустико-эмиссионный (АЭ) контроль является одним из самых эффективных методов НК.

В докладе представлен и обобщен опыт практического применения АЭ метода контроля цехом по техническому диагностированию опасных производственных объектов (ЦТД ОПО) КАО «Азот». Особый акцент сделан на работы по АЭ контролю особо сложных технических объектов, таких как корпус внутренней оболочки изотермических резервуаров (ИР) для хранения жидкого аммиака вместимостью 10000 тонн, проводимые в процессе их полного технического освидетельствования согласно РД 03-410-01 [1].

Проведен и дан анализ результатов АЭ контроля на примере изотермического резервуара, позиция 1, выполненного в сентябре 2016 года. Отдельные фрагменты выполненной работы по АЭ контролю ИР представлены и проиллюстрированы в докладе.

Учитывая опыт предыдущих обследований ИР и требования нормативных документов [1, 2], была разработана программа работ комплексного технического освидетельствования, учитывающая технические и организационные возможности ЦТД. Основными диагностическими методами в программе работ комплексного технического освидетельствования определены МК (МПП) и АЭ. По результатам выполненных работ определены зоны концентрации напряжений (ЗКН) и зоны повышенной активности АЭ и назначен дополнительный НК.

При реализации программы разработана оригинальная схема расстановки ПАЭ, учитывающая количество имеющихся в наличии акустико-эмиссионных систем и каналов и конструкцию ИР. При этом обеспечен допустимый уровень чувствительности контроля при использовании ПАЭ резонансной частотой 150 кГц.

В результате разработанных мероприятий АЭ контроль ИР (днище, уторный шов, стенка) был выполнен за три пневматических испытания по два нагружения в каждом, с максимальным использованием до 85 ПАЭ при интервале между испытаниями минимум 24 часа. В результате проведения АЭ контроля были обнаружены зоны повышенной активности АЭ – «активные» источники акустической эмиссии – источники II класса. Выявленные зоны были назначены для проведения дополнительного обследования другими методами НК и последующего ремонта.

Накопленный специалистами УКП ЦТД опыт, позволил при последнем обследовании ИР существенно сократить количество нагружений и в целом уменьшить сроки проведения диагностических и ремонтных работ без потери качества контроля технического состояния. К настоящему времени ЦТД отработана технология проведения технического освидетельствования и неразрушающего контроля ИР, как единый комплекс работ, где акустико-эмиссионный метод занимает одну из ключевых позиций [3, 4]. С 1998 по 2016 годы было проведено семь обследований ИР предприятия с применением акустико-эмиссионного метода.

С 1993 по 2018 годы специалистами ЦТД методом акустической эмиссии было проконтролировано 3275 сосудов, 129 хранилищ, 99 аппаратов колонного типа, 434 технологических трубопровода разной протяженности. Выполнялись экспериментальные и технически сложные работы: мониторинги сложных объектов с дефектами, оценка и сравнение акустического шума в камерах аппаратов. Эффективным на предприятии метод АЭ стал для поиска течей в арматуре, обвязках трубопроводов компрессоров, теплообменных аппаратах, в экранных трубах котлов, для поиска потери вакуума в больших системах и перетоков.

## Список литературы

1. РД 03-410-01. Инструкция по проведению комплексного технического освидетельствования изотермических резервуаров сжиженных газов. Утв. постановлением Госгортехнадзора России от 20.07.01 № 32.
2. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. Утв. постановлением Госгортехнадзора России от 09.06.03 № 77.
3. Губарев Н.Н., Стенин Г.Д. О проведении и результатах НК сварных соединений внутренней оболочки изотермического хранилища жидкого аммиака. – В мире неразрушающего контроля. 2009. № 4(46). С. 74-76.
4. Губарев Н.Н., Стенин Г.Д. Результаты неразрушающего контроля сварных соединений внутренней оболочки изотермического хранилища жидкого аммиака. – Химическая техника. 2008. № 9. С. 14-17.

## О РОЛИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

**Башков О.В.**

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет,  
Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация,  
[bashkov@knastu.ru](mailto:bashkov@knastu.ru)*

Акустическая эмиссия как метод оценки состояния используется еще со второй половины прошлого века. Однако достоверность метода существенно зависит от правильности интерпретации результатов и, в частности, идентификации источников акустической эмиссии. Акустическую эмиссию используют при проведении испытаний оборудования, работающего под давлением и во многих других отраслях промышленности. Основным достоинством метода акустической эмиссии является оценка только развивающихся дефектов не по их размерам, а по степени опасности их развития. Таким образом, метод акустической эмиссии может являться одним из методов оценки структурного состояния материалов и технического состояния изделий, из которых они изготовлены.

Большинство критериев оценки опасности развивающихся дефектов, положенные в основу нормативно-технической литературы, были разработаны еще на заре развития метода акустической эмиссии. Критерии были в основном направлены на анализ волн акустической эмиссии, порождаемых развитием трещин в металлических материалах, как правило, углеродистых сталей. Разрушение данных материалов достаточно хорошо теоретически описано. Однако, все более активное использование новых материалов, к числу которых относятся сложные сплавы, композиционные материалы, структурированные материалы, требует новых подходов к разработке критериев поврежденности и использовании параметров акустической эмиссии к анализу источников акустической эмиссии.

В Комсомольском-на-Амуре государственном университете много лет развивается направление, затрагивающее вопросы идентификации источников акустической эмиссии при деформации и разрушении различных материалов, в числе которых стали, материалы авиационного назначения (алюминиевые, титановые сплавы), структурированные материалы, структурно-неоднородные материалы, композиционные полимерные материалы.

Для идентификации источников акустической эмиссии применяются подходы с комплексным использованием нескольких параметров акустической эмиссии, в числе которых анализ энергетических и частотных параметров акустической эмиссии. Каждый из используемых параметров несет информацию о типе развивающегося дефекта (источника), его скорости, размерах. При совокупном анализе сигналы акустической эмиссии разделяются по типам источников, выполняется анализ кинетики накопления повреждений в процессе развития в материале деформации или других повреждений. Это несет достаточно полную информацию о механизмах протекающих процессов, позволяет определить стадию деформации, оценить структурное состояние материала, степень поврежденности и, в конечном счете, прогнозировать остаточный ресурс при наличии достаточного объема статистических данных.

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ПЛАСТИНАХ

**Кхун Х.Х., Башков О. В.**

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет,  
Комсомольск-на-Амуре, Российская Федерация,  
[khonhanhtooaung@gmail.com](mailto:khonhanhtooaung@gmail.com)*

Метод акустико-эмиссионного (АЭ) неразрушающего контроля основан на регистрации и последующей обработке параметров акустических сигналов ультразвукового диапазона, возникающих в результате локальной перестройки структуры материала, зарождения и развития микро- и макродефектов. Зарегистрированные сигналы АЭ содержат значительный объём информации об источнике формирования, среде распространения упругой волны и местоположении источника. Известно, что различные моды распространяющейся в пластине групповой волны имеют различную скорость в зависимости от толщины пластины и частоты волны.

Одной из задач АЭ является обработка АЭ сигналов с целью выделения полезного сигнала из шумов. Вейвлет-преобразование (WT) позволяет определить частотный спектр сигналов АЭ как функцию времени с использованием короткой формы вейвлета как базисной функции. В результате отображения вейвлет-коэффициентов в частотно-временной координатной плоскости обеспечивает более информативную характеристику регистрируемых сигналов АЭ, чем спектры плотности мощности обычного Фурье преобразования.

В работе представлены результаты анализа сигналов АЭ, зарегистрированных при возбуждении АЭ волн в металлической пластине при изломе карандаша на различном расстоянии от приемника. Образец представлял собой прямоугольную алюминиевую пластину. Пьезоэлектрический датчик регистрировал сигналы акустической эмиссии, генерируемые источником Су-Нильсена. При определении скорости звука и местоположения источника ультразвуковые волны в образце использованы особенности распространения групповой волны в пластине. Для выделения информативной составляющей полезного сигнала акустической эмиссии было использовано Morlet (Морле) вейвлет преобразование.

При возбуждении изломом карандаша различной твердости, магнитуа вейвлета отличаются энергией и интенсивностью спектрограммы. Магнитуа вейвлета, локализованная по времени и частоте, позволяет оценить влияние симметричной и антисимметричной волны на скорость распространяющейся групповой волны, возбужденной источником АЭ. В настоящей работе источник возбуждался на поверхности образца. В результате анализа вейвлет спектрограммы было установлено, что выделенные моды зарегистрированных в алюминиевой пластине волн были охарактеризованы как антисимметричные волны. Это связано с тем, что симметричные волны распространяются преимущественно при расположении источника возбуждения на определенной глубине погружения в пластине относительно ее поверхности. По картке вейвлет спектрограммы обнаружено также отражение волны от границ при возбуждении источника близко к краю пластины. Полученные результаты позволяют сформировать образ дефекта по регистрируемому сигналу, что имеет важную информацию при локации источников АЭ и диагностике объектов.

# КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИИ И ВЫЯВЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ АМД-МЕТОДАМИ

Кустов А.И. <sup>1</sup>, Мигель И.А. <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный педагогический университет,  
Воронеж, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Военный Учебно-Научный Центр ВВС Военно-Воздушной Академии  
им. профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина,  
Воронеж, Российская Федерация

Одной из современных актуальных задач материаловедения является оценка значений физико-механических характеристик металлов. Не менее значима и связанная с ней задача контроля параметров деформации материалов. Успешное решение этих задач предоставляет возможность выявлять предельные состояния материалов. В изложенных в настоящей работе результатах исследований демонстрируется эффективность применения для анализа состояния металлических материалов новых методов, основанных на использовании акустических волн [1].

Деформацию и оценку её параметров проводили как в режиме акустомикроскопической визуализации [2], так и в режиме измерения скорости акустических волн (АВ) и уровня их затухания [3]. Был разработан и применен алгоритм исследований, который позволил рассчитать физико-механические параметры *стали 3*, ряда модельных материалов, как традиционным, разрушающим способом, так и с помощью АМД-методов [4].

С помощью разрывной машины на первом этапе проводились, позволившие получить экспериментально кривую  $\sigma - \varepsilon$  (рис. 1), инструментальные эксперименты. Условно эта кривая может быть разделена на V областей (0 – 3%; 3 – 6%; 6 – 15%; 15 – 20 и 20 – 25% - всего). В каждой из областей работают свои механизмы трансформации структуры и изменения значений характеристик. На втором этапе исследований для анализа экспериментально полученной кривой и нахождения базовых характеристик образца материала были применены *информационные технологии* (ИТ), обеспечившие расчет предела пропорциональности ( $\sigma_{пл}$ ), предела упругости ( $\sigma_y$ ), условного предела текучести ( $\sigma_{0,2}$ ), предела текучести ( $\sigma_T$ ), предела прочности ( $\sigma_B$ ) (рис.2а и 2б).

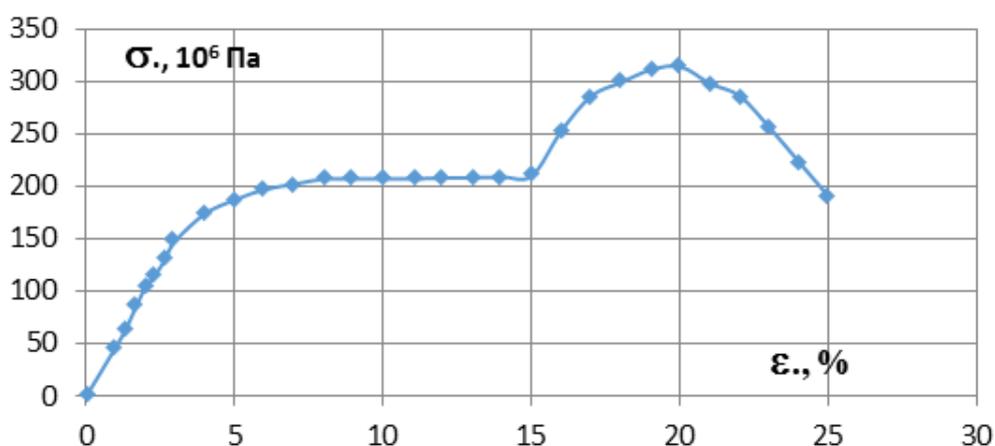
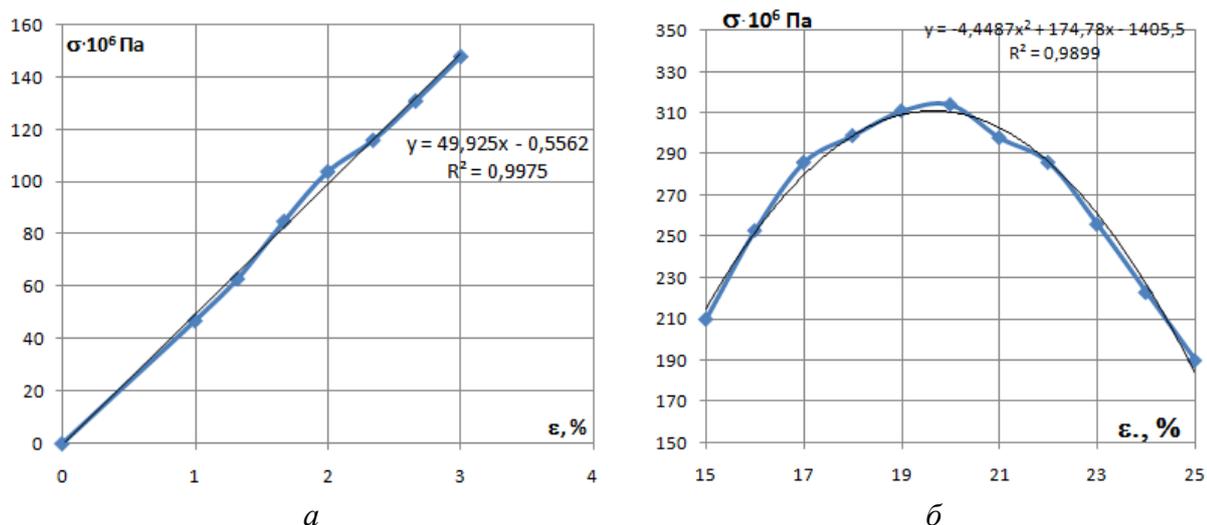


Рис. 1. Полученная традиционным методом экспериментальная кривая стали 3



**Рис. 2.** Экспериментальные зависимости  $\sigma - \epsilon$  на участках 1 (область чисто упругих деформаций) и 4,5 (область предела прочности), полученные традиционным методом

На следующем этапе исследований были применены АМД-методы, позволившие рассчитать значения скоростей поверхностных акустических волн (ПАВ) и уровень затухания этих волн в стали 3. На основе полученных данных были определены упруго-механические характеристики материала, которые сравнивались с характеристиками, рассчитанными традиционным способом. Из рис.2а был определен угол наклона линейного участка кривой к оси деформаций ( $66^\circ$ , а его тангенс – 2,246). При этом, напряжению в 148 МПа ( $\sigma_{пл}$ ) соответствует деформация в  $(6,58 \cdot 10^{-2})\%$ . Отношение этих величин в сотнях ГПа численно равно тангенсу угла наклона прямой упругости к оси деформаций и модулю упругости - 225 ГПа. Из второй области кривой был рассчитан  $\sigma_{0,2}$  (177 МПа). При деформациях в 8 – 14% наблюдалась площадка текучести ( $\sigma_T = 207,5$  МПа). По данным 4-ой области кривой  $\sigma - \epsilon$  (рис.2б) рассчитано значение ( $\sigma_B$ ) и соответствующая предельная деформация. Решение этой задачи осуществлялось на основе алгоритма оптимизации (функция «Поиск решения» приложения *Windows MS Excel*). Получены значения  $\epsilon_B$  и  $\sigma_B$  ( $\epsilon_B = 19,64394$ ,  $\sigma_B = 311,184 \cdot 10^6$  Па), которые в пределах погрешности совпадают с рассчитанными АМД-методами и со стандартными значениями [5].

### Список литературы

1. Мигель И.А., Кустов А.И. Анализ трансформации структуры приповерхностных слоев сталей и их влияние на процесс упрочнения АМД-методами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета., Машиностроение, Материаловедение., Т.18., №4, 2016., 205 с (с. 134-146).
2. Мигель И.А., Кустов А.И. Оценка степени деформации материалов и определение параметров их разрушения АМД-методами // Вестник Тамбовского университета. – 2016. – Том 21, вып. 3. – С.1102-1106.
3. Оценка параметров анизотропии свойств металлических материалов с использованием АМД-методов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения., Т.14., №1., 2017., с. 44 - 51.- ISSN 1811-1416
4. V.M.Zelenev, I.A.Migel, A.I.Kustov Development of methods for control of creep solid state materials based on the physical principles of the propagation of acoustic waves // Creep 2017: Proceedings of the International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures. June 19-21, 2017.-St.Petersburg: SPbPU Publisher, 2017.-170 p. (p.33-34).
5. Физические величины: справочник / А.П.Бабичев, Н.А. Бабушкина, и др.; п/р И.С.Григорьева и Е.З. Мейлихова. – М.; Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ ПОСЛЕ КОРРОЗИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Кустов А.И. <sup>1</sup>, Мигель И.А. <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный педагогический университет,  
Воронеж, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Военный Учебно-Научный Центр ВВС Военно-Воздушной Академии  
им. профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина,  
Воронеж, Российская Федерация

Проблема оценки характеристик сталей после коррозионного воздействия всегда актуальна. При этом важны определяющие временные интервалы относительно свойств материала – время формирования, время оптимизации свойств, время эксплуатации. Важнейшая задача при изучении этих временных интервалов – их влияние на свойства. Нами было предложено оценивать характеристики сталей после внешних воздействий коррозионного характера, прогнозировать достижение ими предельных и критических состояний, рассчитывать долговечность материалов с помощью АМД-методов [1].

В качестве объектов исследования были выбраны стекла и полупроводники IV группы, как модельные объекты, и стали различных марок. С помощью разработанных нами ранее методов [2] получали и анализировали  $V(Z)$ -кривые, по характерной форме которых измеряли физические параметры образцов после коррозии (см. рис.1), анализировали акустические изображения структуры материалов.

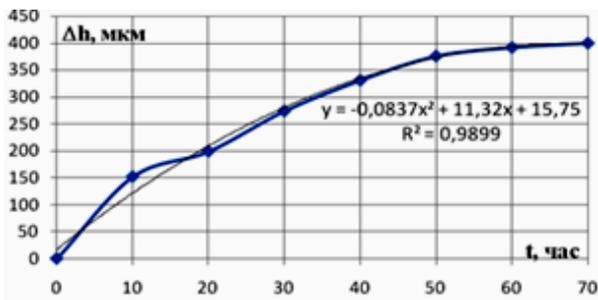


**Рис. 1.**  $V(Z)$ -кривые керамики, стекла, стали (для определения значений скорости ПАВ и уровня её затухания). По вертикали – амплитуда отраженного сигнала, по горизонтали – расстояние акустическая линза – поверхность изучаемого объекта ( $Z$ )

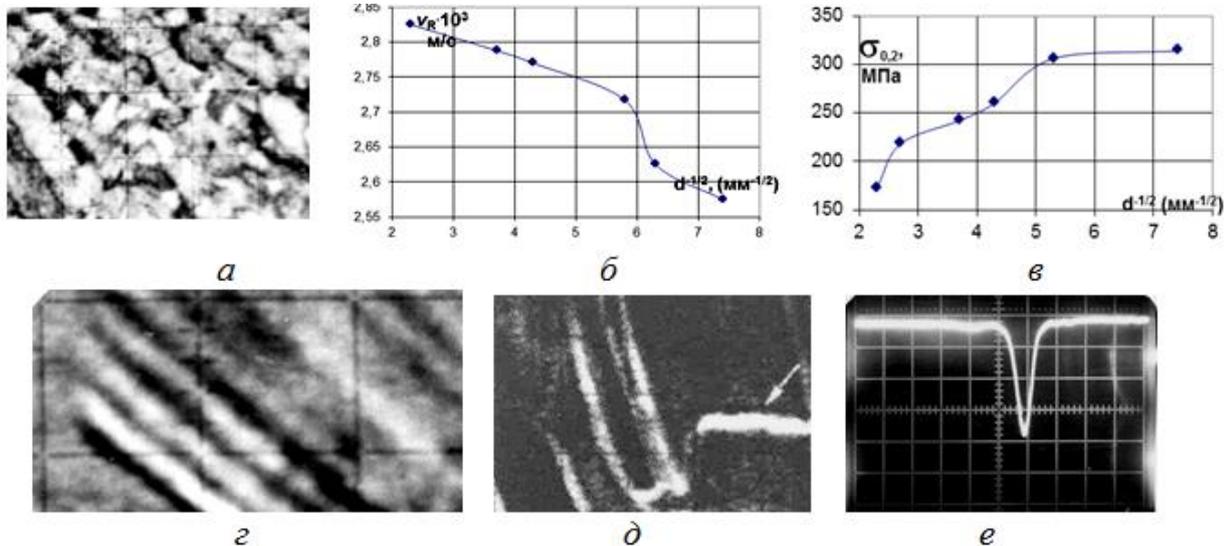
При внешних воздействиях менялась форма кривых и значения параметров, что позволило получить зависимости уровня свойств материалов от параметров процесса влияния (см. рис.2) и оптимизировать их набор.

Был получен ряд акустических изображений зеренной структуры сталей (рис.3а), по размеру зерна рассчитывали значения скоростей ПАВ ( $v_R$ ) (рис.3б) и условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) (рис.3в) .

Для получения представленных графических зависимостей использовался метод  $V(Z)$ -кривых [3]. Режим визуализации позволил выявить и оценить характеристики систем микротрещин, как в монокристаллических полупроводниках (рис.3г), так и в сталях (рис.3д). Хорошо обнаруживаются микротрещины и в режиме контроля строки САМ (рис.3е). Характер дефектов, их количество и распределение в растре позволяют эффективно прогнозировать поведение изучаемых материалов. Были получены размеры питтинговых дефектов в сталях, определена их глубина, синтезирована форма этих неоднородностей. Продемонстрированы полученные с помощью АМД-методов зависимости физических параметров сталей от распределения питтингов в приповерхностных слоях материалов.



**Рис.2.** Зависимость толщины слоя с измененными свойствами от времени азотирования, полученной по изменению скорости ПАВ в стали (40ХНМА), ( $T^0$  процесса  $500^{\circ}\text{C}$ ; оптимальное время 60 часов).



**Рис.3.** Анализ структуры и свойств материалов АМД-методами (*a* – акустический снимок структуры стали,  $100 \times 70$  мкм; *б* – зависимость скорости ПАВ от размера зерна стали ( $d_3$ ); *в* – связь  $d_3$  и  $\sigma_{0,2}$ ; *г* – микротрещина в монокристалле кремния,  $18$  мкм/дел.; *д* – акустический снимок структуры стали,  $100 \times 70$  мкм; *е* – микротрещина в стали; сигнал строки в районе микродефекта).

Проведенные эксперименты подтвердили эффективность анализа влияния внешних воздействий на свойства материалов с помощью акустических волн.

### Список литературы

1. Мигель И.А., Кустов А.И. Анализ поведения дефектных структур, возникающих в твердотельных материалах, АМД-методами // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.*, Т.13., №4., 2016., с. 490 - 496.
2. Кустов А.И., Мигель И.А. Определение параметров упрочнения или восстановления свойств поверхности материалов с помощью инновационных методов физического эксперимента – АМД-методов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.*, том 11, №4/2., 2014. – с. 592 -598.
3. Study using acoustic waves state of metal alloys after diffusion influences with the aim of predicting their behavior // *VII Inter. Conference Diffusion Fundamentals.*, NUST “MIS&S”, July 3-7, 2017, Moscow, Russia, 2017 155p. (p.115-116)
4. Анализ состояния диэлектрических стекол с помощью АМД-методов с целью прогнозирования их поведения // *Физика диэлектриков (Диэлектрики-2017): Материалы XIV Международной конференции*, Санкт-Петербург, 29 мая – 2 июня 2017., Т.1. - СПб.: изд-во РГПУ им. Герцена А.И., 2017 – 349 с. (с.306-308)

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В ТРУБОПРОВОДНОЙ СИСТЕМЕ

Параев С.А.

АО «НИИХиммаш», Москва, Россия

[paraev@niichimmash.ru](mailto:paraev@niichimmash.ru)

Гидравлический удар (ГУ) является широко распространенным и опасным явлением в трубопроводных системах и может возникать в процессе их эксплуатации, при гидроиспытаниях, пуско-наладочных работах и т.д. Амплитуда скачков давления можеткратно превысить рабочее значение [1], скачки могут повторяться и привести к выходу из строя всей гидравлической системы. ГУ может возникнуть даже в системах с открытым выходом [2], когда скорость потока жидкости не контролируется.

Скачок давления  $\Delta P$  зависит от многих параметров. При полном резком закрытии задвижки (прямой ГУ):

$$\begin{aligned}\Delta P &= \rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}} v_{\text{уд}} \\ v_{\text{уд}} &= v_{\text{зв}} \frac{1}{k} \\ k &= \sqrt{\left(1 + \frac{E_{\text{ж}} D}{E_{\text{тр}} h} m\right)},\end{aligned}$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости,  $v_{\text{ж}}$  – скорость потока жидкости,  $v_{\text{уд}}$  – скорость распространения фронта ударной волны,  $E_{\text{ж}}$  и  $E_{\text{тр}}$  – модули упругости жидкости и материала стенки трубопровода,  $D$  и  $h$  – диаметр и высота стенки трубопровода  $m$  – коэффициент материала трубопровода, равный 1 для стали.

При неполном закрытии задвижки (не прямой ГУ) скачок давления зависит от длины трубопровода  $l$  и времени закрытия задвижки  $t_{\text{зад}}$

$$\Delta P = \frac{2\rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}} l}{t_{\text{зад}}}$$

Несмотря на простоту формул скачка давления, точные характеристики ГУ нельзя рассчитать теоретически из-за наличия сложных волновых явлений, конструктивных особенностей каждой конкретной трубопроводной системы и подключенного к ней оборудования.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований явления ГУ с помощью метода акустической эмиссии (АЭ).

Испытания проводили с применением многоканальной системы акустико-эмиссионного контроля САЭК, построенной на базе унифицированных блоков сбора и обработки сигналов ЗАО "Руднев-Шиляев".

Гидравлическая система, включала насосную станцию, задвижки, прямые и обратные клапана, байпасы и емкостное оборудование, в т.ч. тонкостенные оболочки с рубашками для водяного охлаждения.

В результате проведенных АЭ исследований было установлено, что метод АЭ позволяет фиксировать время прохождения прямой и отраженной волны  $t_{\text{уд}}$  на расстоянии  $l$  от задвижки до источника давления и тем самым, дает возможность точно рассчитать основной параметр ГУ – скорость распространения фронта ударной волны  $v_{\text{уд}}$ :

$$v_{\text{уд}} = 2lt_{\text{уд}}$$

При превышении пределов упругости оболочечных конструкций наступает потеря их устойчивости и метод АЭ позволяет уверенно фиксировать все стадии этого процесса.

Были проведены эксперименты с различными скоростями закрытия задвижки и движения потока жидкости вплоть до статического нагружения. По сигналам АЭ регистрировали скачки давления в системе  $P_{аэ}$ , и зная время  $t_{уд}$  рассчитывали скорость распространения ударной волны  $v_{уд}$ .

Установлено, что нагрузки  $P_{аэ}$ , зафиксированные методом АЭ в момент потери устойчивости оболочки, хорошо согласуются с расчетами на прочность [3]. Погрешность измерений не превышала 10%. Метод АЭ позволил детально идентифицировать стадии процесса потери устойчивости оболочки в условиях статики. На рис. 1 и 2 показаны сигналы АЭ и деформации внутренней оболочки, образованные в моменты потери устойчивости.

Таким образом, полученные экспериментальные и расчетные данные показывают перспективность применения метода акустической эмиссии для изучения и предотвращения гидравлического удара - этого опасного явления в гидравлических системах.

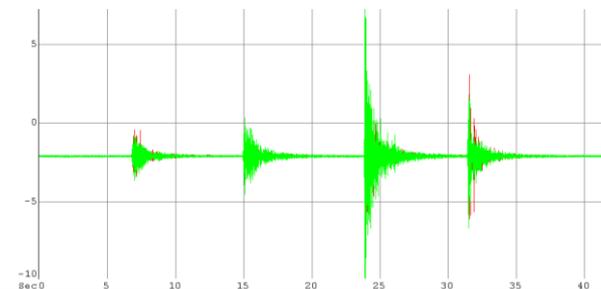


Рис. 1. Сигналы АЭ в моменты нестабильности оболочки



Рис.2. Выпуклости во внутренней оболочке, образованные при потере устойчивости

### Список литературы

1. «Основы гидравлики и аэродинамики», Калицун В. И., Дроздов Е. В., Комаров А. С., Чижик К. И., «Стройиздат», 2002 г.
2. Чарный И.А. Неустойчивое движение реальной жидкости в трубах., М., Недра, 1975, 296с.
3. ГОСТ Р 52857 – 2007.

# ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОЧИСТКИ ОТ ШУМОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Бутусов О.Б.<sup>1</sup>, Параев С.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский п " " " "

[butusov-1@mail.ru](mailto:butusov-1@mail.ru)

<sup>2</sup>АО «НИИХиммаш», Москва, Россия

[paraev@niichimmash.ru](mailto:paraev@niichimmash.ru)

Эффективность применения метода акустической эмиссии (АЭ) во многом зависит от степени очистки от шумов. Методы селекции помех могут быть аппаратные и программные. В связи с бурным развитием цифровых технологий большое распространение получил программный метод удаления шумов, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании.

Непрерывное вейвлет-преобразование определяется как:

$$\gamma(\tau, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) dt,$$

где  $\tau$  - временная трансляция,  $s$  - масштаб и  $\psi(t)$  - вейвлет-родитель.

Изначальная функция может быть восстановлена с помощью обратного преобразования:

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \gamma(\tau, s) \psi \left( \frac{t-\tau}{s} \right) dt \frac{ds}{|s|^2},$$

где  $C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\zeta)|^2}{|\zeta|} d\zeta$  называется постоянной допустимости и  $\Psi$  - преобразование Фурье от  $\psi$ .

Для того, чтобы обратное преобразование было успешным, постоянная допустимости должна соответствовать критерию допустимости  $C_\psi < +\infty$ .

Модель исходного сигнала можно записать следующим образом:

$s(t) = f(t) + \sigma \cdot e(t)$ , где  $f(t)$  - полезный сигнал,  $e(t)$  - шум,  $\sigma$  - уровень шума,  $s(t)$  - исследуемый сигнал.

В большинстве случаев функция  $e(t)$  описывается моделью белого (гауссовского) шума, при этом информация о помехе содержится в высокочастотной области спектра сигнала, а полезная информация – в низкочастотной. Для такой модели удаление шума при помощи вейвлет-преобразования выполняется в четыре этапа:

1. Разложение сигнала по базису вейвлетов.
2. Выбор порогового значения шума для каждого уровня разложения.
3. Пороговая фильтрация коэффициентов детализации.
4. Реконструкция сигнала.

Были рассмотрены различные вейвлет-преобразования в программном пакете MATLAB и среди них выбран наиболее подходящий решению поставленной задачи: Continuous Wavelet 1-D - с использованием непрерывного вейвлет-преобразования.

Результат разложения отображается двумерной картой. (рис. 1, 2): по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат уровень декомпозиции сигнала  $\{s_1, d_1, d_2, d_3, \dots, d_{11}\}$ . Каждый элемент декомпозиции определяет вклад соответствующего уровня разложения (полосы частот) в исходный сигнал. (рис.1).

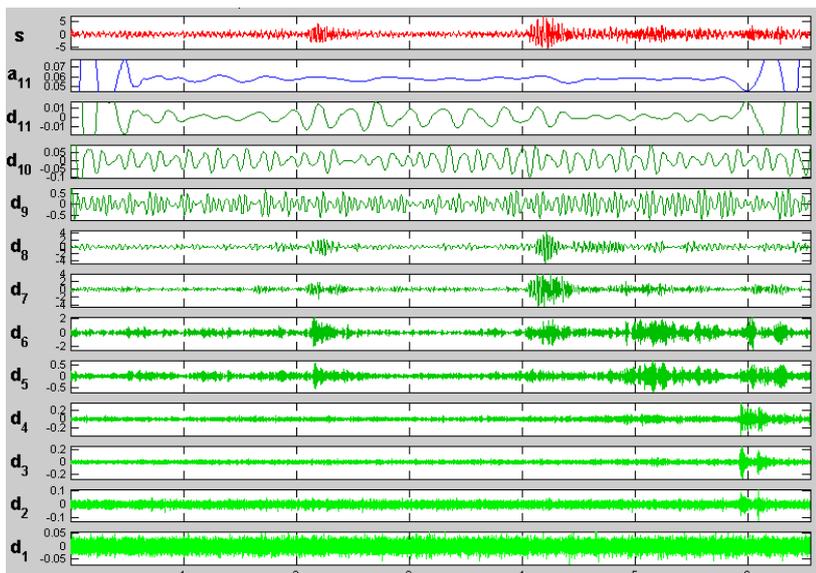


Рис.1

Двухмерная карта разложения сигнала

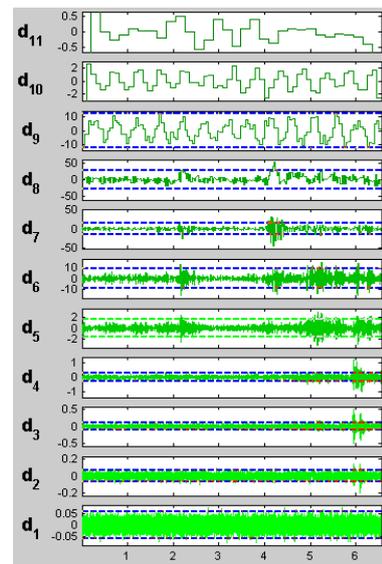


Рис.2

Процедура удаления шума

Графический интерфейс позволяет решать задачи уменьшения уровня шума в дискретном (цифровом) сигнале (очистки от шума). Для этого необходимо нажать на кнопку "Denoise" в середине правой колонки, под кнопкой "Analyze". Появится окно, в котором можно производить удаления шума из сигнала, используя дискретное wavelet-преобразование (рис. 2).

В результате прямого и обратного вейвлет-преобразования мы можем сравнивать исходный и очищенный сигнал. На рис. 3 показан исходный и очищенный сигнал, наложенные друг на друга.

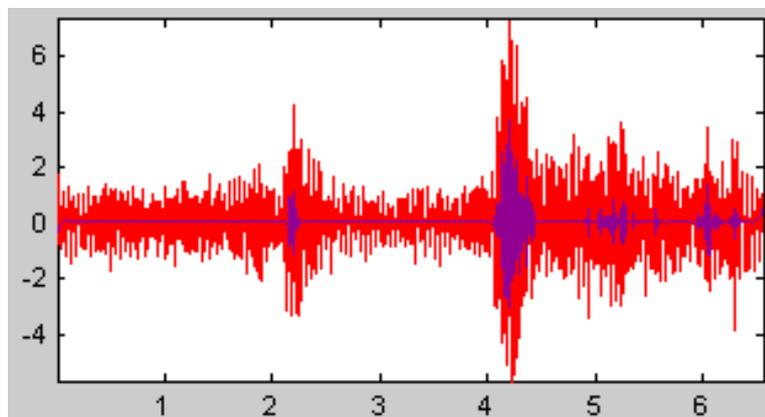


Рис.3

Исходные и очищенные сигналы АЭ, наложенные друг на друга

## Список литературы

1. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.: СОЛОН-Р, 2002.
2. Н.К. Смоленцев. Основы теории Вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. ISBN: 5-94074-122-3. Издательство "ДМК" 2005.

# КЛАССИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПО СТЕПЕНИ ИХ ОПАСНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ КОХОНЕНА

Параев С.А.<sup>1</sup>, Бутусов О.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «НИИХиммаш», Москва, Россия

[paraev@niichimmash.ru](mailto:paraev@niichimmash.ru)

<sup>2</sup>Московский политехнический университет, Москва, Россия

[butusov-1@mail.ru](mailto:butusov-1@mail.ru)

В настоящей работе представлены результаты математической обработки сигналов акустической эмиссии [1] с использованием нейронных сетей Кохонена [2-4].

Была выбрана нейронная сеть векторного квантования, обучаемая учителем (LVQ) [5,6].

Программа разработана в программном пакете MATLAB и позволяет классифицировать АЭ источники по степени их опасности на 4 класса: пассивный источник, активный, критически-активный, катастрофически-активный [1].

Топология сети приведена на рис.1.

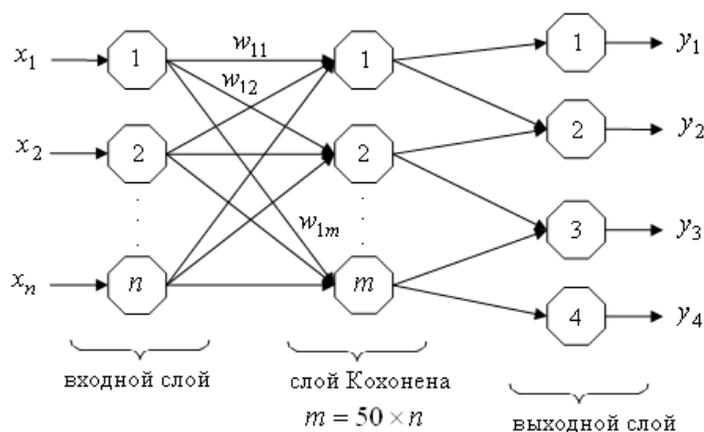


Рис.1 Архитектура нейронной сети LVQ

Для обучения нейронной сети использовали следующие параметры интегрального критерия [1]:

- активность источников АЭ сигналов

$$F = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{N_{k+1}}{N_k},$$

где:

$N_k$  - число событий в  $k$ -ом интервале оценки параметров;

- характер изменения F:  
 $F \ll 1, F = 1, F > 1$
- сила  $J_k$  источника АЭ :

$$J_k = \frac{A_K}{W \sum_{k+1} A_k},$$

где  $A_K$  - средняя амплитуда источника за интервал  $k$  ;

$W$  - коэффициент, определяемый в предварительных экспериментах.

- матрица оценки класса источника АЭ

	$J_k < 1$	$J_k > 1$	$J_k \gg 1$
$F \ll 1$	I	II	III
$F = 1$	II	II	III
$F > 1$	III	III	IV

Результаты работы нейронной сети, обученной классифицировать источники интегральным критерием, приведены на рис.2.

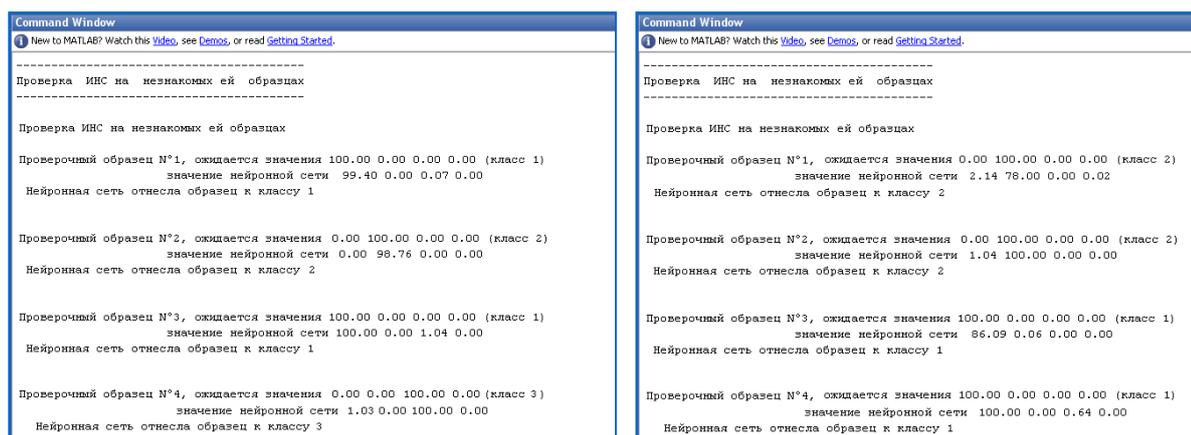


Рис.2 Результат классификации сетью данных линейной (слева) и планарной (справа) локации

Таким образом, созданная в программе нейронная сеть LVQ и обученная классифицировать на ограниченном множестве данных, способна обобщать полученную информацию и показывать хорошие результаты классификации на новых данных, не использовавшихся в процессе обучения.

### Список литературы

1. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. Москва, 2003.
2. Миркес Е.М. Учебное пособие по курсу Нейроинформатика. Красноярск, 2002.
3. Ф. Уоссерман. "Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика". М.: Мир, 1992.
4. Медведев В.С., Потемкин В.Г. "Нейронные сети. MATLAB 6".- М: Диалог-МИФИ, 2002.
5. Хайкин С. "Нейронные сети". Вильямс, 2006.
6. Джеффри Е. Хинтон. "Как обучаются нейронные сети". В мире науки, 1992.

## Именной указатель

Аббасова С.И.	165	Егоров А.В.	121
Агазаде М.Е.	165	Елизаров С.В.	10, 11, 22, 25, 39
Аксельрод Е.Г.	59	Желтов М.А.	49
Акула И.П.	35	Жилкин Е.В.	115
Алякритский А.Л.	10	Жуков А.В.	156
Андреев А.Г.	84		
Арутюнян А.Р.	134	Зайков В.И.	98
		Закупин А.С.	61
Бакабрдин А.А.	128	Захаров Д.А.	82
Барат В.А.	11, 22, 24, 39, 77, 151	Золотов А.Е.	49
Бардаков В.В.	11, 25, 37, 39, 146	Зяйкин Д.В.	67
Башков И.О.	98		
Башков О.В.	78, 97, 98, 159, 160	Иванов В.И.	8, 152
Баяндин Ю.В.	31	Ионов М.К.	128
Белоусов Н.Н.	91		
Бережко П.Г.	115	Казаков В.А.	138
Бехер С.А.	43, 45, 47, 142	Казаков Н.А.	140
Бигус Г.А.	147, 149	Казарцева Е.А.	49
Бобров А.Л.	45	Казначеев П.А.	107
Богомолов Л.М.	33, 61	Каманцев И.С.	109
Бондаренко Н.Б.	107	Карлов С.А.	140
Ботвина Л.Р.	86	Кац В.А.	59
Бочкарев А.В.	128	Кетов В.М.	95, 112
Брилевский А.И.	76	Кодиров У.Ш.	93
Брянский А.А.	97, 98	Кожевников А.В.	24
Буганков А.А.	10	Козинкина А.И.	65
Буйло С.И.	14, 17, 19	Колбин А.Л.	132
Бутусов О.Б.	167	Коломеец А.О.	43
Быков С.П.	154	Колубаев Е.А.	51
		Комаров А.Г.	41
Варюхин В.Н.	91	Комлев А.Б.	89
Васильев Е.В.	76	Костенко П.П.	151
Виноградов А.Ю.	28, 72, 74, 76, 101, 130	Котишевский Г.В.	93
Волков А.Е.	134	Кравченко В.И.	35
Волоконский М.В.	63	Кудря А.В.	93
Вьюненко Ю.Н.	91	Кудрявцев Е.М.	55
		Кузнецов А.А.	115
Гапонов В.Л.	19	Кузнецов Д.М.	19
Гасанов М.Ф.	49	Кузьмин А.Н.	59
Гафурова Д.Р.	119	Кунавин С.М.	115
Гвоздев А.Н.	88	Курносов Д.А.	124
Гиляров В.Л.	119	Кустов А.И.	161, 163
Гладковский С.В.	109	Кхун Х.Х.	97, 98, 160
Гневко А.И.	67		
Гомера В.П.	53, 71, 99	Лапшин Б.М.	126
Горкунов Э.С.	109	Леонтьев И.М.	88
Гразион С.В.	67	Лепендин А.А.	122
Григорьева А.В.	53, 71, 99	Лепихин А.М.	69
Гувалов А.А.	165	Линдеров М.Л.	74
		Лычагин Д.В.	51
Дамаскинская Е.Е.	119	Ляховицкий М.М.	55
Данюк А.В.	105		
Дмитриев А.А.	122	Майбук З.-Ю.Я.	107
Друкаренко Н.А.	109	Макаров С.В.	117

Малайков Д.Б.	157	Сагайдак А.И.	146
Марченков А.Ю.	25	Сазонов А.А.	152
Матюнин В.М.	25	Салита Д.С.	121
Махутов Н.А.	3	Самохвалов А.Б.	79, 124
Медведев А.Г.	157	Сарафанов Г.Ф.	80
Мерсон Д.Л.	5, 72, 74, 76, 101, 103, 105	Селезнев М.Н.	28
Мерсон Е.Д.	101	Сергеев А.Н.	88
Мигель И.А.	161, 163	Скворцов А.А.	132
Минина Н.А.	55	Скрябиков И.Н.	154
Митяшин С.М.	115	Смирнов А.Д.	53, 71, 99
Мишин В.М.	63	Смирнов В.Б.	107
Мокрушин В.В.	115	Соколовская Э.А.	93
Морозов В.А.	77	Соловов С.Н.	67
Мубассарова В.А.	61	Сорокин А.А.	67
Мукомела М.В.	67	Сорокин А.В.	77
Мягких П.Н.	101	Стояновский Л.О.	99
Наймарк О.Б.	31, 33	Сульженко В.А.	138, 140
Науменко А.П.	144	Сыч Т.В.	142
Нго Нгок Ха	93	Терентьев В.Ф.	57
Нефедьев Е.Ю.	71, 99	Терентьев Д.А.	11, 37, 39, 151
Никандров Д.А.	136	Тесля Д.Н.	89
Никитин А.В.	27	Травкин А.А.	149
Никулин С.А.	27	Трофимов П.Н.	10
Новицкая О.С.	51	Тюпин С.А.	53
Овчинников А.Л.	126	Тютин М.Р.	86
Овчинников Е.В.	35	Филиппов А.В.	51
Пантелеев И.А.	119, 31	Фролов Д.И.	119
Панкин Д.А.	67	Ханжин В.Г.	13, 27
Параев С.А.	165, 167, 169	Холодов С.С.	147
Пенкин А.Г.	57	Хрусталеv А.К.	105
Пенкин М.А.	57	Худорожкова Ю.В.	109
Петерсен Т.Б.	124, 86	Царев М.В.	115
Пичков С.Н.	82	Чекан Н.М.	35
Плотников В.А.	117	Челноков А.В.	67
Покрасин М.А.	55, 57	Черниговский В.Ю.	124
Полуянов В.А.	101	Чернов Д.В.	11, 22, 25
Поляков В.В.	121, 122	Черняев А.П.	69
Пономарев А.В.	107	Черняева Е.В.	91, 134
Попков А.А.	43, 47	Чуканов А.Н.	88
Попкова А.А.	78	Шагойка А.Г.	35
Попов А.В.	89	Шаркеев Ю.П.	78
Прилуцкий М.А.	136	Шелобков В.И.	152
Прохоровский А.С.	59	Шибков А.А.	49
Разуваев И.В.	30	Шиманский А.Г.	10, 39
Растегаев И.А.	53, 103, 105	Широкий И.Ф.	88
Растегаева И.И.	103	Шитов Д.В.	156
Рогачев С.О.	27	Эйсымонт Е.И.	35
Рожнов А.Б.	27	Эльманович В.И.	132
Ромашко Р.В.	98	Юнчина О.Ю.	115
Рощупкин В.В.	55, 57		
Сагайдак А.И.	111		

Язовский А.В.	144
Яковенко А.А.	88
Яковлев А.В.	138, 140
Янушкевич В.А.	67
Ярославкин А.Ю.	128
Ярославкина Е.Е.	128
Ярошенко В.В.	115

Ясников И.С.	72, 130
Henschel S.	112
Kaźmierczak A.	21
Krüger L.	112
Krüger L.	95
Mandel M.	95

## Содержание

	Стр
Махутов Н.А. МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И МОДЕЛИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ - ОСНОВЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА	3
Мерсон Д.Л. ТОЛЬЯТТИНСКАЯ ШКОЛА МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ: ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ	5
Иванов В.И. АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДИАГНОСТИКА. ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ	8
Елизаров С.В., Алякритский А.Л., Трофимов П.Н., Шиманский А.Г., Буганков А.А. ОБЗОР НОВЫХ АППАРАТНЫХ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМАХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ СЕМЕЙСТВА А-LINE	10
Елизаров С.В., Барат В.А., Бардаков В.В., Чернов Д.В., Терентьев Д.А. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	11
Ханжин В.Г. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В МЕТАЛЛОВЕДЕНИИ	13
Буйло С.И. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АКУСТИКО- ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ	14
Буйло С.И. МЕТОД ИНВАРИАНТОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ ПРЕДРАЗРУШАЮЩЕГО СОСТОЯНИЯ	17
Буйло С.И., Гапонов В.Л., Кузнецов Д.М. АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДИАГНОСТИКА КИНЕТИКИ ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКИХ СРЕДАХ	19
Kaźmierczak A. ОРГАНИЗАЦИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ В РЕСПУБЛИКЕ ПОЛЬША	21
Барат В.А., Чернов Д.В., Елизаров С.В. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ МЕТО- ДОМ АЭ ПРИ БЕСПОРОГОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ	22
Барат В.А., Бардаков В.В., Кожевников А.В. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАПОРНОЙ И РЕГУЛИРУЮЩЕЙ АРМАТУРЫ	24
Чернов Д.В., Елизаров С.В., Барат В.А., Матюнин В.М., Марченков А.Ю. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАДИЙ РАЗВИТИЯ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ	25
Никулин С.А., Ханжин В.Г., Рожнов А.Б., Никитин А.В., Рогачев С.О. ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА И МОНИТОРИНГ РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫМ МЕТОДОМ	27
Селезнев М. Н., Виноградов А. Ю. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ АНАЛИЗ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ	28

Разуваев И.В. О ПРОБЛЕМАХ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АЭ ПРИ МОНИТОРИНГЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	30
Пантелеев И.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. ЭФФЕКТ СИНХРОНИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕРЫВНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ	31
Пантелеев И.А., Богомолов Л.М., Наймарк О.Б. ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ ВИБРАЦИЙ НА ПРОЦЕСС НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ДЕФОРМИРУЕМОМ ГРАНИТЕ ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	33
Овчинников Е.В., Чекан Н.М., Акула И.П., Эйсымонт Е.И., Шагойка А.Г., Кравченко В.И. ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АДГЕЗИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ	35
Терентьев Д.А., Бардаков В.В. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭ СИГНАЛОВ В ТОНКОСТЕННЫХ ОБЪЕКТАХ	37
Бардаков В.В., Елизаров С.В., Барат В.А., Терентьев Д.А., Шиманский А.Г. UNISCOPE. РАСШИРЕНИЕ ГРАНИЦ МЕТОДА АЭ.	39
Комаров А.Г. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АЭ ИСПЫТАНИЙ	41
Бехер С.А., Коломеец А.О., Попков А.А. ПЕРСПЕКТИВЫ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ (АЭ) И ТЕНЗОМЕТРИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	43
Бобров А.Л., Бехер С.А. ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВЫХ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА НАДЕЖНОСТЬ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА	45
Бехер С.А., Попков А.А. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В ХРУПКИХ ОБЪЕКТАХ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ	47
Гасанов М.Ф., Золотов А.Е., Шибков А.А., Желтов М.А., Казарцева Е.А. ДИСКРЕТНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В ХОДЕ ПРЕРЫВИСТОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА	49
Лычагин Д.В., Новицкая О.С., Филиппов А.В., Колубаев Е.А. СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ОСОБЕННОСТЯМИ ИЗНОСА СТАЛИ ГАДФИЛЬДА	51
Растегаев И.А., Гомера В.П., Тюпин С.А., Смирнов А.Д., Григорьева А.В. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РАССЛОЕНИЯ СТЕНКИ ЕМКОСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	53
Рощупкин В.В., Ляховицкий М.М., Покрасин М.А., Минина Н.А., Кудрявцев Е.М. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ	55
Рощупкин В.В., Терентьев В.Ф., Пенкин А.Г., Покрасин М.А., Пенкин М.А. ОСОБЕННОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ТРИП-СТАЛИ, ЗАРЕГИСТРИРО-	57

ВАННЫЕ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	
Кузьмин А.Н., Прохоровский А.С., Аксельрод Е.Г., Кац В.А. МЕТОД БЕСПОРОГОВОЙ РЕГИСТРАЦИИ ДАННЫХ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	59
Богомоллов Л.М., Закупин А.С., Мубассарова В.А. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ И АНОМАЛИИ МИКРОНЕУПРУГОСТИ ОБРАЗЦОВ МРАМОРА В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ	61
Мишин В.М., Волоконский М.В. ИЗУЧЕНИЕ ЗАМЕДЛЕННОГО РАЗРУШЕНИЯ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	63
Козинкина А.И. МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ ДЕФЕКТНОСТИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ	65
Гневко А.И., Челноков А.В., Соловов С.Н., Мукомела М.В., Гразион С.В., Панкин Д.А., Сорокин А.А., Янушкевич В.А., Зяйкин Д.В. СПОСОБЫ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ И ЖИДКОСТЕЙ	67
Лепихин А.М., Черняев А.П. ВОЗМОЖНОСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ СОСУДОВ.	69
Нефедьев Е.Ю., Гомера В.П., Смирнов А.Д., Григорьева А.В. АЭ КОНТРОЛЬ БЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ИСПЫТАНИИ	71
Виноградов А.Ю., Ясников И.С., Мерсон Д.Л. ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ	72
Линдеров М.Л., Мерсон Д.Л., Виноградов А.Ю. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕДУРЫ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ПОТОКА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ СКАЧКОВ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ	74
Васильев Е.В., Виноградов А.Ю., Мерсон Д.Л., Брилевский А.И. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МАГНИЕВОГО СПЛАВА ZK30	76
Морозов В.А., Барат В.А., Сорокин А.В. О ПЕРСПЕКТИВАХ ВНЕДРЕНИЯ «МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ DN 50-1400 ДО 25,0 МПА С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ»	77
Башков О.В., Шаркеев Ю.П., Попкова А.А. КИНЕТИКА НАКОПЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	78
Самохвалов А.Б. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МОНИТОРИНГА	79

Сарафанов Г.Ф. ЭФФЕКТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СКАЧКООБРАЗНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И СВЯ- ЗАННАЯ С НЕЙ АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ	80
Пичков С.Н. Захаров Д.А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ ЛИНИЙ ПРИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМ КОНТРОЛЕ ОБОРУДОВАНИЯ ПОД ВОДОЙ	82
Андреев А.Г. ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ АЭ	84
Тютин М.Р., Петерсен Т.Б., Ботвина Л.Р. АКУСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ И ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧ- НОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ	86
Чуканов А.Н., Гвоздев А.Н., Сергеев А.Н., Широкий И.Ф., Яковенко А.А., Леонтьев И.М. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДИАГНОСТИ- КИ ЛИТЫХ И ПОРОШКОВЫХ СТАЛЕЙ	88
Попов А.В., Тесля Д.Н., Комлев А.Б. СИСТЕМА ОЦЕНКИ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОН- СТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ИНВАРИАНТОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ПРО- ЦЕССОВ	89
Белоусов Н.Н., Варюхин В.Н., Вьюненко Ю.Н., Черняева Е.В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ АКУ- СТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В УСЛОВИЯХ КРУЧЕНИЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ	91
Кудря А.В., Нго Нгок Ха, Соколовская Э.А., Котишевский Г.В., Кодиров У.Ш. ВОЗМОЖНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ОЦЕН- КАХ МАСШТАБОВ И ПРИРОДЫ РАЗРУШЕНИЯ	93
Кетов В. М., Mandel M., Krüger L. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ КОРРОЗИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВЫСОКОЛЕГИРО- ВАННОЙ СТАЛИ С ОДНОВРЕМЕННОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	95
Брянский А.А., Башков О.В., Кхун Х.Х. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	97
Башков О.В., Ромашко Р.В., Зайков В.И., Башков И.О., Кхун Х.Х., Брянский А.А. ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА ОС- НОВЕ АДАПТИВНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА	98
Нефедьев Е.Ю., Гомера В.П., Смирнов А.Д., Григорьева А.В., Стояновский Л.О. ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА АЭ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА РАЗВИТИЕМ ИС- КУССТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ В ТРУБНОЙ СТАЛИ ПРИ РАЗРУШАЮЩИХ ИСПЫ- ТАНИЯХ	99
Мерсон Е.Д., Мягких П.Н., Полуянов В.А., Мерсон Д.Л., Виноградов А.Ю. МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ И АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ВОДОРОДНОЙ ХРУПКОСТИ СТАЛЕЙ РАЗНОЙ ПРОЧНОСТИ	101
Растегаев И.А., Мерсон Д.Л., Растегаева И.И. ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ШУМОПОДОБНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ БЕСПороГОВОМ РЕЖИМЕ ЕЕ РЕГИСТРАЦИИ	103

Растегаев И.А., Данюк А.В., Мерсон Д.Л., Хрусталеv А.К. ОСОБЕННОСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛА РОТОРА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ	105
Казначеев П.А., Майбук З.-Ю.Я., Пономарев А.В., Смирнов В.Б., Бондаренко Н.Б. ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА СОБЫТИЙ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПО ДАННЫМ ДАТЧИКА ИНТЕГРАЛЬНОЙ АКУСТИКИ	107
Горкунов Э.С., Гладковский С.В., Друкаренко Н.А., Каманцев И.С., Худорожкова Ю.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СТРАГИВАНИЯ ТРЕЩИНЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПО ПРОГРАММЕ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ	109
Сагайдак А.И. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	111
Кетов В.М., Henschel S., Krüger L. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ	112
Кузнецов А.А., Кунавин С.М., Бережко П.Г., Жилкин Е.В., Царев М.В., Ярошенко В.В., Мокрушин В.В., Юнчина О.Ю., Митяшин С.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ГИДРИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТИТАНА, МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	115
Плотников В.А., Макаров С.В. МЕХАНИЗМЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ	117
Дамаскинская Е.Е., Пантелеев И.А., Гафурова Д.Р., Фролов Д.И., Гиляров В.Л. ОЦЕНКА КРИТИЧНОСТИ СОСТОЯНИЯ ДЕФОРМИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ	119
Салита Д.С., Поляков В.В., Егоров А.В. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ СВИНЦА	121
Дмитриев А.А., Поляков В.В., Лепендин А.А. ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАДИЙ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ	122
Петерсен Т.Б., Самохвалов А.Б., Черниговский В.Ю., Курносое Д.А. СПОСОБ КОНТРОЛЯ НИЗКОСКОРОСТНЫХ ПОДШИПНИКОВ И УСТРОЙСТВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ.	124
Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ТРЕНИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ПО МАГИСТРАЛЬНЫМ НЕФТЕГАЗОПРОВОДАМ СКРЕБКОВ И ПОРШНЕЙ	126
Ярославкина Е.Е., Ярославкин А.Ю., Бакабрдин А.А., Бочкарев А.В., Ионов М.К. АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ УСТАНОВКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗМЕРА ЗЕРНА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА	128
Виноградов А.Ю., Ясников И.С. СТОХАСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА ДИСЛОКАЦИОННОГО АНСАМБЛЯ ПРИ ПЛА-	130

СТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ И СООТВЕТСТВУЮЩАЯ ЕЙ АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ	
Эльманович В.И., Колбин А.Л., Скворцов А.А. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ	132
Волков А.Е., Черняева Е.В., Арутюнян А.Р. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ИНДЕНТИРОВАНИИ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА ВТ1-0 ПОСЛЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ	134
Прилуцкий М.А., Никандров Д.А. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ ШВОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ МЕЖКРИСТАЛЛИТНОМУ КОРРОЗИОННОМУ ОХРУПЧИВАНИЮ ПРИ РАБОТЕ С АГРЕССИВНЫМИ СРЕДАМИ.	136
Сульженко В.А., Яковлев А.В., Казаков В.А. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ИСПЫТАНИЯХ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ	138
Сульженко В.А., Яковлев А.В., Карлов С.А., Казаков Н.А. ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОЛОГИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА СВАРКИ СУДОКОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	140
Бехер С.А., Сыч Т.В. АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ СОУДАРЕНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ	142
Науменко А.П., Язовский А.В. ЭМПИРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ	144
Бардаков В.В., Сагайдак А.И. КОНТРОЛЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	146
Холодов С.С., Бигус Г.А. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА	147
Бигус Г.А., Травкин А.А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФЕКТОСКОПИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ОБНАРУЖЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ОБРАЗЦАХ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СТАЛИ 20, ИМЕЮЩИХ ЛИТУЮ СТРУКТУРУ	149
Костенко П.П., Терентьев Д.А., Барат В.А. АНАЛИЗ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПОМОЩИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	151
Иванов В.И., Сазонов А.А., Шелобков В.И. О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПАЭ	152
Быков С.П., Скрябиков И.Н. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСУДОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	154
Шитов Д.В., Жуков А.В.	156

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ «АЕ STRATEGY»	
Медведев А.Г., Малайков Д.Б. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ НА КЕМЕРОВСКОМ АО «АЗОТ»	157
Башков О.В. О РОЛИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ	159
Кхун Х.Х., Башков О. В. ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ПЛАСТИНАХ	160
Кустов А.И., Мигель И.А. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМАЦИИ И ВЫЯВЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ АМД-МЕТОДАМИ	161
Кустов А.И., Мигель И.А. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ ПОСЛЕ КОРРОЗИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН	163
Параев С.А. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В ТРУБОПРОВОДНОЙ СИСТЕМЕ	165
Бутусов О.Б., Параев С.А. ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОЧИСТКИ ОТ ШУМОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	167
Параев С.А., Бутусов О.Б. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПО СТЕПЕНИ ИХ ОПАСНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ КОХОНЕНА	169
Именной указатель	171
Содержание	174

Научное издание

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТОДА  
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ»  
(АПМАЭ-2018)

Всероссийская конференция с международным участием

(Тольятти, 28 мая – 1 июня 2018 года)

Сборник материалов

Ответственные редакторы *Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов*

Компьютерная верстка: *Е.В. Черняева*

Коллаж на обложке: *И.А. Растегаев*

Дизайн обложки: *И.И. Шишкина*

Подписано в печать 08.05.2018. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 10,5.

Тираж 120 экз. Заказ № 4-03-18.

Издательство Тольяттинского государственного университета  
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14