

# АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ В ПРОБЛЕМАХ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА ПРИ ОБОСНОВАНИИ ПРОЧНОСТИ, РЕСУРСА И БЕЗОПАСНОСТИ

Махутов Н.А.

*РАН, ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия, E-mail [Kei51@mail.ru](mailto:Kei51@mail.ru)*

По мере усложнения машин и конструкций, условий их эксплуатационного нагружения и развития процессов деформирования, повреждения и разрушения несущих элементов всё более необходимым оказывается развитие и совершенствование комплексных методов контроля, диагностики и мониторинга текущих и предельных состояний.

В числе интегральных методов диагностики и мониторинга этих состояний существенное место занимает метод акустической эмиссии. Его существо состоит в установлении корреляционных связей базовых параметров акустической эмиссии с различными стадиями деформирования, разрушения и повреждения.

При этом решающее значение для обоснования не только прочности и ресурса, но и безопасности приобретают следующие вопросы:

- анализ применимости методов акустической эмиссии в предельно широком диапазоне деформаций – от десятых долей предельной упругой до сотен предельных упругих, характерных для вязких разрушений;
- учет влияния на параметры акустической эмиссии истории нагружения, деформирования и повреждения на всех стадиях жизненного цикла (на временах до  $10^6$  часов и циклах до  $10^9 \div 10^{10}$ );
- устойчивость указанных корреляционных связей параметров акустической эмиссии и запасов прочности на стадиях до образования трещин и до окончательного разрушения;
- изменчивость базовых характеристик механических свойств в процессе эксплуатации.

В такой постановке для современных высокорисковых машин и конструкций необходимо применение комбинированных методов, систем и средств контроля, диагностики и мониторинга (с привлечением натурной тензо-термо-виброметрии, ультразвуковой, термовизионной, голографической, томографической диагностики).

Настоящая конференция, её доклады и обсуждения будут способствовать решению указанных выше вопросов на базе фундаментальных исследований и прикладных разработок.

## 4 ГЛАВНЫЕ ЗАДАЧИ В ОБЛАСТИ АЭ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Иванов В.И.

*АО «НТЦ «Промышленная Безопасность»*

Почему автор назвал материал, включив цифру 4? Ответ можно найти в статье, опубликованной в журнале Доклады АН, 1986 г. [1],

Перечисление задач по развитию АЭ метода автор неоднократно воспроизводил в предыдущих докладах на АЭ конференциях и в книгах, например, в [2]. Но, как гласит народная мудрость – «Повторение – мать ученья». В данном моменте краткий список «главных» задач в АЭ записан в таком виде:

I. Актуализация показателей классов источников АЭ для широкого круга материалов и конструкций посредством использования нескольких комплексных параметров АЭ, расширения списка важных параметров АЭ.

II. Оценка значимости предельных состояний в отдельных зонах объекта и во всём объекте с использованием показателей **вероятности отказа** (аварии).

III. Прогнозирование состояния объекта и момента его разрушения посредством

IV. Подготовка квалифицированных операторов и разработка смарт-приборов.

Кроме того, сформулируем конкретные направления исследований и анализа в области АЭ диагностирования:

- 1) Источник АЭ.
- 2) Излучение сигнала АЭ.
- 3) Распространение сигнала АЭ по объекту.
- 4) Прием сигнала АЭ и обработка сигнала АЭ (приборы АЭ).
- 5) Принятие решения по результатам диагностирования с

использованием показателя риска аварии.

Метод АЭ стал актуальным методом обеспечения промышленной безопасности 50 лет (с лишним) тому назад, когда довольно большая группа специалистов в нашей стране приступила почти одновременно к профессиональному исследованию АЭ. Напомним, что метод УЗК начался почти сто лет тому назад (с 1928 г.), когда С.Я. Соколов получил патент на этот метод. А моментом зарождения метода АЭ в стране и его широкая легитимация произошла, когда в сентябре 1972 г В.А. Грешников и Ю.Б. Дробот собрали представительную конференцию в Хабаровске, на которой присутствовало более 150 специалистов АЭ, начавших систематические исследования. Работы шли широким фронтом, включая все главные аспекты этого метода от анализа источников АЭ до создания методических и нормативных документов.

Вначале этот метод номинировался как метод неразрушающего контроля, что повлекло необходимость создания документов по применению метода АЭ, аттестации специалистов по АЭ контролю и средств контроля для использования в промышленности. Аттестация специалистов по АЭ началась одновременно с аттестацией специалистов по другим методам НК в начале 90-ых годов. Именно в это время усилиями акад. В.В. Клюева и проф. А.Я. Гурвича в нашей стране стала применяться 3-х уровневая система квалификации специалистов НК. И автор этого доклада подготовил необходимые документы для аттестации всей системы АЭ.

В 1975 г. В.А. Грешниковым и В.И. Ивановым была создана рабочая группа по АЭ-контролю при Госкомитете по Науке и Технике (ГКНТ), которая после нескольких трансформаций в настоящее время превратилась в объединенный Экспертный Совет (ОЭСАЭ), возглавляемый С.В. Елизаровым. ОЭСАЭ обеспечивает взаимодействие специалистов в области метода АЭ.

В начале 90-х годов 20-го столетия встала задача внедрения метода АЭ в промышленность. Для этого необходимо было разработать соответствующие документы. Они были созданы и приняты Ростехнадзором. Это - ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов (первая редакция – РД 03-131-97), Требования к акустико-эмиссионной аппаратуре, используемой для контроля опасных производственных объектов РД 03-299-00, Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов РД 03-300-99. Достижением стало то, что в правилах Ростехнадзора на пневмоиспытания сосудов давления было предписано обязательное применением метода АЭ.

Затем пришло понимание того, что метод АЭ является не просто методом НК, но и методом диагностики – АЭД, что было зафиксировано в [2]. Как метод НК он ограничивался выявлением источников АЭ и принятием решения о продолжении нагружения. Основная задача метода АЭД – выполнить НК и по результатам сформировать требования к оценке степени катастрофичности источника АЭ с использованием оценок вероятности разрушения объектов и показателем достоверности.

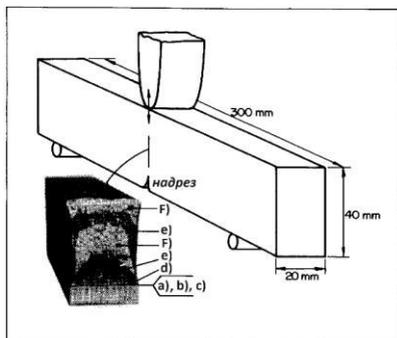


Рис. 1. Зависимости суммарного счета  $N$  нагружения  $P$  для разных материалов (1-3).

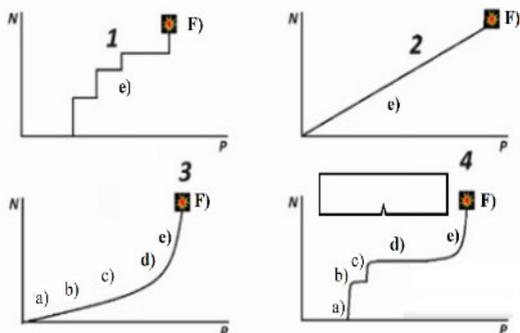


Рис.2. Схема эксперимента, в результате которого получена кривая 4 на Рис.1.

На Рис.1, кривая 4 представляет зависимость суммарного счета АЭ от числа циклов нагружения призматического образца из корпусной стали (15Х2НМФА) на изгиб. На этой кривой имеем этапы а), b), c), d), e), **F**=fracture. Этап а) – сигналы АЭ из области пластической деформации на кончике надреза в образце. Этап b) – исчерпание пластической деформации, упрочнение объема на кончике надреза. Этап c) образование трещины в середине надреза и ее распространение к боковым поверхностям образца. Этап d) – начало медленного развития магистральной макротрещины по всему сечению призматического образца. Этап e) - ускоренное развитие магистральной трещины в образце. Этап F) – этап хрупкого разрушения определенной зоны в центре образца. В заключение Этапа F) хрупкое разрушение остановилось в результате перераспределения НДС в толще образца, после чего началось вязкое разрушение – повторный Этап e).

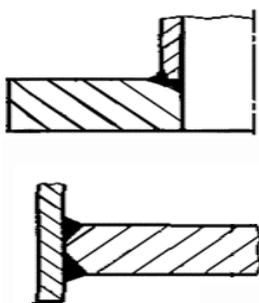


Рис.3. Сложные для АЭД конструкции с сварными соединениями

Если даже для испытательных образцов и простых конструкций имеем весьма сложные зависимости (кривая 4 на Рис.1 [2, 3]), то для таких сложных конструкций с сварными соединениями, в которых имеются дефекты (непровары и др.) (Рис.3.) – АЭ ситуация значительно сложнее и требуются дополнительные специальные исследования.

В настоящее время возникла актуальная задача (коренная задача АЭД) разработки методов оценки вероятности разрушения объекта по показаниям АЭ на всех этапах состояния и разрушения объекта. Следует отметить, что достоверность оценки наступления этапа F, т.е. катастрофически активного источника, в лабораторных испытаниях образцов, выполненных С.П. Быковым, составила 0,87. Теперь для каждого

класса источников необходимо установить значение вероятности разрушения объекта с учетом того, что этап промежуточного хрупкого разрушения некоторой зоны объекта может наступить задолго до окончательного разрушения.

**Список литературы:**

1. Иванов В.И. Вероятностный механизм формирования блочных структур. ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2012, том 443, № 2, с. 176–180. (Представлено академиком В.А. Бабешко, 06.2011.
2. Иванов В.И., Барат В.А., Акустико-эмиссионная диагностика: справ. М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 368 с.
3. Иванов В.И. Применение метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля и исследования материалов. Дефектоскопия. 1980, № 5, с. 65-84.

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ОБНАРУЖЕНИЮ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Науменко<sup>1</sup> А.П., Бурда<sup>1,2</sup> Е.В., Кудрявцева<sup>1</sup> И.С.

1. Омский государственный технический университет,  
2. ООО «ВС инжиниринг». г. Омск, Россия, [apnaumenko@omgtu.ru](mailto:apnaumenko@omgtu.ru)

Для систем радиолокации, управления и контроля по различным каналам приёма и передачи информации задача обнаружения сигнала на фоне помех всегда рассматривается в рамках классической теории распознавания образов и статистических решений [1].

Все критерии обнаружения сигнала базируются на одном общем утверждении, а именно – есть некоторый порог  $h$ , превышение которого аддитивной смесью сигнала и шума (помехи) считается подтверждением гипотезы  $H_0$  – сигнал в аддитивной смеси обнаружен, т.е. коэффициент  $\lambda=1$ , если аддитивную смесь представить суммой:

$$z(t) = \lambda u(t) + n(t), \quad (1)$$

где  $u(t)$  – сигнал;  $n(t)$  – «белый» шум. Когда порог  $h$  не превышен, то принимается альтернативная гипотеза  $H_1$  – сигнал в аддитивной смеси отсутствует, и тогда коэффициент  $\lambda=0$ . В процессе принятия решения, согласно лемме Неймана – Пирсона, используют отношение правдоподобия, которое учитывает ошибки 1-го и 2-го рода, сумма которых равна общей вероятности ошибок различения сигналов на фоне помех. Тогда достоверность различения сигналов на фоне помех будет:

$$P_D = 1 - P_{\Sigma}, \quad (2)$$

где  $P_{\Sigma}$  – суммарная вероятность ошибок.

Известные критерии обнаружения сигнала дают различные оценки достоверности путём оптимального выбора порога  $h$  с учётом вероятностных характеристик смеси (1) и её слагаемых. Например, при отношении сигнал/шум, равном 10 дБ, достоверность будет 0,8.

Проведённые исследования [2] показали, что для принятия решения можно использовать не только классические отношения правдоподобия, в виде отношения апостериорной плотности вероятности аддитивной смеси к апостериорной плотности вероятности шума (помех), но и критерии на основе характеристической функции АЭ сигналов. Напомним, что характеристическая функция (ХФ) А. Ляпунова представляется как [2]

$$\Theta_z(V_m, t_0) = m_1 \{ \exp[jV_m z(t)] \}, \quad (3)$$

где  $V_m$  – аргумент ХФ,  $z(t)$  – стационарная аддитивная смесь (1) сигнала и шума, взятая на оси времени  $t$ , причём  $t_0$  – начало реализации аддитивной смеси (1);  $m_1 \{ \cdot \}$  – оператор математического ожидания.

Для проведения экспериментальных исследований использовались сигналы стационарной системы мониторинга, полученные во время контрольного обследования двух реакторов на нефтеперерабатывающем

заводе. Лоцирование сигналов указывало на их соответствие АЭ источнику, который позже был подтверждён во время ремонта.

Обработка сводилась к выделению интервала времени, на котором присутствует АЭ импульс, и получению ХФ (3) сигнал. На этом же интервале определялось среднее квадратичное значение импульса (СКЗ). Из этого же сигнала или предыдущей, или последующей выборки формировался образец помех и рассчитывались ХФ (3) и СКЗ. По отношению СКЗ сигнала и помех оценивалось отношение сигнал/шум.

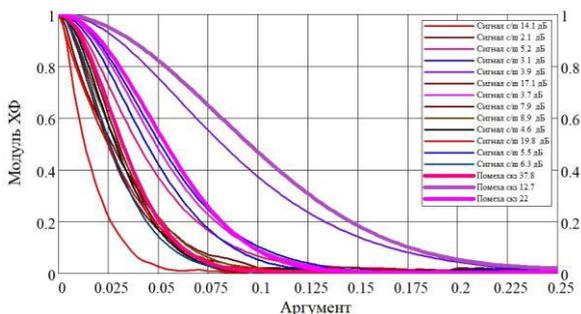


Рис. 1. Характеристические функции сигнала и помехи при различных отношениях сигнал/шум и различных значения СКЗ помехи

Проведённые исследования показали, что величины модуля ХФ сигнала и помехи при заданном значении аргумента отличаются. Порог обнаружения, как отношение ХФ сигнала и помехи, при снижении отношения сигнал/шум снижается, но является достаточно значимым при использовании выборки шума, взятой из реализации с сигналом. Имеющиеся сигналы позволили подтвердить возможность обнаружение сигнала при отношении сигнала /шум около 2 дБ.

### Список литературы:

1. Науменко, А. П. Вероятностно-статистические методы принятия решений : теория, примеры, задачи / А. П. Науменко, И. С. Кудрявцева, А. И. Одинец ; Омский гос. техн. ун-т. – Омск : ОмГТУ, 2018. – 108 с. – ISBN 978-5-8149-2720-0. – EDN HPJHGX.
2. Вешкурцев, Ю. М. Обнаружение сигнала на фоне шумов с использованием характеристической функции / Ю. М. Вешкурцев, Н. Д. Вешкурцев, Д. А. Титов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2018. – № 4. – С. 40-46. – EDN XMTBSP.
3. Вешкурцев, Ю. М. Прикладной анализ характеристической функции случайных процессов / Ю. М. Вешкурцев. – Москва : Научно-техническое изд-во "Радио и связь", 2003. – 201 с. – EDN QJNBPF.

# ОБЗОР ЛИНЕЙКИ ОБОРУДОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПАНИЙ «ИНТЕРЮНИС-ИТ»

Елизаров С.В.

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

В докладе приведены описание и технические характеристики наиболее перспективных на данный момент разработок компании «ИНТЕРЮНИС-ИТ»: систем мониторинга на базе измерительного комплекса «A-Line MON», нового поколения модульных АЭ систем марки «A-Line DDM-3» и ряд технологий, реализуемых на базе портативного универсального прибора НК «ЮНИСКОП».

АЭ представляется наиболее подходящим методом НК для организации постоянного мониторинга значительных по размерам ОПО и объектов гражданской инфраструктуры. С этой целью в компании разработана универсальная модульная программно-аппаратная платформа A-Line MON на базе многоканального цифрового АЭ комплекса. Базовым элементом комплекса является универсальный цифровой модуль для регистрации и передачи данных, который поддерживает подключение различных типов преобразователей: от трех АЭ до шести параметрических датчиков в различных конфигурациях. Для мониторинга крупномасштабных объектов указанные модули могут быть организованы в несколько измерительных линий с передачей данных по последовательному цифровому протоколу. Трансфер данных и конвертацию интерфейсов, а также и электроснабжение модулей осуществляет специализированный промышленный контроллер. Весь комплект оборудования выпускается как в общепромышленном, так и во взрывозащищенном исполнении. Центральный вычислительный сервер, оснащенный специализированным ПО, осуществляет обработку, визуализацию и хранение данных, а также интеграцию мониторинговой системы с АСУТП предприятия-заказчика и удаленное управление посредством современных сетевых коммуникаций.

Линии передачи данных между чувствительными элементами, установленными на объекте контроля, и удаленными средствами визуализации и хранения могут быть как цифровыми, так и аналоговыми, но далее рассматривается вариант только цифровой передачи как наиболее современный. АЭ-комплексы с цифровой передачей данных разрабатывались специально для промышленного контроля и мониторинга протяженных объектов. Новое поколение модульных АЭ-комплексов сочетает в себе улучшенные технические характеристики с уменьшением объема и веса оборудования. A-Line DDM-3, например, позволяет подключить до 80 датчиков АЭ, сконфигурировать их в протяженную линию с интервалами между датчиками равным 50 м и провести качественный АЭ-контроль объекта в 4 км длиной одновременно. Новый

цифровой модуль оснащен 18-битным АЦП с частотой дискретизации 8 МГц, формирователем стандартных АЭ-параметров и буфером для регистрации волновых форм АЭ-импульсов. Также в устройстве реализована функция самокалибровки АЭ-канала, цифровая фильтрация и беспороговый метод сегментации АЭ-данных SMART.

Малоканальные автономные портативные АЭ-системы находят все более широкое применение на практике для изучения локальных процессов упругого энерговыделения, оперативного поиска утечек, изучения процессов коррозии и иных вопросов материаловедения. В свою очередь, на базе 2-х канального универсального прибора НК «ЮНИСКОП» в разной стадии реализации находятся следующие перспективные технологии: поиск и количественная оценка величины утечки и присосов вакуума, определение текущей и прогнозируемой прочности бетона в реальном масштабе времени, оценка степени деградации стенки трубопроводов и сосудов давления, ранний прогноз технического состояния и работоспособности подшипников.

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Мисейко А.Н.

ООО «НТЦ «ЭгидА», г. Москва, Россия, [miseyko-an@yandex.ru](mailto:miseyko-an@yandex.ru)

Метод акустической эмиссии (далее – АЭ) является одним из наиболее наукоёмких и перспективных методов технического диагностирования. Он может быть использован для оценки технического состояния широкого спектра производственного оборудования и объектов гражданской инфраструктуры. Однако его эффективное применение ограничивается некоторыми факторами. На сегодняшний день существует ряд актуальных проблем в области использования метода АЭ, к числу которых, по мнению автора, следует в первую очередь отнести:

1) Значительное влияние шумов и помех на достоверность результатов АЭ-диагностирования.

2) Дефицит общедоступных систематизированных сведений о связи параметров сигналов АЭ с параметрами дефектов, зарегистрированных в процессе диагностирования реального производственного оборудования.

3) Недостаточная нормативная база в области АЭ-диагностирования различных видов объектов.

4) Интерпретация результатов АЭ-контроля весьма трудоёмка, занимает много времени и требует высокой квалификации специалистов.

5) Для долгосрочного прогнозирования изменения технического состояния диагностируемых объектов необходим длительный период регистрации данных АЭ или, как минимум, проведение периодического диагностирования.

Тем не менее, при современном уровне развития науки и техники вышеперечисленные проблемы могут быть в значительной степени решены путём консолидации усилий учёных, исследователей и производителей в следующих приоритетных направлениях:

1) Разработка помехоустойчивых алгоритмов регистрации и выделения сигналов АЭ, разработка и совершенствование алгоритмов обработки и фильтрации больших массивов АЭ-данных.

2) Разработка датчиков АЭ со встроенными средствами обработки данных, обеспечивающими высокую помехозащиту за счёт быстрой оцифровки сигналов и последующей передачи их в цифровом виде по каналам связи.

3) Разработка датчиков АЭ с использованием фильтра на поверхностных акустических волнах, разработка датчиков АЭ с возможностью регистрации различных типов акустических волн.

4) Создание национальной базы данных (далее – БД) АЭ-диагностирования, содержащей сведения о связи параметров сигналов АЭ

с параметрами зарегистрированных дефектов реального производственного оборудования.

5) Разработка (совершенствование) критериев оценки степени опасности источников АЭ с учетом условий эксплуатации диагностируемых объектов, их конструктивных особенностей, на основе использования различных комплексных параметров.

6) Разработка и утверждение на федеральном уровне (Ростехнадзор) нормативных документов, регламентирующих применение метода АЭ для диагностирования оборудования на опасных производственных объектах, ответственных объектах гражданской инфраструктуры, детализированных методик АЭ-диагностирования по различным видам объектов.

7) Применение технологий машинного обучения и искусственного интеллекта, на основе данных из национальной БД АЭ-диагностирования, для распознавания степени опасности источников АЭ и долгосрочного прогнозирования изменения технического состояния объектов диагностирования.

# АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТОДА АЭ. КАДРОВЫЙ ВОПРОС. ФОРМАТ ОБУЧЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДА АЭ. КУРС В УНИВЕРСИТЕТАХ.

Медведев К.А.

ООО «НТЦ «Эгида»

На территории Российской Федерации более 30 нефтеперерабатывающих заводов. Более 250 тысяч километров нефтяных труб (промысел, магистральные и технологические трубопроводы). По оценкам автора доклада, необходимо не менее **ста** высококвалифицированных специалистов по методу акустической эмиссии для проведения полноценного контроля оборудования НПЗ и не менее **трехсот** для контроля объектов магистральных трубопроводов, а также для сопровождения пневмоиспытаний при строительстве, реконструкции или ремонте оборудования на опасных производственных объектах необходимо не менее **двухсот** специалистов.

Такое количество не предполагает «резерва» кадров.

На сегодняшний день в Российской Федерации аттестовано 9 специалистов 1 уровня, 1492 специалиста 2 уровня и 111 специалистов 3 уровня (по данным АО «НТЦ «Промышленная Безопасность»).

Однако, количество подаваемых заявок на ежегодно проводимый конкурс НУЦ «Качество» для специалистов метода АЭ, не превышает 10 штук. (В рамках АПМАЭ подана одна заявка).

Причина подобного «феномена», по мнению автора, в отсутствии настоящих практических занятий и знаний по методу АЭ у многих аттестованных специалистов по методу АЭ.

Для подготовки высококвалифицированных специалистов по методу АЭ, закрывающих потребности промышленных предприятий, автором предлагаются следующие мероприятия:

– Организация открытой лаборатории для обучения методу АЭ с доведением объектов испытаний до полного (разрушения).

– Организация единого информационного ресурса по акустической эмиссии с возможностью обсуждения результатов контроля и анализа файлов данных.

Разработка учебно-методического и практического материала для учебных заведений по методу акустической эмиссии (по профильным направлениям) с участием студентов в лабораторных и научно-исследовательских работах.

## **ОРГАНИЗАЦИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ЦЕЛЯХ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ**

**Ярославкина Е.Е., Суслов А.В., Лившиц М.Ю.**

*ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»,  
г. Самара, Россия*

Самарский государственный технический университет (СамГТУ) является опорным университетом Самарской области.

В период реализации Программы развития опорного вуза университет стал ключевым участником обсуждения, принятия решений и реализации проектов практически по всем направлениям стратегического развития региона, в том числе проекта по формированию научно-образовательного центра мирового уровня НОЦ «Инженерия будущего» [1].

Инженерные программы должны быть направлены на развитие навыков, «инженерного мышления», и требуют более тесного и скоординированного сотрудничества производственных предприятий с университетами и научными организациями [2].

Такое сотрудничество служит залогом адекватной передачи знаний и формирования у обучающихся именно

тех компетенций, которые будут востребованы в будущем предприятиями и работодателями.

Эффективными формами содействия трудоустройству выпускников является реализация совместных с индустриальными партнерами образовательных проектов и прием на целевое обучение. В 2016 года в СамГТУ реализуется совместная образовательная магистерская программа по направлению 12.04.04 «Не разрушающий контроль, техническая диагностика объектов нефтегазовой отрасли». Реализацией данной программы занимаются преподаватели в области нефтегазовой деятельности и области приборостроения.

Важной частью учебного процесса является прохождение студентами цикла практик. Для получения практических навыков учебного плана образовательной программы предусмотрены различные виды практик.

Производственную практику обучающиеся проходят в независимом органе по аттестации персонала в области неразрушающего контроля НОАП «Политех-НК», созданного при научно-исследовательском СамГТУ, имеющий аттестованную в Системе неразрушающего контроля Ростехнадзор лабораторию неразрушающего контроля и осуществляющий аттестацию специалистов в области неразрушающего контроля по 1 и 2 уровням профессиональной квалификации. Реализация такой практики позволяет обучающимся во время практики пройти аттестацию по определенному виду неразрушающего контроля [3].

### **Список литературы:**

1. Отчет о самообследовании Основная образовательная программа высшего образования 12.03.01 Приборостроение профиль «Информационно-измерительная техника и технологии» (Агентство по контролю качества образования и развитию карьеры (АККОРК). – Самара: СамГТУ, 2023. – 80 с.
2. Нидергаус Е. О. Подготовка инженерных кадров в современных образовательных траекториях / Е. О. Нидергаус // EDCRUNCH Ural: новые образовательные технологии в вузе: материалы международной научно-методической конференции (НОТВ-2017). — Екатеринбург: УрФУ, 2017. — С. 377-382.
3. Итоговый отчет по результатам аккредитационной экспертизы профессиональной образовательной программы 12.04.01 «Приборостроение» профиль «Неразрушающий контроль, техническая диагностика объектов нефтегазовой отрасли». – М.: ЧУ «ГазпромЦНИС», 2019. – 11 с.

# КАЧЕСТВЕННЫЙ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТА ГАЗА С МИНИМИЗАЦИЕЙ ЗАТРАТ НА ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Веретенников А.А., Санников А.А.

ООО «Газпром трансгаз Чайковский», г. Чайковский, Россия  
[andrey\\_59.83@mail.ru](mailto:andrey_59.83@mail.ru)

ООО «Газпром трансгаз Чайковский» («ГТЧ») осуществляет транспорт газа по 15 крупнейшим в мире магистральным газопроводам. Стоит отметить тот факт, что значительная часть трубопроводов эксплуатируется более 30 лет, а климатические и геологические особенности пролегания трасс, оказывают специфическое воздействие на трубопроводные системы подземного монтажа, что обуславливает высокую предрасположенность элементов трубопроводов к стресс-коррозии (КРН).

Одним из наиболее перспективных методов выявления подобных развивающихся дефектов подземных участков технологических трубопроводов компрессорных станций (ТТ КС) на сегодняшний день представляется акустико-эмиссионный контроль (АЭК).

Специфика эксплуатации ТТ КС определяет схему их испытания при АЭК внутренним давлением рабочей среды, однако, особенности технологических схем и эксплуатационных режимов не позволяют превысить ранее достигнутых уровней воздействия, которому контролируемый участок был подвержен на предыдущих этапах своего жизненного цикла, и заведомо нагружаются ниже испытательного давления, приложенного до начала эксплуатации.

Общезвестна теория старения трубной стали контролируемого проката (наиболее подверженной КРН), которая рассматривает в качестве основного критерия деградации материала - снижение значения предела микропластичности (макроупругости).

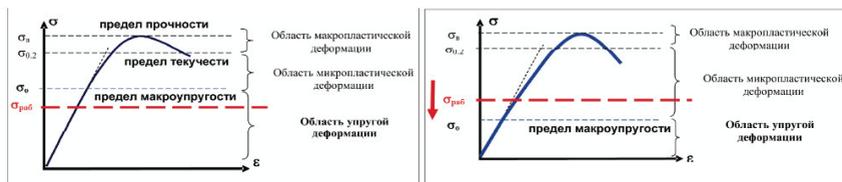


Рисунок 1. Изменение механических свойств основного металла труб магистральных газопроводов в процессе длительной эксплуатации.

Эффект Фелисити, с учетом зависимости особенностей проявления сигналов АЭ от текущих (изменяющихся со временем) значений предела микропластичности, позволяет рассчитывать на формирование АЭ при механических напряжениях ниже ранее приложенных нагрузок. Этот факт,

в совокупности с регистрацией групповых волн с низкими частотами, позволяет фиксировать сигналы АЭ на ТТ КС на расстояния до 30 метров.

Основные концепции АЭК, реализуемые «ГТЧ» в настоящее время на базе комплексов A-Line 32D, не удовлетворяют текущим требованиям эксплуатации ОПО, проявляя низкую эффективность лоцирования источников АЭ, обусловленную субъективностью и сложностью анализа, и не позволяя осуществлять оценку типа дефекта.

Особенностью методики, дополнительно используемой «ГТЧ», является анализ модальной структуры волн Лэмба, осуществляемый с целью оценки типологии выявленных дефектов и определения их линейно-радиальных координат при линейной расстановке преобразователей.

В данной работе также освещаются иные технические нюансы и опыт применения метода акустической эмиссии при диагностике ТТ КС, а также проводится сравнительный анализ результатов АЭК, обследовании внутритрубной дефектоскопии и дополнительных диагностических обследований в шурфах.

#### **Список литературы:**

1. A.A.Pollock. Quantitative Evaluation of Acoustic Emission from Plastic zone Growth. Dunegan Endevco. Technical Report. D/E-76-8. 1976, 31p.
2. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017.
3. Сазонов П.М., Кузьмин А.Н., Жуков А.В. и др. Выявление и оценка степени опасности стресс-коррозионных дефектов объектов магистральных трубопроводов с применением метода акустической эмиссии на предприятиях ПАО «Газпром» // ТНГ. 2015. № 12. С. 76–84.
4. Чувильдеев В.Н. Старение сталей труб магистральных газопроводов. Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского, 2010, №5 (2). С.171-180.

## **ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ТВЕРДЕНИЯ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Бардаков В. В.<sup>1</sup>, Барат В. А.<sup>1</sup>, Елизаров С. В.<sup>1</sup>, Сагайдак А. И.<sup>2</sup>

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

АО «НИЦ «Строительство», Москва, РФ

Одной из важнейших задач современного строительства является обеспечение надежности и безопасности зданий и сооружений. Бетон и железобетон являются ключевыми материалами, используемыми при строительстве зданий и сооружений. Бетон, в свою очередь, является уникальным строительным материалом, прочность которого не является фиксированной, а возрастает с течением времени. Исходя из этого, актуальной задачей является оценка прочностных характеристик бетонных и железобетонных конструкций не только в процессе эксплуатации, но и в процессе твердения (на этапе строительства).

В данной работе представлены три направления исследований по применению метода акустической эмиссии (АЭ) для оценки прочностных характеристик бетона в процессе его твердения, а именно: определение прочности бетона, выделение стадийности структурообразования бетона, прогнозирование прочности бетона.

Для решения данных задач ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ» совместно с АО «НИЦ «Строительство» был проведен ряд исследований по регистрации АЭ в процессе твердения бетона. Эксперименты проводились для тяжелых и мелкозернистых бетонов различной прочности, твердеющих в форме кубов, а также для железобетонных балок различной прочности.

По результатам проведенных экспериментов было установлено, что метод АЭ позволяет проводить определение прочности бетона в процессе его твердения в режиме мониторинга в течение длительного промежутка времени (28 и более суток).

Метод АЭ позволяет проводить выделение стадийности структурообразования бетона. На основании выделения стадийности структурообразования бетона возможно прогнозирование прочности бетона к сроку 28 суток. При этом время измерений, необходимое для прогнозирования прочности не превышает 24 часов, для большинства составов используемых в современном строительстве.

## **К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ КРИТЕРИЕВ ПРИ АЭ КОНТРОЛЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ**

**Смирнов А.Д., Гомера В.П., Тюпин С.А., Фандофан А.А.**

*ООО КИНЕФ, г.Кириши, Россия, [Gomera-V-P@yandex.ru](mailto:Gomera-V-P@yandex.ru)*

Одной из основных проблем АЭ контроля промышленных сосудов давления является сложность применения в реальном времени известных критериев, предложенных в ПБ 03-593-03 (отменен), которые, с большой вероятностью, перейдут в новый нормативный документ. Возможность корректного применения критериев, заданных в аналитической форме (локально-динамический, интегральный, интегрально-динамический и др.), особенно с учётом помех, практически неизбежных при реальном контроле, существует только при пост-анализе данных контроля [1].

Но при АЭ контроле, и особенно это актуально при проведении пневматических испытаний в силу их опасности, важна скорость оценки регистрируемой активности в реальном времени: необходим запас времени для остановки нагружения (закрытие задвижек и пр.).

Проблему не вполне решает использование ПО с возможностью производить расчёты по критериальным формулам, т.к. в некоторых используются константы, требующие предварительного знания их значения, определяемого в лабораторных исследованиях образцов металла. Априорное знание констант, входящих в формулы – редкость, а вырезать образцы для определения констант из действующего оборудования при каждом оперативном контроле – нонсенс.

Нельзя не учитывать и влияние масштабного фактора: развитие дефектов в конструкциях, как правило, имеет иные особенности в сравнении лабораторными исследованиями разрушения образцов, которые послужили основой для большинства критериев [2].

Для критериев, рекомендованных в ПБ 03-593-03, предполагается их универсальность, но определение точного местоположения и размеров дефекта или предсказание его развития, например, напрямую зависят от типа дефектов (усталостная трещина, общая коррозия, расслоение и др.), имеющих разноплановую физическую природу развития. Это приводит к значительному разбросу параметров АЭ сигналов от разных типов источников [3].

В связи с выше изложенным представляется полезным, в дополнение к имеющейся системе нормативных критериев, объединить опыт специалистов промышленного АЭ контроля для создания своего рода «Атласа графических АЭ-образов дефектов». Сформировать его можно на основе реальных данных, полученных при проведении промышленного АЭ контроля. Способ качественной (визуальной) оценки регистрируемых данных в реальном времени часто – наиболее быстрый способ их оценки.

На качественном уровне развитие дефектов, наблюдаемых, например, на локационных графиках, носит общий характер для различных условий нагружения и разных систем АЭ контроля. Данный атлас может быть особенно полезен для начинающих специалистов.

В сущности, такого рода атлас можно характеризовать как приём, использованный в технологии MONPAC. Содержание этого документа примерно на 5/6 составляет описание множества реальных испытаний с представлением графического материала и их краткого анализа. В основе MONPAC используется зональный способ локации. Развитие технических средств АЭ контроля позволяет применять дополнительные локационные алгоритмы.

В качестве примеров возможных элементов атласа можно предложить анализ выявления нескольких дефектов, представленный в работе [1].

Как показывает наш многолетний опыт проведения АЭ контроля оборудования нефтепереработки (с 1992 года) выявление значительных дефектов – событие, не являющееся частым. Оно имеет место не более чем в 12-14% испытаний. При этом надо дополнительно учитывать, что в программу проведения АЭ контроля включается оборудование, работающее в условиях наиболее интенсивного коррозионного воздействия. Тем не менее, с учётом времени использования АЭ контроля, нами было зарегистрировано значительное число дефектов различного типа.

В данной работе в качестве возможных элементов атласа нами предлагается анализ АЭ активности от двух типов дефектов, зарегистрированных при проведении пневмоиспытаний.: сквозной дефект в корпусе колонны и повреждение плакировки на большой площади сосуда.

#### **Список литературы:**

1. Городович В.В Комаров А.Г., Толкачев В.Н. Регистрация дефектов III-IV класса в реальном времени: возможности метода, условия выявления, способствующие, мешающие и исключаютые факторы / Труды II Межд.н.-т. конф. «Инновационные технологии в методе акустической эмиссии» - 2010 - стр.1-13.
2. Розенштейн И.М. Хрупкое разрушение стальных сварных конструкций/ Заводская лаборатория. Диагностика материалов – 2008.№7 – стр.48-51.
3. Кутень М.М., Бобров А.Л. Исследование критериев оценки технического состояния объектов АЭ контроля при идентификации различных типов дефектов / Сборник тезисов АПМАЭ-2021, стр.95-96.

# **РОЛЬ И МЕСТО АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ.**

**В.А. Якушин**

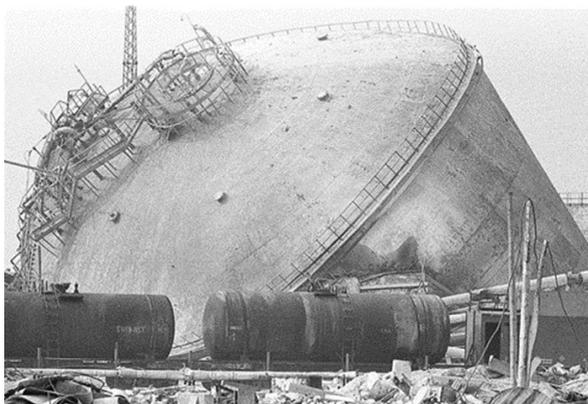
*ООО «НПК Изотермик», г. Москва, Россия,*

Принято считать, что бездефектная конструкция, устройства или сооружения может работать безотказно. В частности, на поиск дефектов направлен периодический контроль и мониторинг технического состояния, в том числе и акустико-эмиссионный.

На первый план в качестве угрозы безопасной эксплуатации ИР выступает нарушение условий эксплуатации, а именно, повышение внутреннего давления газовой фазы.

## **КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ**

Изотермический резервуар способен выдерживать давление жидкости до 300 – 500 кПа, но при этом большинство ИР проектируются на давление газа над жидкостью 10 – 15 кПа. Напряжения в стенке ИР на удалении от днища 0,5 – 0,7 м и более возрастают незначительно. Однако, в узлах стыка стенки резервуара с плоским днищем и купольной крышей изгибные напряжения возрастают пропорционально давлению газа.



Немногочисленные аварии изотермических резервуаров, происходивших ранее во всем мире, связаны именно с аварийным повышением внутреннего давления газа. Единственный документально подтвержденный случай полного разрушения ИР жидкого аммиака в г. Ионава (Литва) в 1989 году, связан также с повышением внутреннего давления (до 40 кПа при проектном давлении 10 кПа), вызванного

неисправностью оборудования, обеспечивающего процесс хранения (компрессора) и человеческим фактором. В истории не было случая разрушения ИР из-за недостаточной толщины его элементов (т.е. ошибок проектирования) или наличия дефектов сварных соединений.

Ранжирование возможных причин аварии по степени опасности означает не строгую зависимость, а лишь тенденцию. Повышение внутреннего давления до опасного предела в резервуаре большого объема занимает несколько часов или даже суток и, естественно, не всегда может привести к повреждению или разрушению резервуара, а лишь при стечении прочих неблагоприятных обстоятельств – отказе клапанов, невозможности оперативно исправить ситуацию, неправильно принятых персоналом решениях по исправлению ситуации и пр.

## **РОЛЬ И МЕСТО АЭ КОНТРОЛЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИР**

Система АЭ мониторинга будет являться дополнительным средством повышения безопасной эксплуатации ИР к штатным средствам контроля давления. Причем, в отличие от манометров, система АЭ мониторинга будет свидетельствовать о состоянии самого металла.

К сожалению метод акустической эмиссии, является лишь одним из методов неразрушающего контроля и не может дать полного представления о состоянии объекта контроля без натурального (внутреннего) диагностирования с применением других методов НК. Помимо этого, применение АЭ мониторинга имеет ограничения по температуре объекта контроля, и способу снятия сигналов с объекта контроля. Рабочий температурный диапазон преобразователей АЭ от минус 120 до 150°C, а диапазон рабочих температур контактной смазки от минус 60°C до 150°C

**Каковы же роль и место АЭ – контроля в обеспечении безопасной эксплуатации ИР? С нашей точки зрения это:**

1. АЭ - контроль в дополнение к штатным приборам контроля давления может указывать непосредственно на опасное состояние корпуса ИР и места расположения дефектов (растущие трещины или возникновение зон пластической деформации).
2. АЭ мониторинг должен сопровождать гидро-пневмо испытания с целью обнаружения и локализации дефектов, а также, определения локаций дефектов, для сокращения объемов диагностирования другими методами неразрушающего контроля.
3. Для идентификации источника эмиссии достаточно зонной локации, что вполне обеспечивается одним рядом датчиков АЭ в нижнем и верхнем поясах стенки ИР.
4. Постоянный АЭ мониторинг обязательно должен быть интегрирован в систему комплексного мониторинга технологической системы изотермического хранилища в целом.

### **Список литературы:**

1. API STD 620 “Design and construction of large, welded, low-pressure storage tanks” 12 edition, oct. 2013.
2. BS EN 14620 “Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0°C and -165°C.
3. Ханухов Х.М., Алипов А.В., Четвертухин Н.В., Чернобров А.Р. Конструкционные мероприятия по повышению безопасности и снижению риска эксплуатации изотермических резервуаров для хранения жидкого аммиака. «Безопасность труда в промышленности» 2015-№8 стр.74-82.
4. СП 512.1325800.2022 «Изотермические резервуары для хранения сжиженных газов. Правила обследования и мониторинга технического состояния»

## **ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ КОНТРОЛЕ ОБОРУДОВАНИЯ В РЕЖИМЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**Барат В.А.<sup>1</sup>, Елизаров С.В.<sup>1</sup> Медведев К.А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ООО «Интерюнис-ИТ», РФ, Москва,

<sup>2</sup> ООО «НТЦ ЭгидА», РФ, Москва,

*BaratVA@interunis-it.ru*

Акустико-эмиссионный (АЭ) метод имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными сканирующими методами контроля. Он обладает высокой чувствительностью к обнаружению дефектов, не требует сканирования поверхности объекта, обеспечивает дистанционное проведение контроля на участках от нескольких метров до сотен метров.

Существенным недостатком АЭ контроля, ограничивающим область его применения, является сложная процедура диагностирования, включающая выведение контролируемого объекта из эксплуатации. Проведение АЭ контроля в рабочем режиме возможно, но связано с риском пропуска дефекта из-за влияния различных технологических и внешних акустических шумов.

Для повышения помехоустойчивости метода АЭ специалистами ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ» была разработана система сбора данных SMART, реализующая автоматизированный способ регистрации данных. Применение системы SMART не требует задания настроечных параметров, таких как порог амплитудной дискриминации и время ожидания конца импульса, а обнаружение сигналов происходит на основании характерной импульсной формы с определенными соотношениями временных и частотных параметров. Подобный подход при регистрации данных позволяет устойчиво обнаруживать импульсы АЭ на фоне нестационарных технологических шумов высокой интенсивности.

В рамках данной работы представлен результат применения алгоритма SMART для обработки данных АЭ, полученных при контроле сварных соединений трубопроводов установки короткоциклового адсорбции (КЦА) в режиме эксплуатации. Сбор данных проводился непрерывно в течение 10-12 часов в беспороговом режиме в полосе частот 100-500 кГц, преобразователи GT200 с резонансной частотой 180 кГц были установлены попарно непосредственно в области сварных соединений.

Сложность обработки данных заключалась в необходимости выявления импульсов АЭ на фоне нестационарных технологических помех уровнем 60-65 дБ. Алгоритм обработки АЭ данных был реализован в две стадии, на первом этапе в режиме on-line с помощью системы SMART были выявлены фрагменты сигнала, содержащие импульсные составляющие. Затем с применением методов машинного обучения в режиме

постобработки из выборки зарегистрированных данных были выделены импульсы, соответствующие источникам АЭ. Наличие дефектов сварных соединений трубопроводах КЦА в местах локации источников АЭ было подтверждено на основании результатов ультразвукового контроля.

**Список литературы:**

1. ЕЛИЗАРОВ С.В., БАРАТ В.А., ШИМАНСКИЙ А.Г. Интеллектуальная акустико-эмиссионная система SMART нового поколения. В мире неразрушающего контроля. 2014. № 3 (65). С. 26-29.
2. ELIZAROV S.V., BARAT V.A., TERYTYEV D.A., KOSTENKO P.P., BARDAKOV V.V., ALYAKRITSKY A.L., KOLTSOV V.G., TROFIMOV P.N. Acoustic emission monitoring of industrial facilities under static and cyclic loading. Applied Sciences (Switzerland). 2018. Т. 8. № 8. С. 1228.

# КАЛИБРОВКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОБСТВЕННЫХ ШУМОВ

Иванов В.И., Шелобков В.И., Мусатов В.В., Сазонов А.А.

В настоящее время аттестация преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) проводится с использованием ряда документов, включая РД 03-300-99. В основу методов определения параметров положена реакция ПАЭ на нормальные смещение поверхности калибровочного блока, на который устанавливают ПАЭ. Используют различные схемы измерения параметров, которых насчитывается более 10 вариантов. Все они предусматривают использование устройства для возбуждения и излучения калибровочного сигнала. РД 03-300-99 построен на использовании импульсной характеристики ПАЭ с последующим определением параметров ПАЭ. Такие схемы отличаются относительно высокой сложностью и довольно большими погрешностями определения параметров.

Для упрощения процедуры измерения параметров ПАЭ предложено его возбуждение осуществлять использованием собственного теплового шума, сигнал которого является белым шумом в диапазоне частот от десятков кГц до нескольких МГц. Затем регистрируют шумовой сигнал ПАЭ связанный с изменением импеданса от частоты, измеряют частоты экстремумов сигнала, которые соответствуют частотам резонанса и антирезонанса. Схема измерения представлена на Рис.1.

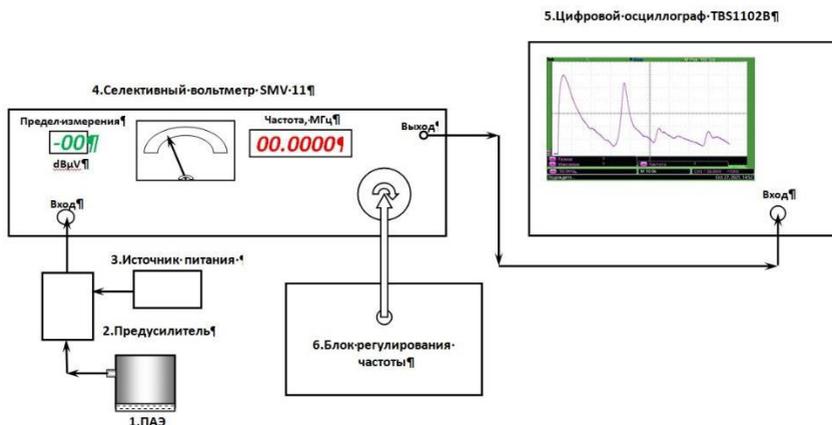


рис.1. Схема измерения шумовых характеристик ПАЭ.

Выполняется следующая последовательность операций: подключают калибруемый преобразователь 1 через стандартный предварительный широкополосный усилитель 2 с источником питания 3 ко входу промышленного селективного вольтметра 4 осуществляющего анализ спектра посредством перестройки частоты анализа. Изменяют частоту настройки селективного вольтметра в выбранном диапазоне

частот, соответствующем рабочему диапазону преобразователя с помощью блока 6. Регистрируют сигнал собственных тепловых шумов калибруемого ПАЭ в диапазоне рабочих частот на цифровом осциллографе 5.

В качестве примера реализации предлагаемой методики приведен результат измерений при выполнении калибровки серийного преобразователя GT200 №8318 (Рис.1). Преобразователь подключался ко входу селективного вольтметра SMV-11 фирмы VEB Messelektronik (ГДР) через стандартный предварительный усилитель PREF-015 фирмы INTERUNIS-IT (РФ). При перестройке частоты анализа в диапазоне 50 кГц – 500 кГц и подаче сигнала на вход цифрового осциллографа производилась регистрация сигнала собственных тепловых шумов преобразователя. Зарегистрированный сигнал отображает частотную зависимость импеданса калибруемого преобразователя  $Z$ , параметры которой содержат информацию о параметрах преобразователя в рабочем диапазоне частот. Тем самым в зарегистрированном сигнале присутствует информация о всех характерных особенностях калибруемого устройства.

Результат выполненных измерений параметров ПАЭ GT200 (№ 8318). представлен на Рис.2.

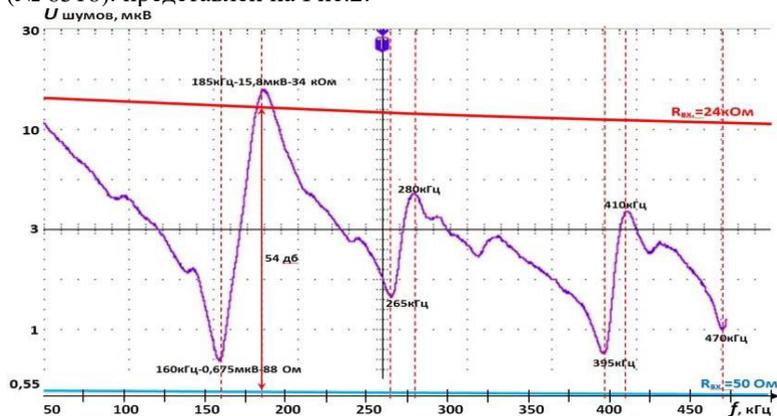


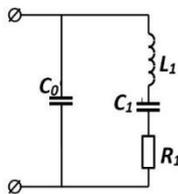
Рис.2. Сигнал шумов, соответствующий частотной зависимости импеданса ПАЭ GT200 зав.№ 8318

Формулы вычисления параметров ПАЭ:

$$\left. \begin{aligned} f_p &= \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}; \\ f_a &= \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{L_1 C_1 C_0}{C_1 + C_0}}}; \end{aligned} \right\} (1)$$

$$Q = \frac{2\pi f_p L_1}{R_1}; \quad (2)$$

$$k_p = \sqrt{1,17 \frac{f_a^2 - f_p^2}{f_a^2}} \quad (3)$$



Используя измеренные значения резонансной и антирезонансной частоты, а также собственной емкости  $C_0$ , (измеренной на низких частотах) и активное динамическое сопротивление  $R_1$  (измеренное на резонансной частоте), можно рассчитать, используя выражения (1)-(3) [1], другие параметры ПАЭ, а именно, добротность  $Q$ , коэффициент преобразования энергии -  $k_p$ ,  $L_1$  и  $C_1$ . При таких измерениях повышается точность и достоверность определения параметров ПАЭ, а также упрощается процедура измерения параметров. Отпадает необходимость в перестройке частоты сигнала, возбуждающего калибруемый преобразователь, рабочей среды, дополнительного приемного преобразователя.

**Список литературы:**

1. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. Москва: Техносфера, 2006. – 632 с.

# **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА СОСУДАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В АО АО «МАХАМ-ЧИРЧИҚ» ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**Нуриллаев Н.Ш.**

*АО «Махам-Чирчиқ», г. Чирчик, Узбекистан, info@maxam-chirchiq.uz*

Применение метода акустической эмиссии повышает надежность и эффективность эксплуатации различных объектов промышленности в течение всего срока их службы. При этом должен быть обеспечен уровень безопасной работоспособности оборудования.

АО «Махам-Чирчиқ» является одним из крупнейших предприятий химической промышленности Республики Узбекистан. Применение метода АЭ началось в 2005 г. под руководством начальника Технического Центра Песля В.А. За период с 2010 по 2022 г. был проведен АЭ контроль более чем 200 сосудов и аппаратов, работающих под давлением, с учётом повторных освидетельствований.

В сентябре 2022 г. руководством АО «Махам-Чирчиқ» была поставлена задача проведения методом АЭ контроля объектов, работающих под давлением выше 16.0 МПа. Основной целью проведения контроля было освидетельствование объектов, отработавших свой нормативный срок службы, который составляет 40-70 лет и более. В некоторых сосудах по конструктивным особенностям невозможно было провести техническое освидетельствование нижней части металлоконструкции.

Из-за отсутствия практики АЭ контроля таких объектов мы приступили к эксперименту. Для этого выбрали объект: колонна синтеза 1943 г. выпуска, производство Германии. Материал корпуса N1A (Ст20), высота  $L=12000$  мм, диаметр  $\varnothing=1250$  мм, толщина  $S=130$  мм. Материал шпилек К3 (Ст22К), их длина  $L=980$  мм, диаметр  $\varnothing=105$  мм. Применялось АЭ оборудование производства ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ».

На первом этапе изучался вопрос контроля шпилек крышек. Сначала были определены акустические свойства идентичной шпильки. После этого сняли крышку с объекта, установили ПАЭ на торцевой поверхности шпилек и на поверхности фланца корпуса сосуда, в который ввинчены шпильки. С помощью имитатора Су-Нильсена (диаметр 0.5 мм, твердость НВ вместо 2Н, что могло повлиять на результаты) провели измерение затухания. Получили следующие значения амплитуд на различных расстояниях: на 0.2 м  $79\pm 3$  дБ; на 0.3 м  $79\pm 3$  дБ; на 0.4 м  $78\pm 3$  дБ; на 0.5 м  $77\pm 3$  дБ. Коэффициент затухания составил  $9\pm 2$  дБ/м. Измеренное с помощью электронного имитатора значение скорости сигнала составило 3200 м/с. При анализе сигналов АЭ, проходящих через резьбовое соединение между фланцем корпуса и шпилек, разница амплитуд сигналов

АЭ между датчиками составила  $10 \pm 1$  дБ. Результаты измерения затухания на корпусе сосуда следующие: на 0.5 м  $79 \pm 2$  дБ; на 1.0 м  $77 \pm 2$  дБ; на 1.5 м  $75 \pm 2$  дБ; на 2.5 м  $73 \pm 2$  дБ; на 3 м  $70 \pm 2$  дБ. Коэффициент затухания составил  $8 \pm 1$  дБ/м. Измеренное с помощью электронного имитатора значение скорости сигнала составило 3600 м/с.

После проведения первого этапа эксперимента закрыли крышку, вмонтировали гайки и приступили ко второму этапу. На торцевой поверхности шпилек и на поверхности фланца корпуса сосуда, в который ввинчены шпильки, были установлены ПАЭ. После закрытия крышки доступ к шпилькам для имитатора имелся только между фланцем корпуса и крышкой. Зазор имел ширину 5 мм и глубину 50 мм, в этом пространстве было невозможно произвести излом стержня источника Су-Нильсена или установить электронный имитатор. Решено было установить между фланцем корпуса и крышкой металлическую пластину ( $h = 2$  мм), на нее установили электронный имитатор, но положительный результат не был достигнут. Затем попробовали слабый стук с помощью пластины, результаты были, но не очень достоверные. Разница амплитуд сигналов АЭ составляла 10-20 дБ, т.е. амплитуда сигналов АЭ отличалась от амплитуды при использовании имитатора Су-Нильсена.

Основываясь на результатах проведенного эксперимента, мы провели АЭ контроль нескольких сосудов высокого давления. При этом на шпильках при подъеме давления были зарегистрированы источники АЭ с большим временем нарастания и с низкой амплитудой (по сравнению с амплитудами имитаторов в ходе эксперимента), а на этапах выдержки источников сигналов АЭ не обнаружено. На корпусе сигналы АЭ также не зарегистрированы.

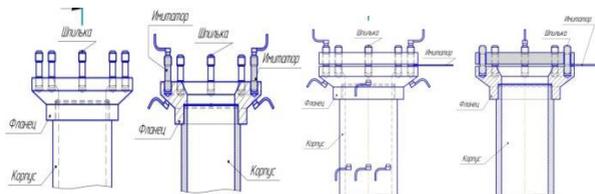


Рис. 1. Колонна синтеза

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ СВАРКИ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

**Нефедьев Е. Ю<sup>1</sup>., Стояновский Л. О<sup>2</sup>.**

*<sup>1</sup>ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия, [ne246@ya.ru](mailto:ne246@ya.ru)*

*<sup>2</sup>СПбПУ им. Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*

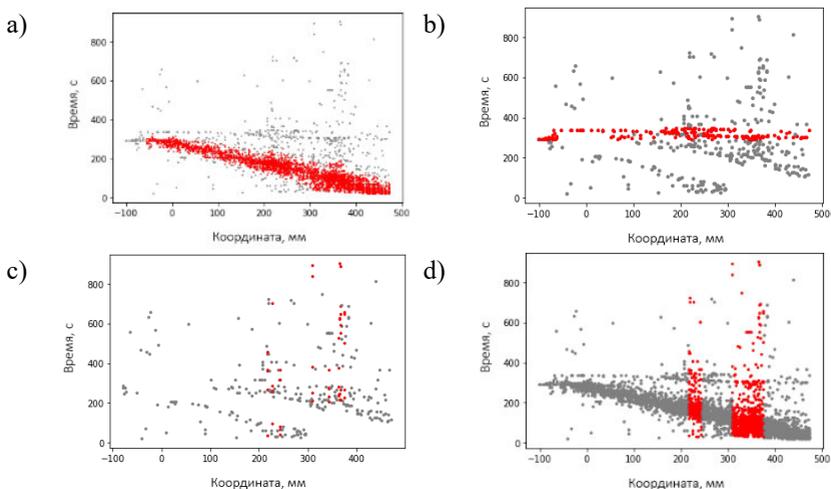
Метод акустической эмиссии (АЭ) широко используется для неразрушающего контроля [1-3], в том числе для контроля сварных соединений [4]. Одна из ключевых проблем использования АЭ заключается в необходимости ручной обработки данных, полученных во время контроля качества сварных швов. Наличие человеческого фактора при анализе данных делает процесс медленным и трудоёмким.

Для решения данной проблемы предлагается метод обнаружения дефектов на основе машинного обучения. Метод поиска дефектов состоит из четырёх шагов:

1. Выделение и удаление сварной дорожки алгоритмом кластеризации по плотности, аналогичным DBSCAN [5]. При этом важно, чтобы такой алгоритм мог повторно использовать результаты работы, полученные ранее, для оптимизации;
2. Удаляются участки с сигналами, относящимися к зачисткам сварного шва от шлака. Это временные отрезки, когда наблюдалось значительное увеличение количества сигналов;
3. Определяются участки с сигналами, относящимися к дефектам. Это области пространства, характеризующиеся наибольшей активностью сигналов АЭ;
4. Найденные координаты дефектов объединяются с ближайшими, так как фактически они относятся к одному дефекту.

Пошаговый пример работы метода приведен на рисунке 1. Полученный метод показал высокую надёжность на имеющихся данных.

Время обработки данных предлагаемым методом значительно меньше промежутка обновления данных, что позволяет использовать его в реальном времени для автоматического обнаружения дефектов сварных соединений. В результате снижается вероятность пропуска дефекта, а также привносится возможность стандартизации процессов в области неразрушающего контроля сварных соединений с помощью АЭ.



**Рис. 1.** Пример работы алгоритма: а) выделение сварной дорожки; б) определение зачисток шва; в) определение дефектов; д) конечный результат.

#### **Список литературы:**

1. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика, изд дом «Спектр», 2017. – 368 с.
2. Schofield B. H. Research on the sources and characteristics of acoustic emission. / B. H. Schofield // ASTM STP 505. 1972. P. 11-19.
3. Structural health monitoring of large structures using acoustic emission-case histories, Ono, K., Applied Sciences (Switzerland), 2019, 9(21), 4602.
4. On the possibility of producing defect-free welds under acoustic emission monitoring, Gomera, V.P., Nefedyev, E.J., Smirnov, A.D., International Review of Mechanical Engineering, 2017, 11(5), P. 343–349.
5. A Density-based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. / Ester M., Kriegel H.P., Sander J., Xu X. // In Proc. of International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 1996. — P. 226—231.

## РЕГИСТРАЦИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СТЕКЛО-ПЛАСТИКЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

**Башков О.В.<sup>1</sup>, Ромашко Р.В.<sup>2</sup>, Безрук М.Н.<sup>2</sup>, Башков И.О.<sup>1</sup>,  
Бобруйко Д.А.<sup>2</sup>, Башкова Т.И.<sup>1</sup>**

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет,*

*<sup>1</sup>Комсомольск-на-Амуре, Россия, [bashkov@knastu.ru](mailto:bashkov@knastu.ru)*

*<sup>2</sup>Институт автоматизи и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,  
Россия, [romashko@dvo.ru](mailto:romashko@dvo.ru)*

Разработка новых материалов приводит к необходимости использования датчиков, встраиваемых в конструкции с целью их применения в течение всего периода эксплуатации объекта контроля. В этом случае волоконно-оптические датчики (ВОД) акустической эмиссии (АЭ) имеют ряд преимуществ [1], позволяющих встраивать их в структуру полимерных материалов, армированных волокнами. ВОД на основе адаптивных интерферометров позволяет их использовать в условиях низкочастотного шума в зависимости от типа применяемого фоторефрактивного кристалла [2]. Каждый встроенный в структуру изделия ВОД имеет собственную АЧХ, в связи с чем требуется учет данной информации при оценке параметров регистрируемых сигналов, в особенности, если это касается частотно-зависимых параметров АЭ.

В работе представлены результаты исследования влияния нагрузки на изменение частотных характеристик сигналов АЭ, регистрируемых ВОД, встроенным в образец стеклопластика при его растяжении. Оптическое волокно датчика было встроено в структуру образца, изготовленного методом вакуумной инфузии из 10 слоев стеклоткани. Для регистрации сигналов АЭ был использован адаптивный лазерный голографический интерферометр на фоторефрактивном кристалле CdTe. Образец нагружался растяжением в испытательной машине ступенями по 2500 Н до разрушения (~15 кН).

Для анализа влияния напряжённого состояния оптического волокна и образца на спектр сигналов АЭ, в периоды между нагружениями выполнялось возбуждение сигналов источником Су-Нильсена. Дополнительно сигналы регистрировались пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП) GT301.

На рис. 1 представлены диаграммы частотных спектров из 6 магнитуд, рассчитанных как отношение RMS определенной частотной компоненты вейвлет преобразования к RMS сигнала. Установлено, что для сигналов, регистрируемых ВОД, наблюдается более равномерный спектр, что связано с более гладкой АЧХ лазерного интерферометра.

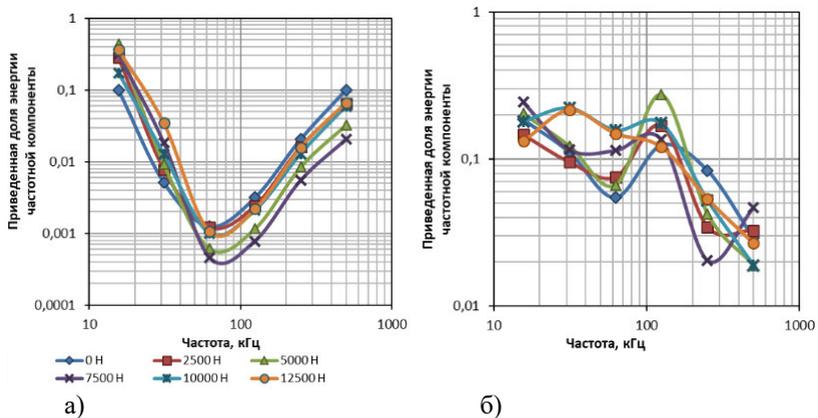


Рис. 1. Диаграммы зависимости энергии от частоты сигналов АЭ: а) ВОД; б) ПЭП

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00838).

#### Список литературы:

1. Bashkov O.V. et al. Sensitivity Analysis of Adaptive Holographic Fiber-Optic Acoustic Emission Sensors during the Registration of Acoustic Waves in a Plate //IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. - V. 459. – P. 062104.
2. Bashkov O.V. et al. Registration of Acoustic Emission Signals in Polymer Composite Material during Its Destruction by Means of Embedded Adaptive Fiber-Optic Sensor// Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. - V. 86(1). - P. S13–S19.

## СПОСОБ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Попов А.В., Евдокимов Е.М., Лабина М.А.

ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Россия, [avpnil@rambler.ru](mailto:avpnil@rambler.ru)

В процессе эксплуатации летательных аппаратов при нагружении трубопроводов рабочей жидкостью, при возникновении кавитации, в материале происходит релаксация скопившихся микродефектов с дальнейшим переходом в макродефект (трещину), что и является предразрушающим состоянием.

Существующие на сегодняшний день способы технической диагностики трубопроводов гидравлических систем летательных аппаратов не позволяют своевременно выявлять скрытые и развивающиеся дефекты типа несплошностей (трещин) [1].

Разработан способ акустико-эмиссионной диагностики трубопроводов гидравлических систем летательных аппаратов. При проведении акустико-эмиссионной диагностики бездефектного трубопровода под давлением рабочей жидкости с применением многоканальной акустико-эмиссионной системы контроля [2] на основе метода инвариантов на экране ноутбука формируются зоны «Безопасно», «Опасно» и «Критически опасно».

При нагружении контролируемого трубопровода в зоне «Безопасно» (нормальное состояние) источниками сигналов АЭ в материале выступают единичные микротрещины. В зоне «Опасно» (предразрушающее состояние) микротрещины объединяются в макротрещину. В зоне «Критически опасно» (разрушение) происходит образование макротрещины (рисунок).

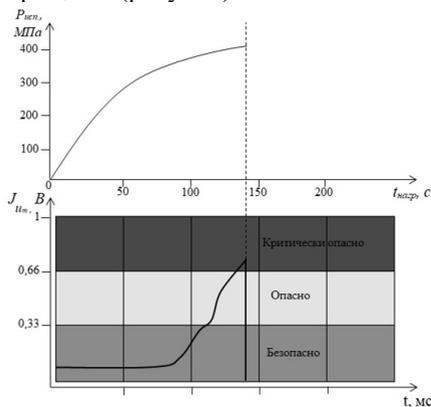


Рисунок – Изменение «свёртки» инвариантов при нагружении до разрушения трубопроводов из сплава 12Х18

### **Список литературы:**

1. ОСТ 1 00095-73. Гидросистемы силовые летательных аппаратов. Давления. – 4 с.
2. Патент № 2659575 Российская Федерация, МПК G01N 29/14 (2006.01). Многоканальная акустико – эмиссионная система контроля силовых элементов конструкций: № 2017117546: заявл. 19.05.2017; опубл. 03.07.2018 / Попов А.В., Волошина В.Ю., Сиренко И.Л., Тесля Д.Н., Карпенко О.Н., Филимонов К.С.
3. Попов А.В. Способ оценки процессов разрушения конструкций при акустико-эмиссионном контроле: пат. 2233444 Российская Федерация. 2004. Бюл. № 21. 5с.
4. Попов А.В., Комлев А.Б. Тесля Д.Н. Система оценки прочности конструкции авиационной и ракетно-космической техники на основе метода акустической эмиссии. // Контроль. Диагностика. 2018. - №8 (242), - С.32-37.

## ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЕКТА ПРИ АНАЛИЗЕ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ПРОЦЕССЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Тюрин Е.А., Ярославкин А.Ю.

*ФГБОУ ВО «СамГТУ», г. Самара, Россия, Gebja140595@mail.ru*

Процесс кристаллизации непрерывно сопровождается эффектом акустической эмиссии (АЭ). Параметры сигнала АЭ связаны с физическими изменениями, которые протекают в процессе кристаллизации. Соответственно актуальной является задача по поиску связи между параметрами акустических сигналов и получаемой структурой слитка

Для исследования процесса кристаллизации алюминиевого сплава были проведены три группы опытов (А99, и две группы с различным содержанием модификатора TiB). Время кристаллизации составляло около 15 секунд. Для всех экспериментов перед заливкой с поверхности расплава убиралась оксидная пленка и шлаковые включения[1].

Для обработки полученных данных с трех групп экспериментов было проведено деление на обучающую выборку и тестовую (объем, которой составлял 20% от всего объема), которая предназначена для оценки ошибок и точности. Для снижения случайных составляющих, связанных с неадекватной моделью, в алгоритме было предусмотрено, что процедура обучения повторялась заново 100 раз, результаты каждой итерации записывались в таблицу. Для удобства наблюдения и обработки были выбраны временные отрезки по 3 секунды. Это наиболее оптимально по количеству сигналов в изучаемом промежутке времени, а также по возможности контролировать изменение физики процесса.

В результате дальнейшей программной обработки модулем tsfresh были просчитаны на основе первоначальных данных больше 700 метрик (metrics), по которым создана новая модель. Произведено 100 итераций по тестированию и рассчитана статистика эффективности алгоритма классификации.

По 700 метрикам было выделено 4 группы основных метрик для дальнейшего применения в качестве системы классификации.

1. Группа аппроксимационных характеристик линейной модели по минимальному, максимальному и среднему значению;

2. Выборочные характеристики (коэффициент эксцесса и асимметрии)

3. Группа характеристик энтропии

4. Автокорреляционная функция

По данным найденным группам метрик далее проводилась классификация всех исследуемых сигналов на принадлежность модифицированного и чистого алюминия.

В результате проведенного исследования было показано, что модуль `tsfresh`, использованный для поиска изменяющихся метрик, позволил в большинстве случаев повысить точность классификации экспериментальных данных.

Указанный программный продукт позволяет автоматизировать обработку временных рядов научно-исследовательских работ для выявления закономерностей, результат работы может указывать дальнейшее направление поиска.

### **Список литературы:**

1. Тюрин Е.А. Акустико-эмиссионная система для исследования влияния модификатора `alti5bl` на процесс кристаллизации алюминия / Е.Е.Ярославкина, Е.В.Мельников, Е.А.Тюрин, А.Ю.Ярославкин, П.Ю.Зобнин, А.В.Бочкарев // В сборнике: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XXI Международной конференции. В 2-х томах. Под редакцией С.А. Никитова, Д.Е. Быкова, С.Ю. Боровика, Ю.Э. Плешивцевой. 2019. С. 188-191.

# **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТОДА АЭ. КВАЛИФИКАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ АЭ, КОНТРОЛИРУЮЩИХ ОБОРУДОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ. ДИСКРЕДИТАЦИЯ МЕТОДА. НЕЗАВИСИМАЯ ОЦЕНКА КВАЛИФИКАЦИИ СПЕЦИАЛИСТОВ. СЕРТИФИКАТ ОБСЛУЖИВАНИЯ СИСТЕМ АЭ.**

**Медведев К.А.**

*ООО «НТЦ «Эгида»*

В 2024 году острой проблемой метода АЭ является недостаточный, по мнению автора доклада, уровень квалификации специалистов, аттестованных на выполнение контроля на опасных производственных объектах.

Аттестация предполагает проверку знаний теоретической части, выполнение практического задания на образце заданной формы (обычно это прямоугольная плита 1 на 1.5 метра), с демонстрацией работоспособности локации при обнаружении источников АЭ. Итоговым заданием является разработка технологической карты контроля и заполнение формы заключения и протокола по результатам контроля. Как правило, для итоговых заданий предоставляется заранее записанный файл данных АЭ.

По результатам такой аттестации специалист получает 2 уровень и может самостоятельно проводить контроль оборудования на опасных производственных объектах.

Обучение перед аттестацией занимает 80 часов. Основное время обучения – теоретическая часть метода АЭ.

Такой подход в образовательно-аттестационной системе создал большое количество формально аттестованных специалистов, имеющих недостаточные практические навыки и недостаточную квалификацию. Работники системы неразрушающего контроля, которые прошли аттестацию «альтернативным способом» выносятся за скобки.

Неспособность распознать источник акустической эмиссии в режиме онлайн приводит к негативным последствиям как для владельцев испытываемого объекта, так и для метода в последующем.

Дискредитация метода – ежедневная преграда для расширения области использования метода. Практически каждый потенциальный «заказчик» работ, требует демонстрации работоспособности метода, несмотря на положительный результат на аналогичных объектах других предприятий.

Отсутствие ежегодного технического обслуживания АЭ систем у изготовителя приводит к дополнительным осложнениям при проведении контроля.

В целях решения данной проблемы метода акустической эмиссии автором предлагается:

- Пересмотреть методы и способы обучения по АЭ.
- Организовать независимую оценку квалификации специалистов с выдачей сертификата.

Разработать регламент ТО у производителя с выдачей сертификата о исправности АЭ-системы (дополнение к проверке).

## ТЕХНОЛОГИИ И КРИТЕРИИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

Городович В.В., Комаров А.Г., Митрофанова И.А.,  
Сергеев И.В., Толкачев В.Н.

*АО «ВНИКТИнефтехимоборудование», г. Волгоград, Россия,  
agkomarov@vnikti.rosneft.ru*

Нормативными документами, действовавшими ранее правилами [1] и действующим сейчас ГОСТ [2] по проведению АЭК предусмотрено, что обработка и анализ данных выполняются с помощью выбранной системы классификации источников АЭ и критериев оценки результатов контроля.

Применяемая при практическом АЭК система классификации источников и критериев оценки во многом зависит от механических и акустических свойств материала объекта контроля, а также от типа испытания.

В докладе предлагается систематизация распространенных критериев оценки состояния оборудования, работающего под давлением, приводятся соответствующие технологии контроля.

Рассматриваемые критерии сведены в следующие группы:

1. Критерии, связанные с планарной локацией и восстановленными параметрами АЭ импульсов;
2. Критерии, связанные с зонной локацией;
3. Критерии, связанные с активностью и/или интенсивностью источников АЭ;
4. Прочие критерии.

В докладе рассмотрены следующие критерии:

1. **Критерий непрерывной АЭ** – ориентирован на выявление источника течи [1];
2. **Стандарт EN 14584** – включает требования к расположению ПАЭ, к программе испытания, основан на локационной восстановленной амплитуде событий [6];
3. **Амплитудный критерий** – основан на амплитудном распределении АЭ событий с учетом затухания АЭ сигналов и восстановленной амплитуде [8];
4. **Классификация по концентрационно-динамическому показателю** источника акустической эмиссии – является комплексным (составным) и учитывает концентрацию индикаций источников АЭ и характеристики активности этих индикаций [8];
5. **Стандарт (JIS) Z 2342** – оценивает техническое состояние сосуда, работающего под давлением, путем объединения лоцированных АЭ событий, генерируемых дефектными зонами объекта, в кластеры [13];
6. **BPVC ASME** – служит основой при формировании критериев пригодности к эксплуатации для конкретных объектов. Конкретные

значения критериальных параметров зависят от условий контроля, материала объекта и его состояния [4];

7. **Технология и критерии MONPAC** – предполагает определенную программу подготовки и проведения АЭК, зонную локацию источников АЭ, обработку АЭ данных по определенным правилам, вводит понятия Силового и Исторического Индекса [12];
8. **«Весовые» критерии** – система критериев на основе положений BPVC, Силового и Исторического Индексов;
9. **Стандарт EN 15495** – включает требования к расположению ПАЭ, к программе испытания, основан на зонной локации [7];
10. **Локально-динамический критерий** – характеризует процесс развития дефектов в зависимости от параметра нагружения [8];
11. **Стандарт ASTM E569/E569M** и его расширение от J. D. Leaird – определяет процедуру регистрации, локации и классификации источников АЭ, выявленные источники оцениваются традиционными методами НК [5], [11];
12. **Комбинированный зонно-локационный критерий** – является комбинацией нескольких критериев, подразумевающих как зонную, так и расчетную локацию. Учитывается наличие источников с высокой концентрацией лоцированных событий АЭ, а также нарушение критериев оценки на ближайших ПАЭ [14].

## Выводы

Рассмотренные критерии сведены в таблицу (фрагмент таблицы приведен ниже), в которой критерии систематизированы по области действия, видам локации, способам обработки данных, наличия численных значений коэффициентов, ранжирования, реализации в ПО и т. д.

Параметр	Критерий непериодической АЭ	EN 14584	Амплитудный критерий	Концентрационно- динамический	JIS Z 2342	ASME BPVC	MONPAC	Весовые критерии (CAIS)	EN 15495	Локально- динамический	ASTM E569	Зонно-локационный критерий
Национальный/международный стандарт		+		+	+	+			+		+	
Область действия: металл/композиты	+/+	+/-	+/-	+/-	+/-	+/+	+/-	+/-	+/-	+/+	+/-	+/-
Планарная локация	+	+	+	+	+						+	+
Зонная локация	+					+	+	+	+		+	+

Количественные значения критериев		+	+	+	+	+	+	+	+			+
Ранжирование, кол-во градаций	2	3	4	4	4	-	5	3	5	4	5	4
Реализация в ПО	+	+	+	+	-	-	+	-	+	+	+	+

### Список литературы:

1. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
2. ГОСТ Р 52727-2007. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.
3. ГОСТ Р ИСО 12716-2021. Контроль неразрушающий. Акустико-эмиссионный контроль. Термины и определения. (Предварительная версия).
4. ASME BPVC. Vol V Article 12. Acoustic emission examination of metallic vessels during pressure testing.
5. ASTM E569/E569M-20. Standard Practice for Acoustic Emission Monitoring of Structures During Controlled Stimulation.
6. EN 14584:2013. Non-destructive testing – Acoustic emission – Examination of metallic pressure equipment during proof testing – Planar location of AE sources.
7. EN 15495:2007. Non-Destructive testing – Acoustic emission – Examination of metallic pressure equipment during proof testing – Zone location of AE sources.
8. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика: справ. М.: Издательский дом «Спектр», 2017.
9. Бигус Г. А., Иванов В. И., Быстрова Н. А. и др. АЭ контроль. Учебное пособие для специалистов I и II уровня. – М: СертиНК, 2008.
10. Nondestructive Testing Handbook. Volume 5. Acoustic Emission. ASNT, 1987.
11. James D. Leaird. Acoustic Emission Training Guide: How to Ensure an Accurate and Valid Acoustic Emission Test, Greensland Publishing Company, Sacramento, California, 1997.
12. Timothy J. Fowler, James A. Blessing, Peter J. Conlisk and Terry L. Swanson. The MONPAC System., Journal of Acoustic Emission, Volume 08, № 3, 1989, pp. 1–8.

13. Y. Mori, M. Shiva, M. Nakano, K. Iwai. «New concept of AE standard: JIS Z 2342-2002 Method for acoustic emission testing of pressure vessels during pressure tests and classification of test results». Journal of Acoustic Emission, Volume 08, № 21, 2003, pp. 197–205.
14. Комаров А. Г. A-Line. Выполнение акустико-эмиссионного контроля. Практическое руководство – М.: Издательский дом «Спектр», 2023.

# ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД КАЛИБРОВКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Кирпичёв А. А.<sup>1</sup>, Симчук А. А.<sup>1</sup>, Степанов Л. В.<sup>1</sup>, Умаров А. А.<sup>1</sup>,  
Гладышев Е.Е.<sup>2</sup>, Митрохин А.М.<sup>2</sup>, Громов А.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО «ГТЛАБ», Саров, Россия, [info@gtlab.pro](mailto:info@gtlab.pro)

<sup>2</sup> ЦСМ РОССТАНДАРТА в Нижегородской обл., Нижний Новгород,  
Россия, [mail@nncsm.ru](mailto:mail@nncsm.ru)

<sup>3</sup> ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия, [nio30@olit.vniief.ru](mailto:nio30@olit.vniief.ru)

Для калибровки преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ) импульсным методом используют воздействие на вход ПАЭ поверхностных акустических волн Рэлея либо формы дельта-импульса, либо ступенчатой формы. Для определения параметров волны используется образцовый ПАЭ. С помощью данного метода можно определить основные параметры ПАЭ: коэффициент преобразования, число выбросов импульсной характеристики (ИХ), период основных колебаний ИХ, энергию ИХ, а также амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) ПАЭ.

Калибровка образцовых ПАЭ, применяемых в ООО «ГТЛАБ», проводится с помощью эталона ФБУ «Нижегородский ЦСМ» рег. № 3.1.ЗБН.1616.2014, который соответствует 2 разряду по Государственной поверочной схеме (ГПС).

Применение при калибровке образцового ПАЭ не противоречит ГПС при условии значения показателя точности метода измерений в виде относительной погрешности при передаче единицы не более 5,0 %. Но при этом ГПС непосредственно не предусматривает применение импульсной калибровки при передаче единицы амплитуды ультразвукового смещения к ПАЭ.

Результаты сравнения двух методов передачи (с применением эталона 2 разряда по ГПС 3.1.ЗБН.1616.2014 и импульсного метода с образцовым ПАЭ) показывают показатели сходимости методов, удовлетворяющие требованиям ГПС.

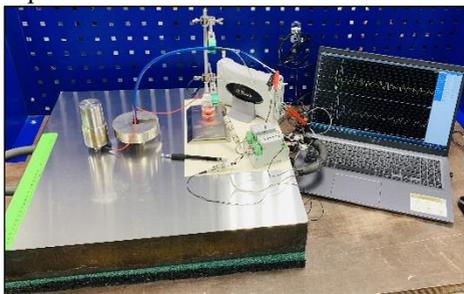


Рисунок 1 – Внешний вид установки, применяемой в ООО «ГТЛАБ» для импульсной калибровки ПАЭ

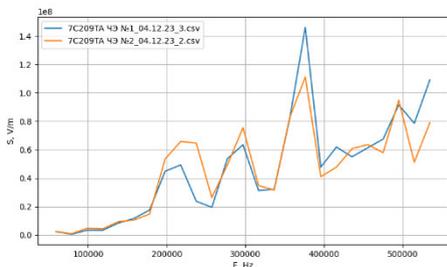


Рисунок 2 – АЧХ чувствительных элементов ПАЭ 7С209ТА, полученных с помощью импульсного метода калибровки ПАЭ

Аргументами в пользу использования импульсного метода служат:

- специфика применения ПАЭ и акустико-эмиссионной аппаратуры на промышленных объектах, которая заключается в регистрации и анализе именно импульсных воздействий, вызванных рэлеевскими волнами, распространяющимися от источников акустической эмиссии;
- отсутствие на рынке серийно выпускаемых установок для поверки/калибровки ПАЭ.

# ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА АЭ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ СТАТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ БЕЗ ВЫВОДА ЕГО ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Мисейко А.Н.

ООО «НТЦ «ЭгидА», г. Москва, Россия, [miseyko-an@yandex.ru](mailto:miseyko-an@yandex.ru)

Метод акустической эмиссии (далее – АЭ) представляет собой один из наиболее перспективных методов оценки технического состояния статического оборудования в режиме реального времени. Он позволяет регистрировать с высокой чувствительностью процессы образования и развития дефектов, представляющих опасность для целостности и работоспособности эксплуатируемого оборудования. ООО «НТЦ «ЭгидА» обладает комплексом технических средств, уникальным алгоритмическим и программным обеспечением, запатентованными решениями по беспороговой регистрации данных АЭ, которые позволяют проводить АЭ-контроль статического оборудования без вывода его из эксплуатации («на режиме») и выявлять различные дефекты.

АЭ-контроль «на режиме» статического оборудования актуален в следующих случаях:

- если имеется подозрение на наличие в оборудовании скрытых дефектов, могущих привести к нарушению целостности и работоспособности оборудования, его внеплановому останову;

- если имеется риск деградации материала оборудования с высокой скоростью, что может привести к катастрофическим последствиям, возникновению инцидентов и аварий;

- если происходили отклонения от технологического регламента в результате изменения состава сырья, давления, расхода и температуры, что могло инициировать возникновение дефектов в оборудовании;

- если к началу остановочного ремонта необходимо иметь информацию о наличии и местах расположения критических дефектов, требующих первоочередного устранения.

В докладе приведены примеры применения метода АЭ для обнаружения дефектов различных видов статического оборудования без вывода его из эксплуатации («на режиме»).

Пример 1. Результаты АЭ-контроля «на режиме» теплообменника установки производства водорода. В результате контроля был выявлен пропуск бобышки на распределительной камере и заводом предприняты меры по предотвращению утечки. Также на корпусе теплообменника были зарегистрированы зоны, в которых при последующем внутреннем осмотре выявлены очаги язвенной коррозии на внутренней поверхности на глубину 35-40% от толщины стенки. Контроль проводился на протяжении 12 месяцев и позволил своевременно спланировать замену аппарата, когда его состояние стало приближаться к критическому.

Пример 2. Результаты АЭ-контроля «на режиме» абсорбера установки гидроочистки. В предыдущих обследованиях было выявлено расслоение металла верхнего днища и несплавление в шве приварки верхнего днища к обечайке. АЭ-контроль «на режиме» в течение 15 мес. позволил оценить динамику развития дефектов и спланировать своевременную замену аппарата.

Пример 3. Результаты АЭ-контроля «на режиме» реактора гидроочистки. По его итогам были зарегистрированы зоны источников, в которых внутренним осмотром и цветной дефектоскопией выявлены протяженные трещины (длиной до 930 мм) в верхней горловине реактора, обусловленные действием термосиловых нагрузок в процессе эксплуатации. Предприятием был спланирован объем ремонта и сокращено время ремонта реактора на 2 дня.

Пример 4. Результаты АЭ-контроля «на режиме» коксовой камеры установки замедленного коксования. Режим работы камеры включает коксование, пропарку, охлаждение, опрессовку, прогрев. АЭ-контроль проводился в течение 7 месяцев и показал наличие 22 зон, в которых при последующем внутреннем осмотре были обнаружены зоны, где произошло расслоение плакировки. Дефекты были устранены.

Пример 5. Результаты АЭ-контроля резервуара для хранения нефтепродуктов на морском терминале. По его результатам на днище резервуара были зарегистрированы 2 зоны источников с параметрами, характерными для коррозионных повреждений. Резервуар был освобожден от продукта, данные подтвердились.

Пример 6. Результаты АЭ-контроля технологического трубопровода холодильного тракта, секция 100, установка изомеризации. Трубопровод был аварийно остановлен из-за пропуска в одном из сварных швов, его отремонтировали и снова запустили. После пуска был проведен АЭ-контроль «на режиме» и выявлен ряд сварных соединений с выносом металла в околошовной зоне до 80% от номинальной толщины стенки.

АЭ-контроль оборудования «на режиме» обеспечивает:

- обнаружение и определение местоположения критических дефектов задолго до момента выхода оборудования из строя;
- существенное сокращение объема диагностических и ремонтных работ за счет получения предварительной информации о состоянии оборудования до его останова и начала ремонта;
- обоснование объема и периодичности технического обслуживания на основе оценки динамики развития дефектов;
- определение диапазона значений технологических параметров (окна операционной целостности), при которых достигается оптимальная надежность оборудования в межремонтный интервал.

# АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ГИДРИРОВАНИИ ТИТАНА И ЦИРКОНИЯ

**А.А. Кузнецов**, С.М. Кунавин, **П.Г. Бережко**, И.Ф. Кашафдинов,  
С.А. Митяшин, В.В. Мокрушин, И.А. Царева, О.Ю. Забродина,  
Д.О. Подыниглазов, А.С. Романов

*ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»  
г. Саров Нижегородской обл., Россия*

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, гидрирование титана, гидрирование циркония, растрескивание

В работе исследованы сигналы акустической эмиссии (АЭ), возникающие при взаимодействии образцов металлического титана и циркония с водородом, и изменения, происходящие в гидрируемых образцах и являющиеся источниками возникновения акустических сигналов высокой амплитуды.

Объекты исследования: куски йодидного титана и циркония; титановая губка (размеры ~10 мм); порошок титана, изготовленный из губки (размеры частиц менее ~40 мкм); стружка, полученная из компактного йодидного циркония; «крупный» порошок электролитического циркония фракции от 80 до 550 мкм; «мелкий» порошок электролитического циркония с размером частиц менее 80 мкм. Запись сигналов АЭ, сопровождающих гидрирование металлов, проводили в непрерывном режиме с использованием мобильной установки, изготовленной на базе стандартного оборудования, производимого компанией ООО «Глобал Тест» (Россия) и программного обеспечения PowerGraph (Россия).

Установлено, что источником возникновения акустических сигналов высокой амплитуды во всех случаях является растрескивание частиц титана и циркония на макроуровне, которое приводит к образованию протяженных трещин и разломов на поверхности индивидуальных частиц. Причиной растрескивания являются внутренние напряжения, возникающие в образцах из-за роста объема твердой фазы вследствие изменения структуры материала при образовании гидридов титана и циркония. Показано, что атомное отношение  $[H]/[Ti]$  в твердой фазе, соответствующее максимуму амплитуды сигнала акустической эмиссии, зависит от исходного состояния металла, и в условиях проведенных нами экспериментов закономерно возрастает в ряду: йодидный титан – титановая губка – порошок титана (рисунок 1а). Наличие такой закономерности связано с различным размером частиц исследуемых образцов, и может быть объяснено уменьшением внутренних напряжений, возникающих в указанном ряду в гидрируемых образцах, вследствие увеличения объема твердой фазы при гидрировании.

Атомное отношение  $[H]/[Zr]$  в твердой фазе, соответствующее максимуму амплитуды сигнала акустической эмиссии, закономерно увеличивается в ряду: куски компактного йодидного циркония – стружка из йодидного циркония – «крупный» порошок электролитического циркония – «мелкий» порошок электролитического циркония (рисунок 1б), что хорошо согласуется с результатами исследований по гидрированию образцов металлического титана.

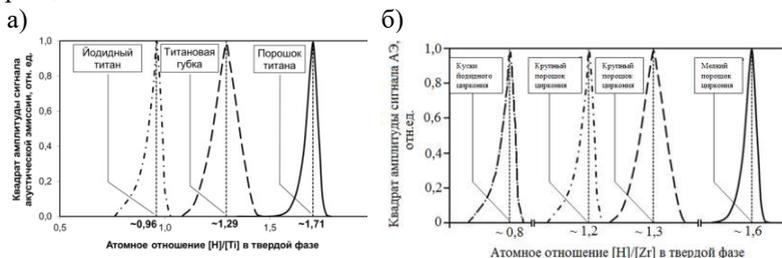


Рисунок 1. Зависимости квадрата амплитуды сигнала АЭ от величины атомного отношения  $[H]/[Ti]$  (а) и  $[H]/[Zr]$  (б) в твердой фазе при гидрировании

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭ» М.В. Цареву, Е.В. Жилкину, В.В. Ярошенко и А.Е. Канунову за помощь в организации и проведении работ.

## ОЦЕНКА АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОМОЩИ ИНВАРИАНТОВ

**Попов А. В.**

*ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Россия, avpnil@rambler.ru*

Разработан метод диагностики, основанный на анализе изменения вида и характеристик распределений параметров акустико-эмиссионных (АЭ) процессов при помощи инвариантов, что позволяет оценивать трещиностойкость вне зависимости от формы, размеров и предыстории эксплуатации конструкций [1-5].

Разработаны требования и созданы новые образцы многоканальных АЭ систем [6-8].

Проведено диагностирование конструкций потенциально опасных объектов авиационной и ракетно-космической техники [8].

### **Список литературы:**

1. Расщепляев Ю.С., Попов А.В. Метод инвариантов в задаче исследования потоков акустической эмиссии // Дефектоскопия, 2000. - №10. - С. 79-82.
2. 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.
3. Костоготов А.И. Попов А.В., Акустико-эмиссионный метод моделирования процессов разрушения материалов // Дефектоскопия, 2002. - №10. - С.3-7.
4. Попов А.В. Акустико-эмиссионный метод вынужденных колебаний при определении дефектов в тонкостенных сосудах давления // Дефектоскопия, 2005. - №3. - С.27-31.
5. Попов А.В. Акустико-эмиссионный метод оценки ресурса конструкций на основе инвариантов теории надёжности // Проблемы машиностроения и надёжности машин, 2003. -№4. - С.118-122.
6. Попов А.В. Способ оценки процессов разрушения конструкций при акустико-эмиссионном контроле: пат. 2233444 Российская Федерация. 2004. Бюл. № 21. 5с.
7. Попов А.В., Тесля Д.Н., Волошина В.Ю., Сиренко И.Л., Филимонов К.С. Многоканальная акустико-эмиссионная система контроля силовых элементов конструкций. пат. 2359575 Российская Федерация. 2018. Бюл. № 19. 5с.
8. Попов А.В., Комлев А.Б. Тесля Д.Н. Система оценки прочности конструкции авиационной и ракетно-космической техники на основе метода акустической эмиссии. // Контроль. Диагностика. 2018. - №8 (242), - С.32-37.

# **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ АЕ-STRATEGY, КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

**А.Н. Кузьмин, А.В. Жуков**

*ООО Стратегия НК, г. Екатеринбург, Российская Федерация*

Цифровизация диагностических систем наряду с использованием искусственного интеллекта являются современным мировым трендом. В частности, анализ результатов диагностики в многомерном пространстве диагностических признаков позволяет без участия оператора идентифицировать опасные дефекты, которые развиваются в процессе длительной эксплуатации. Однако подходы, используемые в настоящее время в обработке данных акустико-эмиссионного контроля (АЭК) в серийных АЭ комплексах, устарели и ограничивают как возможности метода, так и применение АЭК на практике. Речь, в частности, идет о низкой достоверности результатов АЭК в условиях субъективности, низкой эффективности лоцирования источников АЭ и оценки их классов опасности. Кроме того, на практике диагностики промышленных объектов не применяются новые возможности метода АЭ, а именно оценка типологии дефекта – источника АЭ, уточнение его пространственного местоположения и относительных геометрических параметров.

В докладе представлен новый раздел технологии автоматизированной обработки данных АЭ контроля АЕ-Strategy разработки компании Стратегия НК применительно к протяженным объектам транспорта газа. Раздел построен на цифровом анализе характерных мод волнового пакета - дисперсионных кривых волн Лэмба. В качестве рабочих инструментов специалиста-практика по АЭК в АЕ-Strategy разработано 2 основных блока обработки и анализа данных, соответственно. В первом блоке осуществляется идентификация сигналов АЭ, относящихся к опасным развивающимся дефектам на фоне производственных шумов и помех. Особенностью блока является выделения специальных компонент спиральных волн в трубопроводах, на основе чего производится уточнение пространственно-радиального положения источника АЭ по отношению к линейной координате дефекта. Во втором блоке реализован алгоритм системы принятия решения, реализованный в многомерном пространстве признаков, осуществляется вывод результатов контроля. В частности, производится оценка типа дефекта и класса опасности обнаруженных дефектов – источников АЭ. Эффективность технологии показана на примере реальных производственных дефектов трубопроводов.

**ПОСТРОЕНИЕ РАБОЧЕГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦ  
УЛЬТРАЗВУКОВОГО СМЕЩЕНИЯ, КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ  
СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА  
ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НА БАЗЕ  
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИБРОМЕТРА**

**Рыбкин К.М., Сафонов Ю.Н., Смирнов А.Ю.**

*Федеральное бюджетное учреждение «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в г. Санкт-Петербурге, Ленинградской и Новгородской областях, Республике Карелия» (ФБУ «Тест-С.-Петербург»), safonov@rustest.spb.ru*

Нормируемыми метрологическими характеристиками преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ), подлежащими определению при их поверке и калибровке, являются: коэффициент и погрешность электроакустического преобразования, диапазон преобразования, а также резонансная частота и полоса рабочих частот для резонансных ПАЭ или неравномерность амплитудно-частотной характеристики преобразования в диапазоне рабочих частот для широкополосных ПАЭ [1].

В настоящее метрологическая прослеживаемость ПАЭ к государственному первичному эталону ГЭТ 194-2022 осуществляется согласно государственной поверочной схеме (ГПС) по ГОСТ Р 8.826-2013, где в качестве эталонов применяются бесконтактные установки, реализующие интерферометрические и емкостные методы измерений амплитуды ультразвукового смещения и колебательной скорости поверхности [2].

Вместе с тем, 15 декабря 2022 года Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии была утверждена новая ГПС, предусматривающая также прослеживаемость коэффициента электроакустического преобразования ПАЭ к ГЭТ 194-2022, а в качестве эталонов 1 разряда в составе установок допущено применение высокочастотных лазерных доплеровских виброметров (ЛДВ) [3], исследование возможности использования которых и является целью настоящей работы.

Для решения указанной задачи проведено исследование метрологических характеристик лазерного вибromетра фирмы VLESS (КНР), приобретенного ФБУ «Тест-С.-Петербург» (в том числе для целей метрологического обеспечения акустоэмиссионных измерений), создана локальная поверочная схема и методика его калибровки [4].

В силу малых значений амплитуды ультразвукового смещения и колебательной скорости для выделения сигналов ЛДВ на фоне широкополосного шума необходимо использование анализаторов спектра,

а на рабочей поверхности преобразователя-формирователя акустического поля (ПФАП) целесообразно использовать специальную возвратно-отражающую пленку.

Для создания акустического поля, наряду с использованием гармонического сигнала трекинг-генератора анализатора спектра, применено возбуждение ПФАП широкополосным сигналом генератора гауссовского шума с регулируемой полосой частот. Данный метод возбуждения создает близкое к равномерному акустическое поле на рабочей поверхности ПФАП благодаря случайному сложению сигналов с разными частотами и фазами в каждый момент времени [1, 5]. Метод широкополосного возбуждения ПФАП представляется более достоверным, чем гармоническое возбуждение, поскольку при калибровке ПАЭ происходит усреднение сигнала на его приемной поверхности.

В результате калибровки с использованием ЛДВ получаются две передаточные функции ПФАП, рассчитываемые как отношение среднеквадратических значений колебательной скорости и смещения к напряжению возбуждения в частотной области.

Амплитудно-частотную характеристику преобразования калибруемого ПАЭ в диапазоне рабочих частот совместно с коэффициентом электроакустического преобразования на базовой частоте получают путем определения отношения спектра выходного сигнала ПАЭ к спектру скорости (смещения) на рабочей поверхности ПФАП.

Прослеживаемость к государственному первичному эталону достигается сличением результатов калибровок ПФАП с использованием ГЭТ 194-2022 и создаваемого рабочего эталона. Стабильность метрологических характеристик создаваемого рабочего эталона подтверждается периодической верификацией эталонного ПАЭ, входящего в его состав.

#### **Список литературы:**

1. МИ 1786-87 Методические указания. Государственная система обеспечения единства измерений. Основные параметры приемных преобразователей акустической эмиссии. Методика выполнения измерений
2. ГОСТ Р 8.826-2013 ГСОЕИ. Государственная поверочная схема для средств измерений амплитуды ультразвукового смещения и колебательной скорости поверхности твердых сред
3. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15.12.2022 г. № 3188. Государственная поверочная схема для средств измерений амплитуды ультразвукового смещения, колебательной скорости поверхности твердых сред и коэффициента электроакустического преобразования

5. ГОСТ ISO 16063-41-2014. Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 41. Калибровка лазерных виброметров
6. Торбен Р. Лихт, Хенрик Андерсен «Тенденции в градуировке акселерометров» Перевод статьи, опубликованной в журнале «Технический обзор» фирмы Брюль и Къер, № 2, 1987 г., стр. 23 - 42

## ПРОБЛЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ КОНТРОЛЕ ОБОРУДОВАНИЯ С ЕДКИМ НАТРОМ

Растегаев И. А.<sup>1</sup>, Хрусталева А. К.<sup>2</sup>, Растегаева И. И.<sup>1</sup>, Зорин П. Н.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ТГУ, г. Тольятти, Россия, [RastIgAev@yandex.ru](mailto:RastIgAev@yandex.ru)

<sup>2</sup> ООО «ЛАЭС», г. Тольятти, Россия

<sup>3</sup> ООО «Диагност», г. Тольятти, Россия

При выполнении акустико-эмиссионного (АЭ) контроля двухкилометрового межцехового трубопровода транспортировки едкого натра (NaOH) при его гидравлическом нагружении было локализовано 15 мест истечения рабочей среды. Других дефектов обнаружено не было. Таким образом, имелась достаточно представительная выборка АЭ сигналов из мест утечек NaOH. В процессе анализа данной выборки при сопоставлении с остальным массивом АЭ данных было установлено, что:

- в местах течи раствора NaOH через сквозные дефекты сигналы АЭ непрерывного типа, которые сопровождают истечение таких сред, как вода и воздух, не зарегистрированы. Зарегистрированные сигналы АЭ имеют импульсный характер, которые по форме невозможно отделить от сигналов сопровождающих развитие трещин и коррозионных повреждений [1-3];

- при расстоянии между преобразователями АЭ в линейных антенных группах менее 20 м многопараметрический образ источника АЭ из мест течи составил:  $A < 55$  дБ;  $70 < D < 3300$  мкс;  $3 < R_A < 2000$  мкс;  $800 < E_p < 3 \cdot 10^5$  мкВ·мкс;  $4 < C_D < 90$  шт.;  $2 < C_R < 70$  шт.;  $6 < F_0 < 90$  кГц;  $3 < F_R < 240$  кГц, где:  $A$ ,  $D$  и  $F_0$  – соответственно амплитуда, длительность и основная частота сигнала;  $R_A$  – время нарастания сигнала до максимума;  $C_D$  – число выбросов;  $E_p$  – энергетический параметр (площадь под кривой формы сигнала);  $C_R$  и  $F_R$  – соответственно число выбросов и основная частота сигнала до пика. Из литературных источников известно, что полученные значения входят в диапазоны изменения обозначенных параметров АЭ сигналов таких процессов, как трещинообразование и коррозионное повреждение металла [1, 2];

- изменение суммарного счета АЭ ( $N$ ) по всем каналам на этапах «выдержки» описывается экспоненциальным законом с положительной степенью меньше единицы, что по критерию Данегана-Иванова-Быкова относится к источнику АЭ пассивного (I) типа. При наборе давления наблюдаются незначительные резкие «всплески» на графике  $N$ , но параметрически их невозможно отделить от технологических шумов, поэтому выделить сигналы из мест течи NaOH позволяет только локационная карта [4];

- средняя погрешность АЭ определения координат мест течи щелочи по локационной карте от визуально подтвержденных мест составила  $\pm 3,6$

м, что обусловлено большой шириной пиков на локационной карте, которая доходила до 8 метров. Такая достаточно высокая погрешность наблюдается и при линейной локации других дефектов [3, 5, 6].

Дополнительный анализ экспериментальных и литературных данных [4] показал, что наиболее вероятным источником АЭ является кристаллизация и растрескивание NaOH после его истечения из трубопровода в капельном режиме. В результате кристаллизации место течи «залечивается» с образованием «пробки». АЭ при кристаллизации возникает поскольку процесс происходит быстро и с уменьшением объема. При уменьшении объема вещества, а также при нагружении трубопровода происходит частичное разрушение затвердевшего раствора («пробки») и возникает АЭ растрескивания. При испытании процесс образования и разрушения «пробки» может повторяться несколько раз, что повышает вероятность обнаружения источника АЭ данного типа [4]. Однако отличить по характеру АЭ течи от АЭ трещинообразования и коррозии, на данном этапе развития темы, не представляется возможным, как и утверждать, что в местах течи отсутствует АЭ источник в виде коррозионного растрескивания под напряжением (КРН). Таким образом, проблема идентификации АЭ от трещин, коррозии, КРН при наличии мест истечения NaOH сегодня остаётся не решенной и актуальной.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Госзадания FEMR-2024-0002.

#### **Список литературы:**

1. Rastegaev I.A., Rastegaeva I.I., Merson D.L. et al // Chemical and Petroleum Engineering. 2020. V. 56 (7-8). P. 554–562.
2. Харебов В.Г., Жуков А.В., Кузьмин А.Н., Шитов Д.В. // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 4. С. 14–32.
3. Кузьмин А.Н., Жуков А.В., Аксельрод Е.Г. и др. // Химагрегаты. 2017. № 4 (40). С. 32–37.
4. Rastegaev I.A., Khrustalev A.K., Rastegaeva I.I., Zorin P.N. // Chemical and Petroleum Engineering, 2023, V. 59, No. 3-4, P. 225-231.
5. Anastasopoulos A., Kourousis D., Bollas K. // Journal of Acoustic Emission. 2009. 27. P. 27–39.
6. Бигус Г.А., Счастливцев А.Б., Сабреков М.А. // Технология машиностроения. 2016. № 7. С. 46-49.

**ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ,  
КАК СРЕДЫ СТРУКТУРОЙ, ПО ИЗМЕРЕНИЯМ  
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И РЕЛЬЕФА ИЗЛОМОВ**

**Алексеев В.И., Сергеев М.И., Соколовская Э.А., Кудря А.В.**

*НИТУ МИСИС, г. Москва, РФ, AVKudrya@misis.ru*

Оценка сопротивления разрушению материалов важна на стадии конструирования, при аттестации их качества и при оценке остаточного ресурса. Материал - это среда со структурой, степень неоднородности морфологии которой достаточно велика (даже в рамках штатной технологии их получения), отсюда известные сложности при оценке сопротивления разрушения [1,2]. Неоднородность строения структур определяет разброс прочности, пластичности и вязкости материалов не только от изделия к изделию, но и в пределах одного изделия (образца), что вытекает из наблюдаемых обычно в масштабе образца различий в механизмах разрушения. Решение задачи, связанной с получением объективной оценки сопротивления таких материалов в конструкции в принципе достижимо, но для этого требуется необходимое понимание закономерностей разрушения среды с неоднородной структурой. Это возможно при условии применения метрологически обеспеченных процедур измерения неоднородности морфологии разнородных структур и разрушения, в рамках цифровизации таких измерений. Акустическая эмиссия (АЭ) дает возможность наблюдения кинетики разрушения в реальном времени – *in situ*, методы фрактографии рассматривают «след» трещины в материале, обусловленный структурой. Взаимодополняемость методов при анализе разрушения очевидна, однако их совместное применение далеко не всегда наблюдается на практике. Между тем совместный анализ процесса разрушения на основе измерения АЭ и изломов с привязкой к структуре может позволить выявить структурные и металлургические факторы, контролирующие различия в процессах разрушения конструкционных сталей при номинально однотипных структурах, повысить объективность прогноза преждевременного разрушения, остаточного ресурса.

Диапазон масштабов структур, встречающихся в конструкционных материалах чрезвычайно широк [1]. Их происхождение – результат эволюции структур и дефектов в ходе часто достаточно длинного в производстве материалов технологического процесса. Первые различия по составу появляются в соответствии с диаграммой фазового равновесия между затвердевающим металлом и расплавом. Кристалл растет из расплава как дендрит. Нижняя граница дендритного рисунка обычно имеет масштаб 0,1...1 мм, верхняя - может быть размером до 1...10 см, шаг осей дендритов первого порядка  $\Lambda_1 = 0,1...3$  мм, второго  $\Lambda_2 = 3...100$  мкм и даже

больше. Дендритная неоднородность нередко наследуется прокатом - в виде полосчатой структуры, вытянутой вдоль оси прокатки с переменным содержанием легирующих элементов и примесей, отсюда при одной и той же скорости охлаждения в осях и межосьях наблюдаются разные структуры.

В сталях, технологически неизбежная составляющая структура – неметаллические включения (НВ). Их объемная доля играет важную роль в разрушении. Диапазон размеров равноосных включений – от 0,01 мкм до 1...10 мм, где каждая размерная группа по-своему влияет на свойства. При этом, не всегда главная объемная доля включений, важны также их распределение по размерам: крупным с площадью сечения  $> 100 \text{ мкм}^2$  и геометрия: равноосные либо вытянутые НВ с соотношением продольного и поперечного размеров  $a/b > 2$ . Существенную роль обычно играют межчастичные расстояния НВ и их взаимное расположение. Внутри зерен с ОЦК решеткой (феррит в сталях) нет значительных препятствий скольжению, поэтому основное препятствие представляют границы зерна и чем оно мельче, тем выше предел текучести (закон Петча-Холла). Стык двух решеток (граница зерен, где симметрия нарушена) – благоприятное место для образования зернограницных сегрегаций (моноатомных слоев) плохо растворимых в железе охрупчивающих примесей Sb, P, Sn, As – двумерных границ раздела (ГР), поперечником, соответствующим размеру зерна аустенита. Уровень прочности и пластичности стали определяет ее микроструктура, являющаяся результатом превращения высокотемпературной фазы (аустенита) при охлаждении. Обычно это пачка параллельных пластинок двух фаз, масштаб такой структуры характеризует ее период  $\Lambda$ . Шаг  $\Lambda \sim 0,1...100 \text{ мкм}$  наблюдается в эвтектиках и  $\Lambda \sim 0,1...1 \text{ мкм}$  – в эвтектоидах. Для микроструктуры стали обычно характерна неоднородность (неравномерное распределение фазовых и структурных составляющих). Например, для бейнитной структуры это может быть высокое содержание остаточного аустенита ( $v = 0,15-0,25$ ), или образование грубых (до 0,1-1 мм в поперечнике) скоплений пластин цементита в верхнем бейните (в межосьях литой структуры стали 38ХНЗМФА-Ш) [1,2].

По-видимому, в первую очередь интересны не столько измерения разрушения с применением АЭ и фрактографии сами по себе, а их результаты, полученные с привязкой к определению одного из общепринятых параметров вязкости, например, хладноломкости. Вследствие развитого многообразия структур стандартные серийные ударные испытания характеризуются большим разбросом значений ударной вязкости, и не обязательно только в интервале температур вязко-хрупкого перехода (ТВХП). В частности, в крупных поковках из улучшаемой стали 38ХНЗМФА-Ш в интервале температур испытания от +20 до -196 °С можно наблюдать лишь монотонное снижение ударной

вязкости [2], что является следствием несопоставимости масштаба структурной неоднородности и габаритов стандартных образцов.

С этой целью был предложен метод определения ТВХП на малом объеме экспериментального материала  $\sim 2,0 \text{ мм}^2$  по измерениям АЭ при нагружении (на твердомере Роквелла индентором призматической формы), когда скачкообразное увеличение эмиссии при сходных размерах трещины будет означать переход от вязкого разрушения к хрупкому. Однократная установка пьезопреобразователя АЭ (на неразрезном пакете микрообразцов) позволяет сравнивать абсолютные амплитуды сигналов при неизменных переходных потерях. Для каждого микрообразца температура испытания задавалась отдельно, вследствие этого на одном неразрезном пакете (микрообразцов) размером  $10 \times 10 \times 25 \text{ мм}$ , помещенном в криокамеру (установленную на предметном столике твердомера Роквелла) было возможно до 60 независимых испытаний при температурах от  $+20$  до  $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ , что достаточно для построения серийной кривой. В результате достигается не только лучшее использование материала, но и привязка каждого испытания к месту в поковке, прокате (например, к полосам ликвации, элементам дендритной структуры и т.п.) и механизму разрушения, идентифицируемого фрактографически.

Для аттестации метода строили "классические" серийные кривые ударной вязкости (по Н.Н. Давиденкову) на стандартных образцах (тип I, ГОСТ 9454) из улучшаемой стали 38ХНЗМФА с вариацией механизма вязко-хрупкого перехода от вязкого разрушения к хрупкому транскристаллитному или зернограничному и их смешанному варианту. Верхняя граница интервала хладноломкости по определениям обоими методами совпала: коэффициент корреляции  $-0,97^{+0,02}_{-0,18}$ . Их применение, в частности, позволило разделить температуры вязко-хрупкого перехода дендритов и объемов металла между ними ( $-100$  и  $-130 \text{ }^\circ\text{C}$  соответственно), оценить вклад в неоднородность хладноломкости феррито-перлитной полосчатости в микроструктуре стали 10ХСНД.

Возможности акустической эмиссии и фрактографического анализа оказались также полезными при совершенствовании методов определения критериев нелинейной механики разрушения: энергетического – интеграла Черепанова-Райса ( $J$ -интеграла) и деформационного – критического раскрытия трещины  $\delta_c$ . Существующий подход к их определению (ГОСТ 25.506) предусматривает их определение в момент достижения максимальной нагрузки (на диаграмме «нагрузка  $P$  – смещение берегов трещины  $V$ »). Однако её достижение и последующее снижение скорее отражает потерю несущей способности образца с трещиной, а не переход её развития в закритическое состояние. При оценке кинетики развития вязкой трещины рассматривали вязкое разрушение, как процесс последовательного образования в вершине трещины ямок в диапазоне диаметром  $d=0,3 \dots 3 \text{ мкм}$ . При этом сначала разрушаются НВ размером от

$d/2$  до  $d/10$ , а после пластической деформации возникшей полости происходит срез перемычки между двумя или тремя смежными ямками. Скачку макротрещины также предшествует поток более слабых сигналов, обусловленных процессами разрушения в микроструктуре [3]. С учетом этих обстоятельств была предложена методика выделения критических стадий в скачкообразном развитии вязкой макротрещины (с привязкой к диаграмме «P-V»). Одновременно в изломе были выделены последовательные положения переднего фронта растущей вязкой трещины – по представлению профиля излома в направлении роста трещины в виде ломаной лестницы [2,4]. Сопоставление результатов измерения вязкого разрушения методами АЭ и фрактографии позволило выделить критические стадии в развитии трещины и получить уточненные значения трещиностойкости с привязкой к скачкам трещины.

В целом, результаты работы показывают, что из цифровых измерений АЭ при разрушении и морфологии изломов средствами разномасштабной фрактографии, с привязкой к структуре, реальны объективные оценки сопротивления разрушению неоднородной структуры и возможность конструирования оптимальных структур под заданные свойства, получение объективного прогноза риска преждевременного разрушения.

#### **Список литературы:**

1. Сталь на рубеже столетий / Под общ. ред. Ю.С. Карабасова. М.: МИСиС, 2001. 664 с.
2. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A., Prediction of the Destruction of Materials with Inhomogeneous Structures, Physics of Metals and Metallography, 2022, 123 (12), pp. 1253 – 1264.
3. 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.
4. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Нго Х.Н., Кузько Е.И., Котишевский Г.В. Прогноз разрушения крупных поковок с неоднородной структурой // Электрометаллургия. 2019. № 6, С. 33-39]

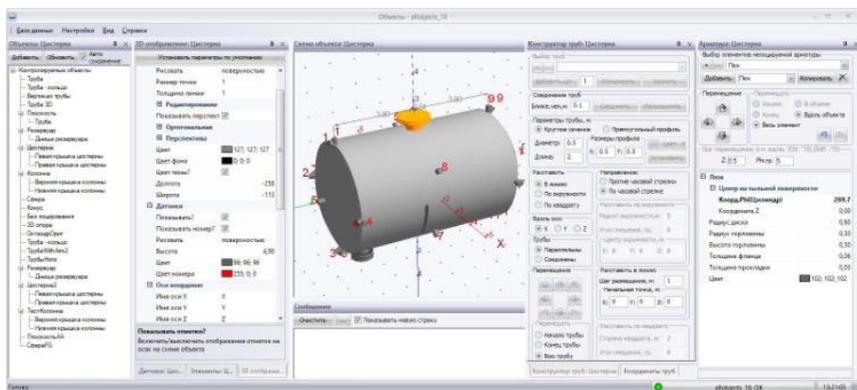
## ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АЭ СИСТЕМЫ "РАНИС"

Глушко А.Н.

ООО «НДТ-Системы» г. Москва, Россия, [info@e-mission.ru](mailto:info@e-mission.ru)

ПО «РАНИС» представляет собой пакет из 5 программ. Пакет включает в себя 3 основные программы - редактор объектов, регистратор данных, постобработка данных и 2 служебных – редактор баз данных и тест загрузки аппаратуры. ПО «РАНИС» использует систему баз данных «MySQL» для хранения как настроек программ, так и результатов измерений. Использование БД «MySQL» позволяет создавать разнообразные варианты удаленного запуска программ.

Программа редактора объектов позволяет создавать и редактировать 3D-представление объектов для контроля. К стандартным типам создаваемых объектов относятся: 1) Набор из неограниченного числа труб с произвольным расположением в пространстве 2) Плоский прямоугольный объект 3) Открытый резервуар 4) Цистерна 5) Колонна 6) Сфера 7) Конус 8) Параллелепипед для 3D-лоцирования. Пользователь имеет возможность создавать собственные типы составных объектов, которые могут включать в любой Z-последовательности геометрические примитивы, используемые в стандартных типах объектов. К изображению объектов пользователь может добавлять элементы нелоцируемой арматуры, такие как линейные и кольцевые швы, текстовые подписи с полкой-выноской и без нее, основания различной формы, фланцы и люки. К любому типу объектов могут быть добавлены лоцируемые трубы.



Пример интерфейса программы редактора объектов

Программа регистрации данных позволяет выполнять настройку АЭ-каналов аппаратуры, аппаратных частотных фильтров, генерацию звуковых пакетов на каждом из имеющихся АЭ-каналов, контроль состояния аппаратуры. Программа поддерживает регистрацию АЭ-данных в режимах «только импульсы», «импульсы+волноформы», «осциллографирование», проводит сбор параметрических данных, автоматическую калибровку датчиков. Программа регистрирует данные используя шаблоны циклов нагружения, выполняет расчет локационных данных и критериальных оценок, поддерживает работу процессора обработки данных, потоковую оценку изделий по заданным критериям. Пользователю предлагается текстовое, 2D и 3D представление данных на графиках и таблицах. Создание графиков и таблиц производится в один клик по предварительно созданным шаблонам. Для построения графиков может использоваться встроенный парсер математических выражений. Около 40 типов стандартных математических функций и операторов. Имеется более 30 типов специальных переменных, в качестве которых выступают все параметры импульсов и локаций, параметрические данные, индексы циклов нагрузки, геометрические размеры объектов.

Программа постобработки предназначена для проведения полного анализа состояния контролируемого объекта на основе данных, зарегистрированных программой регистрации данных. Программа имеет весь функционал программы регистрации, связанный с обработкой данных. В качестве дополнительных особенностей можно указать контроль регистрации данных, выполняемой на удаленном компьютере, кластеризацию локационных данных, анализ кластеризованных данных по функциям, задаваемым пользователем.

Программа редактора баз данных предназначена для визуализации структуры баз данных MySQL формата «РАНИС», для проверки состояния БД, осуществления обслуживания БД, редактирования параметров настройки программ и аппаратуры. Программа выполняет создание, редактирование, копирование, удаление баз данных MySQL, визуализацию структуры активной базы данных, визуализацию содержимого таблиц БД, заполнение таблиц БД из файлов, копирование таблиц БД в файлы, создание, редактирование, удаление таблиц БД формата «РАНИС».

Программы пакета взаимодействуют между собой при необходимости обновления данных.

## АКТУАЛЬНЫЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Растегаев И. А.<sup>1</sup>, Растегаева И. И.<sup>1</sup>, Мерсон Д. Л.<sup>1</sup>, Иванов В. И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ТГУ, г. Тольятти, Россия, [RastIgAev@yandex.ru](mailto:RastIgAev@yandex.ru)

<sup>2</sup>АО «НИИИИИ МНПО «Спектр», г. Москва, Россия

В работе проведен анализ, систематизация и обобщение известных разработок и достижений в методе акустической эмиссии (АЭ), полученных за последние 40 лет в области применения метода для оценки технического состояния промышленного оборудования по данным из литературных источников, опубликованных в изданиях, входящих в основные базы данных российских и зарубежных систем цитирования. Обобщение описанных авторами работ различных схем применения метода АЭ с учетом достигнутого результата позволило выявить одиннадцать основных направлений возможных реализаций метода АЭ в промышленности сегодня или в ближайшей перспективе:

- I) *АЭ диагностирование* – определение вида технического состояния оборудования при тестовых видах воздействия;
- II) *АЭ мониторинг* – определение вида технического состояния оборудования, при котором объект подвергается только рабочим воздействиям;
- III) *АЭ теческание* – дистанционная оценка герметичности оборудования или определение координат места истечения рабочей (испытательной) среды из сквозных дефектов или повреждений;
- IV) *АЭ контроль безопасности испытания* – сопровождение испытания оборудования на предельную нагрузку для заблаговременного предупреждения об опасности разрушения или повреждения;
- V) *АЭ планирование программы технического диагностирования (ТД)* – экспресс-оценка поврежденности оборудования для организации: порядка вывода оборудования из эксплуатации, сокращения объема применения сканирующих методов неразрушающего контроля (НК), замены полных ТД на частичные или корректировки схем (мест) применения сканирующих методов НК;
- VI) *АЭ прогнозика* – определение технического состояния оборудования с заданной вероятностью на предстоящий интервал времени эксплуатации;

- VII) АЭ толщинометрия* – интегральная оценка коррозионной поврежденности стенки оборудования, где проведение ультразвуковой толщинометрии либо трудоёмко, либо недоступно;
- VIII) АЭ томография* – визуализация внутреннего пространства элементов или объемов оборудования для обнаружения структурных или конструктивных несоответствий без проведения сканирования;
- IX) АЭ структуроскопия* – выявление особенностей в структуре материала, которые могут повлиять на физико-механические характеристики изделий из него в процессе их эксплуатации;
- X) АЭ средство обратной связи* – обеспечение выявления отклонений в правильности режима работы оборудования или выполнения технологических процессов в нём непосредственно во время эксплуатации;
- XI) АЭ моделирование* – разработка и верификация физико-математических моделей излучения сигналов источниками АЭ различного типа, а также теоретический анализ трансформации, затухания и искажения акустических сигналов при их распространении по объекту контроля без или с учетом его напряженно-деформированного состояния.

Полученный на сегодня перечень применения метода АЭ нельзя считать исчерпывающими и окончательными, но он является первым шагом на пути разработки универсальной классификации и схем применения метода АЭ при контроле и диагностике технического состояния промышленного оборудования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Госзадания FEMR-2023-0003

## **СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

**Никифорова М.С., Костюков Е.Н.**

*Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия  
postmaster@ifv.vniief.ru*

Энергетические материалы (ЭМ) широко применяются во многих областях науки и техники. В зависимости от конкретных условий применения ЭМ к ним предъявляются определенные требования. С учетом этих требований проводится комплекс исследований различных свойств ЭМ, в том числе и его прочности.

Контроль прочности ЭМ, как правило, проводится при механических испытаниях деталей. При этом все детали, подвергающиеся механическому нагружению, доводятся до разрушения и в дальнейшем не могут быть использованы. Очевидно, что разработка неразрушающих способов контроля, которые позволят:

- увеличить число исследуемых характеристик без увеличения количества деталей;
- контролировать изменения исследуемых параметров на одних и тех же деталях в течение сколь угодно длительного времени, при различных температурах и механических нагрузках, до и после внешнего воздействия, является решением актуальной задачи.

Цель данной работы - разработать неразрушающий способ определения прочности ЭМ.

Среди существующих неразрушающих методов определения физико-механических характеристик ЭМ особого внимания заслуживает метод акустической эмиссии (АЭ). Возможности использования метода АЭ применительно к изучению процессов разрушения образцов из ЭМ приведены в работах [1], [2].

Основная задача при разработке способа контроля прочности ЭМ на основе данных АЭ заключалась в установлении связей между характерными изменениями параметров АЭ и соответствующими им механическими параметрами: нагрузкой и деформацией.

Для решения вышеуказанной задачи были проведены испытания деталей из пластифицированного октогена в условиях сжатия и растяжения с использованием метода АЭ и получены такие параметры АЭ как: сумма импульсов, активность, длительность, амплитуда и энергия.

Среди полученных параметров, в качестве информативного, с точки зрения возможности использования его для остановки эксперимента

на этапе предварительного нагружения, была выбрана активность АЭ, по причине ярко выраженного максимума на диаграмме.

На рисунке 1, в качестве примера, представлены диаграммы активности АЭ, полученные при испытании деталей на растяжение (а) и сжатие (б).

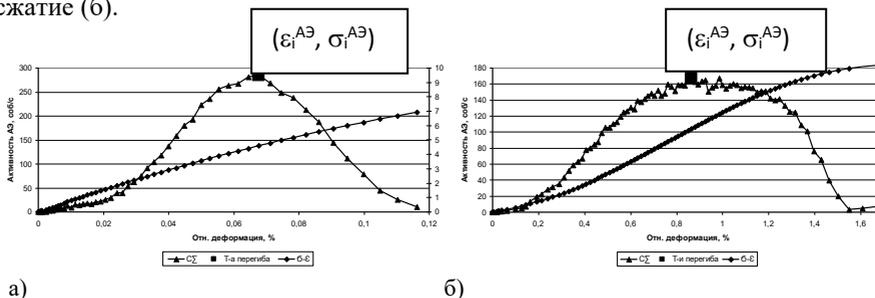


Рис. 1. Диаграммы деформирования,  $\sigma$ - $\epsilon$ , и активности АЭ,  $C_{\Sigma}$ , полученные при растяжении (а) и при сжатии (б) деталей из пластифицированного октогена.

Выявлена прямая зависимость предела прочности,  $\sigma_B$ , и деформации разрушения  $\epsilon_B$ , с напряжением,  $\sigma_i$ , и деформацией,  $\epsilon_i$ , соответствующими точке максимума активности АЭ:

$$\sigma_B = A \cdot \sigma_i^{АЭ}$$

$$\epsilon_B = B \cdot \epsilon_i^{АЭ},$$

где А и В – постоянные, определённые из экспериментов.

На основе этих зависимостей предложен и апробирован неразрушающий способ определения прочности ЭМ.

### Список литературы:

1. Е.Н. Костюков, Ю.А. Власов, Л.В. Фомичева. Исследование процесса разрушения изделий из взрывчатых веществ с помощью акустической эмиссии // Механика композитных материалов. 1996. Т.32. №6. 818-823
2. Е.Н. Костюков, С.А. Вахмистров, С.Г. Игошина и др. Акустическая эмиссия при механических испытаниях образцов из пластифицированного октогена // Физическая мезомеханика. 2013. Т.16. №5. 111-114
3. Е.Н. Костюков, М.С. Никифорова, И.И. Никифоров и др. Прогнозирование прочностных характеристик деталей из энергетических материалов с использованием метода акустической эмиссии // Механика композиционных материалов и конструкций. 2019. Т.25. 32. 219-227

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ РАЗНОРОДНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Барат В.А.<sup>1,2\*</sup>, Марченков А.Ю.<sup>1</sup>, Бардаков В.В.<sup>1,2</sup>,  
Свиридов Г.Б.<sup>1</sup>, Ушанов С.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», РФ, Москва

<sup>2</sup> ООО «Интерюнис-ИТ», РФ, Москва  
baratva@mpei.ru

В данной работе рассматриваются разнородные сварные соединения сталей перлитного и аустенитного классов, часто используемые в элементах энергетического оборудования ТЭС и АЭС. В процессе сварки и последующей эксплуатации в области сварного шва происходит интенсивная диффузия углерода из перлитной стали в металл шва, таким образом, на линии сплавления образуются прослойки: обезуглероженная – со стороны перлитной стали, и карбидная – в металле шва [1]. Наличие этих прослоек приводит к снижению механических и эксплуатационных характеристик сварного соединения [2], а потому необходимо обеспечить своевременное выявление их методами неразрушающего контроля.

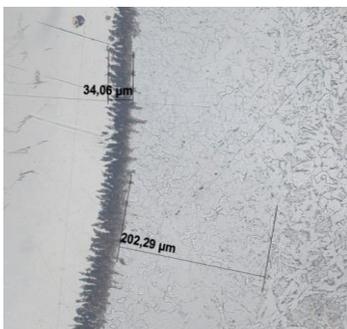


Рис. 1 Поперечное сечение разнородного сварного соединения стали 20 и стали 12Х18Н10Т, полученного ЭЛС после дополнительной термической обработки

Объектом данного исследований являются стыковые сварные соединения сталей 20 и 12Х18Н10Т. Для изготовления разнородных сварных соединений были использованы листы горячекатаного проката сталей 20 и 12Х18Н10Т толщиной 3 мм, которые сваривались ЭЛС и АрДС. Прослойки были получены за счет дополнительной термической обработки при температуре 600°С с различным временем выдержки – от 1 до 25 часов. Образцы испытывали на статическое растяжение до разрыва с синхронной регистрацией в процессе испытания сигналов АЭ. Испытания проводили

на машине Instron. Регистрация данных АЭ производилась с помощью системы A-Line 32D резонансными преобразователями АЭ GT200.

В результате исследований установлено, что диффузионные прослойки при статическом и циклическом нагружении являются источниками АЭ и излучают акустические сигналы специфической повторяющейся формы. Наличие диффузионных прослоек при статическом нагружении можно обнаружить по дополнительному всплеску АЭ, соответствующему интенсивной пластической деформации ферритной фазы.

Статья опубликована по результатам работ, выполненных за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00657, <https://rscf.ru/project/23-29-00657/>.

#### **Список литературы:**

1. Khodakov V.D. Structure and mechanism of formation of dissimilar welded joints in nuclear power plant made of austenitic and pearlitic steels / V.D. Khodakov, D.V. Khodakov // *Welding International*. 2016. – Vol. 30. No. 12. – P. 935-940.
2. Goncharov A.L. Study of structural non-homogeneity impact on mechanical properties of dissimilar weld joints of carbon steel 20 and corrosion-resistant austenitic 12Kh18N10T steel / A.L. Goncharov, A.Yu. Marchenkov, E.V. Terentyev, I.E. Zhmurko, A.P. Sliva // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. – Vol. 681. – No. 012016.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИКОВЫХ ОБРАЗЦОВ ПО ПАРАМЕТРАМ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

**Абрамова Т.С.**

*ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет путей сообщения,  
г. Новосибирск, Россия, t.abramova\_sgups@mail.ru*

### **Введение.**

Применение аддитивных технологий для ответственных изделий, к которым предъявляются повышенные требования надежности, невозможно без обеспечения достаточно высокого уровня качества 3D-печати [1]. В процессе изготовления возникают специфичные для данной технологии типы дефектов, такие как несплавления и слабая адгезия между слоями [2]. Эти дефекты снижают прочность и долговечность и их необходимо обнаружить до начала эксплуатации. Традиционные методы неразрушающего контроля имеют ограниченную применимость при контроле пластиковых деталей. Актуальной является проблема создания методики перспективного для обнаружения развивающихся дефектов контроля методом акустической эмиссии.

Цель работы – установить закономерности параметров акустической эмиссии при механических испытаниях пластиковых образцов, изготовленных из *PETG* и *PLA*-пластика, для создания методики контроля.

### **Материалы и оборудование.**

На 3D принтере методом послойного наплавления изготовлено по пять плоских образцов для каждого типа пластика с длиной рабочей части 100 мм и площадью поперечного сечения 16 мм<sup>2</sup>. В середине каждого образца сделан концентратор – отверстие диаметром 1 мм. Растяжение образцов до разрушения проводилось на установке МИ-40КУ с постоянной скоростью перемещения захватов 5 мм/мин и записью диаграммы растяжения. Регистрация АЭ сигналов выполнялась системой СЦАД 16.03 с датчиками типа GT200 с порогом фиксации на входе предварительного усилителя 5 мкВ. Боковая поверхность разрушенных образцов исследовалась на наличие повреждений и характер излома под микроскопом Альтами MET 1С.

### **Анализ результатов.**

В работе анализировали число импульсов, активность и амплитудное распределение сигналов АЭ, которые сравнивались с диаграммой растяжения и характером повреждения поверхности рабочей части образцов после разрушения.

При растяжении образцов регистрировались импульсные сигналы дискретной АЭ, суммарно для пяти образцов *PLA*-пластика

зарегистрировано 680 сигналов, для *PETG*-пластика почти в 2 раза меньше 296. С использованием линейной локации по разнице времен прихода отделяли сигналы из рабочей части от сигналов захватов. Из центральной рабочей части образцов *PLA* и *PETG* пластика зарегистрировано 330 и 47 сигналов, соответственно.

Перед разрушением активность сигналов резко увеличивается у *PLA*-пластика в 40 раз у *PETG* -пластика в 3 раза. Такой скачок активности позволит обнаружить пред разрушенное состояние при нагрузке составляющей (5-15) % от предела прочности образца.

### **Вывод.**

Метод акустической эмиссии при растяжении деталей из *PETG* и *PLA*-пластика позволяет обнаружить предельное состояние при нагрузке, которая на (5-15) % ниже разрушающей нагрузки. Дальнейшее развитие метода связано с созданием технологии его применением для ответственных объектов.

### **Список литературы:**

1. Лопатина, Ю. А. Применение 3D-печати методом FDM при ремонте машин и оборудования / Ю. А. Лопатина // Технический сервис машин. – 2019. – № 3(136). – С. 40-45. – EDN RXQGXXG.
2. Поляничко, К. С. Различные дефекты 3D-печати / К. С. Поляничко // Организация работы с молодежью. – 2021. – № 5. – EDN ROYNUR.

## **ПОДГОТОВКА И ОБУЧЕНИЕ СПЕЦИАЛИСТОВ АЭ**

**Батов Г. П., Андреев А. Г.**

*ООО «НУЦ «Качество», г. Москва, Россия, 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.

Сложность применения АЭ метода привела к падению интереса к методу со стороны Заказчиков, это по нашему мнению обусловлено отставание в подготовке АЭ специалистов АЭ 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.

Много проводятся исследований, разрабатываются методики АЭ контроля, программное обеспечение по обработке АЭ данных, применение этих новаций на практике вызывает определенные АЭ специалистов-практиков.

Решение проблемы получения непрерывного знаний специалистами АЭ, позволит повысить спрос на АЭ контроль и продолжит развитие АЭ метода.

Привлечение новых специалистов и знакомством с методом АЭ помогают ресурсы «Азбука НК» (ООО «НУЦ «Качество», где расположены информация о методе, видео, справочная информация. Отличный пример книга Комарова А.Г. "A-Line. Выполнение акустико-эмиссионного контроля. Практическое руководство.

Предлагается разрабатывать специализированные учебные курсы по АЭ технологиям и программному обеспечению, совместно с разработчиками АЭ систем, специалистами АЭ, разработчиками АЭ методик контроля 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 АЭ научатся использовать новые АЭ технологии и документ, подтверждающий эти

знания, специалисты и разработчики методик контроля, передадут знания и получат обратную связь о применении этой технологии, а ОСП обеспечит независимость оценки знаний специалистов с выдачей документа, Заказчик АЭ контроля получит объективные результаты. 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.

УДК 620.172/.178.2; 620.192.7

## **ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 316L, ИЗГОТОВЛЕННОЙ АДДИТИВНЫМ СПОСОБОМ, НА ПАРАМЕТРЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Болотников А.И., Тютин М.Р., Ботвина Л.Р.

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

Развитие материалов аддитивного производства требует ответа на вопрос о возможности их использования без последующей механической обработки, что делает необходимым изучение влияния состояния поверхности образцов на механические свойства, параметры акустической эмиссии и кинетику процесса разрушения.

Исследовано влияние состояния поверхности изготовленных методом селективного лазерного сплавления корсетных образцов из стали 316L размером  $100 \times 15 \times 3$  мм до и после шлифования. Испытания проводились в условиях статического растяжения на сервогидравлической установке BISS Nano. Обработку поверхности производили на шлифовальном диске с размером зерна P320. В процессе испытаний одновременно регистрировали характеристики деформированного состояния методом корреляции цифровых изображений (КЦИ) и сигналы акустической эмиссии (АЭ), а также отмечали стадийность изменения этих параметров. В результате эксперимента были оценены следующие параметры АЭ: активность сигналов АЭ  $\dot{N}_{АЭ}$ , суммарное их число  $\Sigma N_{АЭ}$ ,  $b_{АЭ}$ -параметр, угол нарастания RA, средняя частота сигналов AF, а также определены площади двух пластических зон при разрушении образцов: слабдеформированной зоны  $S_L$  (значения главных деформаций в которой на основании визуального распределения деформации внутри зоны приняты большими:  $\varepsilon_1 > 0.045$ ) и сильнодеформированной зоны  $S_H$  ( $\varepsilon_1 > 0.25$ ).

В результате эксперимента было установлено, что обработка поверхности путем шлифования приводит к увеличению зон  $S_L$  и  $S_H$  (Рис.1), угла нарастания RA, уменьшению  $\Sigma N_{АЭ}$ , AF и  $b_{АЭ}$ -параметра; стадийность изменения оцененных характеристик не отличается и соответствует отмеченной ранее в работе [1].

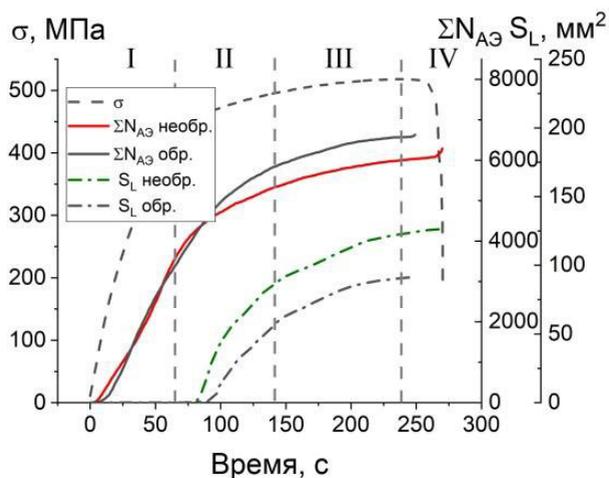


Рис.1 Временные зависимости суммарного числа событий акустической эмиссии  $\Sigma N_{AЭ}$  и площади слабдеформированной пластической зоны  $S_L$  при испытании образцов с обработанной и необработанной поверхностью

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-19-00784).

#### Список литературы:

1. Ботвина Л.Р. и др. Малые усталостные трещины в аддитивной стали 316L: влияние на механические свойства, параметры акустической эмиссии и кинетику разрушения // Деформация и разрушение материалов. 2024. № 2. С. 25–34.

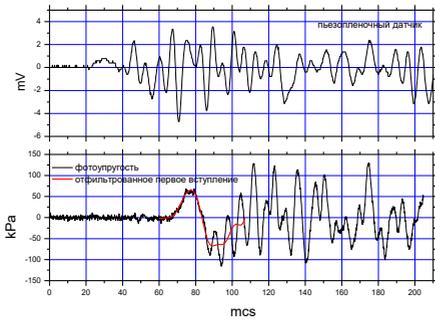
## МЕТОДИКА ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ АЭ НА ФОНЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПОМЕХ

Х. Ф. Махмудов<sup>1</sup>

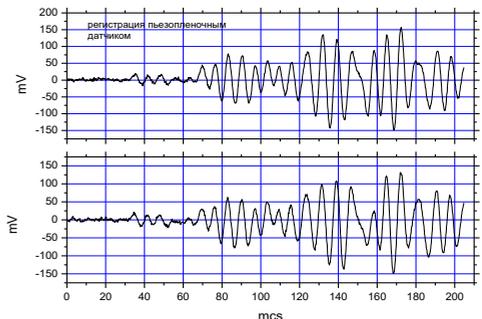
<sup>1</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Россия, Санкт-Петербург, h.machmoudov@mail.ioffe.ru*

Совершенствование и применение фундаментальных и натуральных исследований параметров упругих волн для аналитической оценки геомеханической устойчивости и безопасности эксплуатации различных крупномасштабных подземных сооружений, таких как хранилища опасных отходов, тоннели и резервуары сжиженного газа остаётся актуальными. Основным методом исследования является анализ импульсов акустической эмиссии (АЭ), которая широко применяется для изучения процесса предразрушения (зарождения и накопления микроскопических трещин) в гетерогенных материалах, таких как горные породы [1-4]. Исследование распространения акустического импульса (АИ) в горных породах и бетонах с заданными структурными и механическими характеристиками подробно рассмотрено в работе [5-8]. В примененной методике скорость распространения АИ определяется по первому вступлению сигнала на приемный широкополосный пьезодатчик, регистрирующий импульсы в широком диапазоне частот [9]. Измеренное значение скорости АИ для горной породы и бетонного слоя хорошо согласуется с расчетами, на основе известных формул теории упругости (во втором случае — с учетом геометрии слоя) [10].

Основа калибровки – это сопоставление зарегистрированных сигналов от пьезодатчика с эталонными сигналами, полученными методом фотоупругости для таких же условий возбуждения поля упругих колебаний в эталонном образце. Возбуждение производилось ударом шарика 2,3 мм о поверхность стеклянной призмы 40 x 40 x 200 мм. Метод фотоупругости позволяет регистрировать неискаженную форму сигнала и измерять амплитуду упругих волн в единицах механического напряжения (Па) [5]. В данном случае регистрация пьезопленочным датчиком производилась без предусиления (Рис.1).



а



б

Рис.1. Сопоставление сигналов с пьезопленочного датчика с эталонными сигналами (а), полученными при регистрации методом фотоупругости (б).

Калибровка низкочастотных «шахтных» датчиков (для установки в шпурах) без предусилителя (удар о поверхность призмы 190 x 240 x 240 мм 1,6 мм). Во втором случае удар шариком диаметром 2.3 мм о поверхность призмы 190 x 240 x 240 мм. Регистрация шахтных датчиков 1, 2, 3., (рис 2) производилась с предусилением.

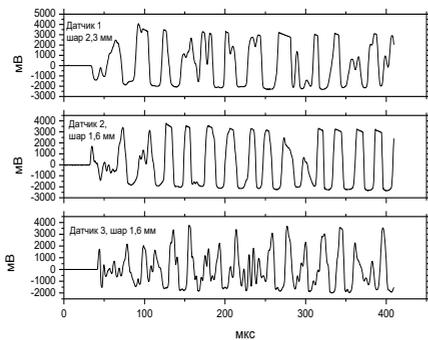


Рис.2

Рис.2. Сигналы с шахтных датчиков 1, 2, 3.

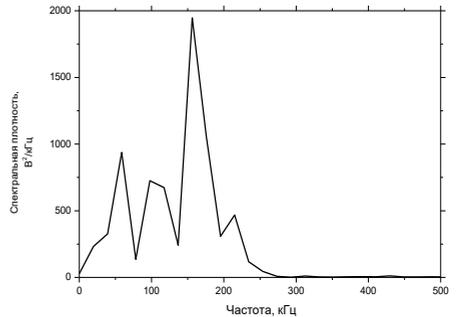


Рис. 3

Рис.3. Спектр собственных частот датчика 3, который использовался в полевых измерениях.

На рисунке 3 показан спектр собственных частот датчика 3, который использовался в полевых измерениях подземных сооружений ГХК. В работе [10] также изучено некоторые аспекты «Измерения акустических свойств бетонной обделки и горного массива в районе скважины», «Анализ скоростей распространения акустических волн в бетонной обделке», «Измерения акустических свойств горного массива в новой выработке без закрепления бетонной обделкой», «Анализ скоростей распространения акустических волн в массиве горных пород».

### **Выводы:**

Для измерения энергии источника АС в абсолютной шкале единиц (Дж) по регистрируемым АС в лабораторных условиях был проведен анализ энергетического баланса "источник АС" - "передающая среда" - "приемник АС" с применением аппарата спектрального анализа. В эксперименте измерялась доля механической энергии, затраченной на возбуждение упругой волны, и независимо измерялось напряжение в упругой волне, по которому рассчитывалась энергия волны. Также оптимизирована методика определения координат источника АС для сред с переменным полем скоростей и предложен способ ее адаптации к условиям подземных сооружений предприятия Госкорпорации «Росатом».

### **Список литературы:**

1. Davidsen, J., Stanchits, S., Dresen, G. . Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98, P. 125502.
2. Куксенко В. С., Махмудов Х. Ф., Манжиков Б. Ц. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 2010, №4, с. 29-40.
3. Лукичев С. В., Наговицын О. В., Семенова И. Э., Белгородцев О.В. // Горный журнал, 2015, № 8, с. 53-58.
4. Махмудов Х. Ф., Менжулин М. Г., Захарян М. В., Султонов У., Абдурахманов З. М. Журнал Технической Физики, 2015, Т.85, вып. 11, с. 79-85.
5. Петров В.А., Пикулин В.А., Розанов А.О., Савельев В.Н., Станчиц С.А. Способ определения энергии сигнала акустической эмиссии в твердом теле.-Патент Российской Федерации № 2037821, 1995.
6. Потанина М. Г., Смирнов В. Б., Пономарев А. В., Бернар П., Любушин А. А., Шозиёев Ш. П. // Физика Земли, 2015, №2. с. 126.
7. A. Carpinteri, G. Lacidogna., N.. Sound and Vibration. Stockholm, 7-10 July, 2003.
8. Куксенко В. С., Томилин Н. Г., Махмудов Х. Ф., Бенин А. В. // Письма в Журнал технической физики, 2007, Т. 33, №2, с. 31-35.
9. Носов В. В., Бураков И. Н. // Дефектоскопия, 2004, N 2 с. 53-61.
10. Савельев В. Н., Махмудов Х. Ф. Исследование акустических свойств массива гетерогенных пород и бетонной обделки в натуральных условиях. Журнал технической физики. 2020. Т. 90. № 1. С. 143-148.DOI: 10.21883/JTF.2020.01.48676.74-19

# КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПО ТИПАМ ДЕФЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**Ахмадеев Руслан, Григорьева Анастасия, Максименко Маргарита**

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, почта NastyA001@mail.ru*

При проведении АЭ-контроля специалисту предоставляются данные о зафиксированных сигналах с их различными характеристиками для дальнейшего анализа и интерпретации. Как правило, промежуточный анализ проводят с помощью коммерческих программных комплексов, таких как Vallen System, Aline и др. Но эти программные комплексы не решают задачи отнесения зафиксированной группы сигналов к наиболее вероятному типу дефекта. В настоящее время методы машинного обучения (МО) и анализа данных активно внедряются в процессы технической диагностики, [1-4], и в данной статье представлен способ классификация сигналов с помощью адаптированного метода МО на такие виды дефектов как: трение, расслоения, растяжения, трещины и разрывы.

В качестве исходных данных принимается массив, содержащий АЭ сигналы с их различными характеристиками. В ходе исследования выделены наиболее значимые из них – амплитуда, частота и энергия, проведена настройка модели машинного обучения, протестированна его работоспособность на данных крупного производственного объекта (бетонный кожух модели ядерного реактора). Преимуществом разработанного алгоритма является обучение без учителя, что делает его более гибким, менее зависимым от исходных данных и более надежным, как инструмент определения типов дефектов.

В процессе настройки программы на массиве данных из [1] были опробованы стандартные методы кластеризации из библиотеки Python sklearn с разными гиперпараметрами [5]. Для оценки их эффективности использовалась следующая метрика: процент совпадения полученных кластеров с отмеченными дефектами из тестовых данных. Наибольшую точность показал модифицированный алгоритм агломеративной кластеризации с методом межкластерного расстояния average и метрикой cosine: 87% для разрывов, 79% для расслоений, 73% для трения, 60% для трещин и 40% для растяжений.

После настройки разработанного алгоритма кластеризации и определения типов дефектов на основе имеющихся данных, он был применен к данным, полученным при АЭ-контроле промышленного объекта – бетонного кожуха реактора, нагружаемого термически в диапазоне от примерно 250 °С до 300 °С. Показания фиксировались как с поверхности объекта, так и в глубине с помощью волноводов. Проверка

метода проводилась на данных за 8 часов постепенно увеличивающейся нагрузки. Результаты численных экспериментов приведены на рис.1,2

Разработанный алгоритм и программа позволяют по данным АЭ контроля выполнить кластеризацию сигналов, зафиксированных ПАЭ и с помощью описанных методов машинного обучения определять наиболее вероятный тип дефекта. Алгоритм имеет высокую устойчивость, а именно при применении его на дефектах одного типа несколько раз около 90% сигналов попадет в один и тот же тип кластера. Время работы программы для массива данных около 3000 сигналов составляет менее 1 с.

Дальнейшее усовершенствование программы может быть связано с ее обучением на большом количестве данных различных объектов из различных материалов, внедрение в процессы локации дефектов, изучения применимости к объектам другого типа (в ближайших планах – тонкостенные резервуары высокого давления).

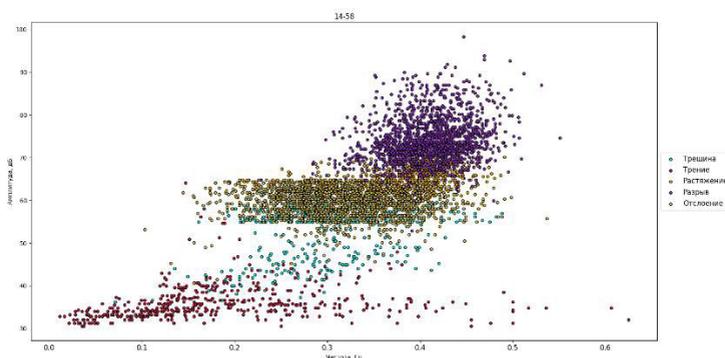


Рис. 1. Результаты численных экспериментов на данных из [1]

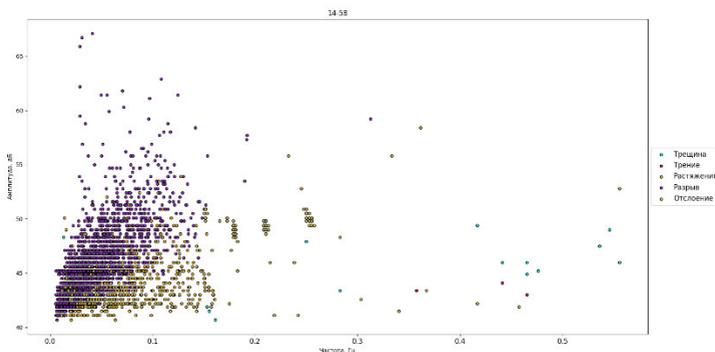


Рис. 2. Результаты численных экспериментов на реальном промышленном объекте

### **Список литературы:**

1. Identifying damage mechanisms of composites by acoustic emission and supervised machine learning (Renato S.M. Almeida, Marcelo D. Magalhães, Md Nurul Karim, Kamen Tushtev, Kurosch Rezwan)
2. Cluster analysis of acoustic emission signals and infrared thermography for defect evolution analysis of glass/epoxy composites (Yanan Zhang, Bo Zhou, Fangai Yu, Changzheng Chen)
3. The Use of Acoustic Emission Methods as Aids to the Structural Integrity Assessment of Nuclear Power Plants (P. Runow)
4. Analysis of acoustic emission data for structural health monitoring applications (Manindra Kaphle)
5. <https://scikit-learn.org/stable/modules/clustering.html#clustering>

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**Боровкова Е.С.**

*Полоцкий государственный университет имени Евфросинии  
Полоцкой, г. Новополоцк, Республика Беларусь, [e.borovkova@psu.by](mailto:e.borovkova@psu.by)*

На сегодняшний день обеспечение надежности и увеличения эксплуатационных свойств строительных конструкций является первоочередной задачей в строительной отрасли. При этом особое внимание представляют конструкции, изготовленные из бетона, являющегося лидирующим строительным материалом. Для осуществления технической диагностики и мониторинга бетонных и железобетонных изделий хорошо себя зарекомендовал интегральный метод обследования на основе явления акустической эмиссии (АЭ).

Бетон представляет собой материал, который претерпевает структурные изменения на протяжении всего его «срока службы». Поэтому метод АЭ применяют как при мониторинге бетонных смесей, так и при сопровождении бетонных конструкций на стадии эксплуатации. Метод акустической эмиссии является пассивным методом контроля и позволяет определять прочность бетона в любом месте конструкции, на любой глубине, в труднодоступных местах и при этом геометрия конструкции не оказывает влияния на измерения.

Мониторинг бетона еще на стадии твердения интересен и важен, так как эта стадия в значительной степени определяет конечные свойства бетонного изделия. Метод акустической эмиссии контроля бетонной смеси позволяет регистрировать внутреннюю структурную активность бетона в процессе его твердения, определять время схватывания бетона и расплубочную прочность, осуществлять прогноз прочности бетонов на нормативный срок. Это дает возможность оперативно определять физико-механические свойства бетонов, вносить коррективы при бетонировании конструкций и тем самым обеспечить надежность конструкций и безопасность зданий и сооружений [1]. Сигналы акустической эмиссии, распространяясь к поверхности бетонного образца, претерпевают существенные изменения вследствие дисперсии скорости звука, трансформации типов волн при дифракции, отражении, преломлении, затухании. Бетон отличается непостоянством акустического сопротивления его составляющих: цементного камня, щебня или гравия, песка, и пор, заполненных воздухом и водой [2]. При этом, сильное затухание сигналов акустической эмиссии в бетонной смеси позволяет использовать данный метод в условиях строительной площадки, т.к. механические шумы не будут оказывать существенного влияния на процесс измерений. Анализ акустико-эмиссионных параметров при

твердении бетонных смесей позволяет выделить характерные периоды гидратации и определять ее кинетические параметры, что дает возможность оценивать влияние добавок на эксплуатационные свойства бетонов.

Так же метод АЭ применяют в качестве сопровождения бетонных объектов, что выражается в получении информации о возникновении и развитии опасных состояний в режиме реального времени, а также определении ресурса на любой стадии эксплуатации. В качестве основных параметров применяют акустико-эмиссионные критерии для диагностики предразрушающего состояния бетонных и железобетонных конструкций. Например, связь регистрируемых сигналов АЭ с физическим процессом разрушения определяется по отклонению от устойчивых (инвариантных) параметров, аналогичных исследованиям в металлах, композиционных материалах [3]. При экспериментальных исследованиях [4] было выявлено, что при образовании трещин, сколов бетона значения инвариантов изменяются. Это связано с высокой чувствительностью метода АЭ к развитию повреждений. Исследования показали возможность количественной оценки размеров трещин (суммарной длины в зоне контроля) железобетонной конструкции при помощи метода инвариантов.

#### **Список литературы:**

1. Сагайдак, А. И. Разработка методики контроля и прогноза прочности бетона в раннем возрасте методом акустической эмиссии / А. И. Сагайдак, В. В. Бардаков, Е. С. Боровкова // Бетон и железобетон. Строительные материалы и изделия. № 1 (615). – 2023. – С. 33–42.
2. Дурасов, А.С. Физические методы контроля качества бетона / А.С. Дурасов, Н.А. Крылов. – М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву, архитектуре и строительным материалам, 1959. – 103 с.
3. Буйло С.И. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики: монография / С.И. Буйло; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – 184 с.
4. Сагайдак, А. И. Применение акустико-эмиссионных критериев для исследования процессов деформирования и разрушения конструкций из железобетона / А. И. Сагайдак, Е.С. Боровкова // Бетон и железобетон. – 2023. № 3 (617). – С. 38–44.
5. Муравин Г.Б. Исследование акустической эмиссии твердеющего бетона / Г.Б. Муравин, Г.С. Павловская, А.Ф. Щуров // Дефектоскопия. – 1984. – №10. – С. 77–81.
6. Ohtsu M. Advanced Testing of Cement-Based Materials during Setting and Hardening – Final Report of RILEM TC 185-ATC.

Editors by H.W. Reinhardt and C.U. Grossetesting. RILEM Publications SARL. – 2005. – 21 p.

7. Бардаков В.В., Сагайдак А.И. Прогнозирование прочности бетона в процессе его твердения при помощи метода акустической эмиссии // РАН: Дефектоскопия. – 2017. – №6. – С. 40–43.
8. Сагайдак А.И., Боровкова Е.С. Определение прочностных характеристик бетона при его твердении с помощью метода акустической эмиссии // Современные вопросы механики сплошных сред – 2021 (23–24 ноября 2021 г., г. Чебоксары). – Чебоксары: ИД «Среда», С. 98-108.

# БЕЗДЕМОНТАЖНАЯ ПОВЕРКА ДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Редюшев А.А.

ООО "ГлобалТест"

Датчики акустической эмиссии часто устанавливаются на объекты таким образом, что их демонтаж практически невозможен или вызывает большие трудности. В то же время необходимо иметь уверенность в точности их показаний. Для таких случаев разрабатываются методики контроля работоспособности датчиков в процессе их эксплуатации без демонтажа. Кроме того, от периодической поверки иногда приходится отказываться по причине дороговизны самой поверки по сравнению со стоимостью датчика.

В публикациях по этой теме и в проспектах фирм-производителей описаны несколько подходов в решении проблемы надежности датчиков акустической эмиссии.

1. Проводится статистический анализ дрейфа характеристик датчиков конкретного типа при рабочих температурах, и устанавливается срок их эксплуатации, в течение которого точность находится в пределах заданных допусков с большой вероятностью. После истечения этого срока все датчики подлежат обязательной замене.

2. На объект устанавливается избыточное количество датчиков. Результат определяется либо по среднему арифметическому из их показаний, либо разрабатывается более сложная схема анализа, включающая сравнение дрейфов датчиков и выявление датчиков, показывающих дрейф выше среднего. Распространенной моделью являются датчики с двумя и тремя чувствительными элементами в одном корпусе.

3. На объект устанавливаются датчики разных. Это позволяет избежать ошибок, связанных с одинаковым влиянием температурных режимов и условий на датчики одного типа.

4. Иногда каналы для размещения датчиков конструируются так, что предусматривается возможность ввода рядом с рабочим датчиком образцового термометра во время поверки и вывода его по окончании поверки.

Методы бездемонтажной поверки важны на опасных объектах, таких, например, как активная зона реактора. К сожалению, никаких стандартов по методикам бездемонтажной проверки и контроля работоспособности датчиков нет. Однако проблема очень часто затрагивается на международных семинарах и конференциях.

ООО «ГлобалТест» предлагает два подхода к данной проблеме:

1. Применение переносного эталонного устройства, генерирующего сигнал акустической эмиссии.

2. Установка внутри датчика дополнительного калибровочного устройства, при подаче сигнала на которое можно поверить сам датчик. (Это датчики GT201UB и GT400)



Рис.1 Датчик акустической эмиссии GT201UB

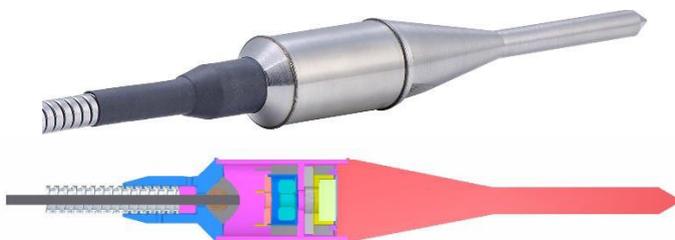


Рис.2 Датчик акустической эмиссии GT400

# КИНЕТИКА И КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ИЕРАРХИЯ НАНОДЕФЕКТОВ

В. Б. Кулик<sup>1</sup>, Х.Ф. Махмудов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН,  
г. Санкт-Петербург, [Vitaly.Kulik@mail.ioffe.ru](mailto:Vitaly.Kulik@mail.ioffe.ru)

Проведенные недавно исследования процесса накопления акустических сигналов от нагруженных гранитов [1,2] показали, что кинетика разрушения имеет более сложный характер по сравнению с известным из [3] двухуровневым механизмом разрушения. Было обнаружено, что процесс накопления трещин имеет, по крайней мере, четыре иерархических уровня. Цель данной работы – выяснить, имеет ли обнаруженный многоуровневый иерархический характер накопления трещин общий характер или он обусловлен особенностями разрушения горных пород.

Для решения задачи были проанализированы и сопоставлены результаты исследований накопления трещиноподобных дефектов с линейными размерами  $10 \dots 10^3$  нм на поверхности металлов и трещин с размерами  $0,1 \dots 1$  мм в объеме гранитов «Westerly» и «Harcourt».

Кинетика накопления дефектов с нанометровыми размерами на поверхности напряженных металлов изучалась при помощи сканирующей туннельной микроскопии, а трещин в объеме гранитов – при помощи акустической эмиссии.

Распределения дефектов по размерам в приведенных координатах на поверхностях меди, золота и молибдена под действием различных напряжений и в различные моменты времени после приложения напряжения показаны на рис. 1. Форма распределений универсальна.

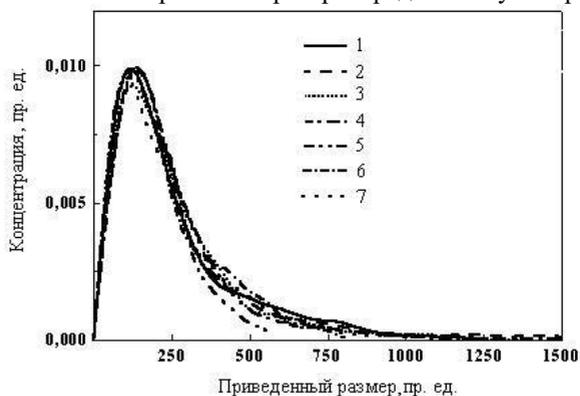


Рис. 1. Приведенные распределения дефектов, образовавшихся на поверхностях напряженных образцов меди (1–5), золота (6) и молибдена (7)

Для описания распределения использовано выражение для канонического распределения термодинамической вероятности флуктуаций энергии при постоянном объеме, полученное Гиббсом [4,5]. В результате преобразований было получено выражение для распределения нанодфектов по размерам  $n_e(y)$  на поверхности, которое хорошо описывает экспериментальные результаты для всех исследованных металлов [6,7].

$$n_e(y) = \sum_{i=1}^n n_{0i} y_i^2 \exp(-\beta y_i \Delta U_{0i}) \quad (1)$$

где  $n_{0i}$  – концентрация нанодфектов с длиной стенок  $y_i$ ;  $n_{0i} \equiv C_{ai} \beta (\Delta U_{0i})^2 / 2$ ;  $\Delta U_{0i}$  – энергия образования дефекта;  $C_{ai}$  – нормировочная постоянная;  $\beta \equiv 1/k_B T$ . Использование выражения (4) подразумевает, что совокупность нанодфектов состоит из нескольких статистических термодинамических ансамблей, отличающихся средними значениями размеров нанодфектов и энергиями их образования. Эти представления для исследованных металлов были прямо подтверждены в работах [6,7]. На этом основании был сделан вывод: трещиноподобные нанодфекты образуют статистические ансамбли, а их распределения по размерам заданы максимальным значением энтропии [8].

Энергия, выделяемая при образовании трещин, пропорциональна квадрату амплитуды акустического сигнала  $A^2$ , и выражение (1) преобразуется к виду

$$n_e(y) = \sum_{i=1}^n n_{0i} A_i^4 \exp(-\beta A_i^2 \Delta U_{0i}). \quad (2)$$

Исследования показали, что распределение квадратов амплитуд акустических сигналов также хорошо описывается выражением (2). Распределение квадратов амплитуд сигналов акустической эмиссии при сжатии гранита «Westerly» показано на рис. 2. Результат сжатия позволил заключить, что распределение трещин по размерам в исследованных гранитах также задано максимальным значением энтропии.

Исследования, проведенные в последние годы [6-8], показали, что выражения (1) и (2) описывают распределения по размерам нанодфектов в металлах, структурных образований в полимерах, бактерий и грибов, длин протеиновых молекул и т. д. Следовательно, они имеют общий характер: во всех исследованных твердых телах структурные образования и трещины образуют совокупность статистических термодинамических ансамблей, распределение в каждом из которых задано максимальным значением энтропии и описывается выражением Гиббса для флуктуаций.

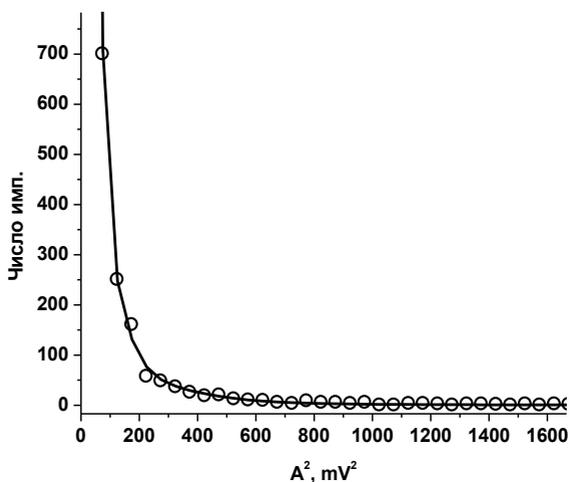


Рис. 2. Аппроксимация распределения квадратов амплитуд акустических сигналов от гранита «Westerly» по выражению (2)

#### Список литературы:

1. Н. Г. Томилин, Е. Е. Дамаскинская, В. С. Куksenko, Физика твердого тела, 1994, 36, с. 3101-3122.
2. V. Kuksenko, N. Tomilin, E. Damaskinskaja et al. Pure Applied Geophysics, 1996, 146, p. 253-263.
3. В. П. Тамуж, В. С. Куksenko. Микромеханика разрушения полимерных материалов / Рига: Зинатне. 1978.
4. B. L. Lavenda, Statistical Physics. A Probabilistic Approach. N.Y.: J. Wiley & Sons Inc. 1997.
5. Gibbs J. W. Elementary Principles in Statistical Mechanics. Yale University Press, New Haven, CT, 1902.
6. H. G. Kilian, M. Koeppf, V. I. Vettegren, Progress in Colloid and Polymer Science, 2001, p. 172.
7. Х. Г. Килиан, В. И. Веттерень, В. Н. Светлов, Физика твердого тела. 2001, 43, с. 2107-2111.
8. А.Г.Сырков, Н.Р. Прокопчук, И.В. Плескунов, Нанозифика и наноматериалы: Сборник научных трудов Международного симпозиума, посвященного 110-летию В.Б. Алесковского и 115-летию Л.А. Сена, Санкт-Петербург, 23–24 ноября 2022 года. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. 2022. с. 8-20.

# **АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТОДА АЭ. КОНТРОЛЬ КОМПОЗИТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ. ДЕФИЦИТ ПЛЕНОЧНЫХ ДАТЧИКОВ. ОДНОРАЗОВЫЙ ДАТЧИК, ВОПРОС МЕТРОЛОГИИ**

**Медведев К.А.**

*ООО «НТЦ «Эгида»*

При проведении испытаний композитных материалов с применением метода АЭ зачастую необходимо произвести набор статических данных в процессе разрушения изделий. Особенностью технологии контроля является метод крепления датчика, для обеспечения надежного контакта поверхности ПАЭ с объектом. Немаловажным является то, что при исследованиях объекты подвергаются разрушению, для регистрации параметров от всех стадий развития дефектов. Зачастую при таких испытаниях ПАЭ приходят в негодность. Большое количество испытаний и высокая цена ПАЭ делают подобные испытания весьма дорогостоящими.

Примером является стеклопластиковая штанга диаметром 25 мм, которая выдерживает однократную нагрузку равную 35 тоннам приложенной нагрузки. На первом этапе, когда нагрузка составляет порядка 5 тонн, регистрируются источники АЭ, связанные с релаксацией первичных напряжений, заложенных в процессе изготовления штанг и это, не является процессом, связанным с зарождением дефектов в материале. Далее при нагрузке свыше 25 тонн активность АЭ импульсов свыше 120 имп/с, амплитуда свыше 75 дБ и скорость счета свыше 500 ед/с. Данные параметры характерны для развития дефектов в стеклопластике, влияющих на несущую способность и снижающие прочностные свойства. Последующие регистрируемые параметры крайне важны для правильной оценки возможности безопасной эксплуатации объекта и вообще возможности повторного применения объекта. Но для сбора этих данных необходимо разрушить объект, что приведет к повреждению ПАЭ. Для статистики по всем номенклатурам нужно более сотни испытаний.

Для решения данной задачи автором доклада прилагается следующее:

- Исключение влияния кривизны поверхности (миниатюризация или развитие пленочных ПАЭ)
- Разработка одноразовых ПАЭ
- Метрологическое обеспечение ПАЭ для одноразового контроля (достоверность измерения при исследованиях).

# ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ ПОМЕХ ПРИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМ КОНТРОЛЕ

Карлов С.А.

*ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия, [aepro1988@gmail.com](mailto:aepro1988@gmail.com)*

Фильтрация сигналов помех является одной из основных задач при проведении АЭ контроля. Традиционная фильтрация по параметрам сигналов на основе логических правил требует длительного времени анализа для подбора оптимальных критериев. Кроме того, разумное число комбинаций логических правил не способно описать сложную структуру данных в многомерном пространстве признаков. В то же время, алгоритмы машинного обучения (ML) могут эффективно обучаться в многомерном пространстве признаков, а алгоритмы глубокого обучения (DL) дают возможность изучить наиболее информативные свойства данных, используя тренировочный набор из волновых форм или спектрограмм сигналов.

Однако при обработке данных, информативные параметры которых заметно отличаются от обучающего набора, качество работы алгоритмов ML снижается. В частности, в одной из работ автора было показано, что алгоритм DL, натренированный на данных, полученных при испытаниях судовых трубопроводов воздуха среднего давления, способен эффективно работать и на трубопроводах воздуха высокого давления при других настройках аппаратуры. Однако эта модель оказалась абсолютно не пригодна для разделения сигналов помех и сигналов АЭ при контроле процесса сварки (см. таблицу ниже), так как в этом случае имеются принципиально другие условия волноводного распространения акустических сигналов.

В настоящей работе рассмотрена возможность фильтрации сигналов электромагнитных (ЭМ) помех методами машинного обучения при использовании в обучающем наборе данных ограниченного количества сигналов АЭ и ЭМ. Кроме того, предпринята попытка решения этой задачи только на параметрах ЭМ-помех, при полном отсутствии информации о сигналах АЭ.

Эффективность алгоритмов машинного обучения была проверена на информации, зарегистрированной при проведении АЭ контроля в процессе аргонодуговой сварки при изготовлении корпусной конструкции. Для этого были отобраны 2334 сигнала ЭМ-помех и 967 АЭ сигналов от дефектов при незначительных нарушениях в технологии сварки. Для проверки на данных, отличающихся от обучающих, были также рассмотрены сигналы АЭ в процессе развития трещины при статических

испытаниях опытных образцов из материала корпусной конструкции на трёхточечный изгиб.

Для обучения с учителем был выбран метод опорных векторов SVM, а в качестве моделей, обучающихся только на сигналах ЭМ-помех, использовались алгоритмы IF и EIF («изолирующие леса»).

Результаты по разделению сигналов трех рассматриваемых типов с применением различных способов обработки приведены в таблице, где эффективность алгоритмов представлена средним процентом правильных ответов и стандартным отклонением, полученными при 100 повторениях процесса обучения на случайных подмножествах тренировочных данных.

Таблица

Алгоритм	Тренировочные данные	ЭМ-помехи, %	АЭ при сварке, %	АЭ от трещины, %
Ручная настройка	Все ЭМ + все АЭ	85,3	89,7	99,3
DL	Без дообучения	99,8	11,0	0,4
SVM	4 (ЭМ + АЭ)	75,1±20,8	70,2±24,4	84,8±24,9
SVM	16 (ЭМ + АЭ)	77,1±12,5	85,2±10,7	94,6±13,4
SVM	64 (ЭМ + АЭ)	86,1±3,5	91,8±3,9	94,6±10,5
SVM	512 (ЭМ + АЭ)	93,6±0,8	97,9±0,5	98,1±3,8
IF	1024 ЭМ	91,1±0,7	60,1±1,9	98,5±0,2
EIF	1024 ЭМ	91,5±0,6	55,3±2,4	97,8±0,4

Из представленных результатов следует, что алгоритму SVM для достижения уровня выделения ЭМ-помех и сигналов АЭ при сварке, полученного при ручной настройке, требуется по 64 положительных и отрицательных примера. Однако для эффективного выделения сигналов АЭ от трещины такого количества данных оказалось недостаточно. Обработка показала, что эффективность алгоритма SVM по разделению всех рассматриваемых источников сигналов достигается при использовании тренировочного набора данных, содержащего по 512 положительных и отрицательных примеров.

Было также установлено, что алгоритмы IF и EIF, обученные только на сигналах ЭМ-помех, способны эффективно выявлять только те сигналы, характеристики которых заметно отличаются от набора тренировочных данных.

## **ВЛИЯНИЕ НАВОДОРОЖИВАНИЯ И ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ПОВРЕЖДЕННОСТЬ И ПАРАМЕТРЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 15Х2ГМФ**

**Тютин М.Р.<sup>1</sup>, Ботвина Л.Р.<sup>1</sup>, Синев И.О.<sup>1</sup>, Иоффе А.В.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова  
РАН, г. Москва, Россия, [mtyutin@imet.ac.ru](mailto:mtyutin@imet.ac.ru)*

<sup>2</sup>*Israel institute of materials manufacturing technologies, Haifa, Israel*

Изучено влияние структурной деградации стали 15Х2ГМФ, применяемой в качестве материала нефтяных насосных штанг, на остаточную прочность, поврежденность и кинетику разрушения образцов.

Структурную деградацию осуществляли путем выдержки пластин из исследуемой стали в коррозионно-активной среде в течение недели без нагрузки. Состав среды соответствовал стандарту NACE TM0177, раствор А: 5,0 масс. % NaCl, 0,5 масс. % C<sub>3</sub>COOH в дистиллированной воде. Раствор постоянно барботировался H<sub>2</sub>S при нормальном давлении, температура испытаний 24±3°C.

После выдержки из пластин были вырезаны корсетные образцы толщиной 5 мм и шириной рабочей части 8 мм. С помощью установки Instron 8801 ( $P_{max}=100$  кН) при частоте 30 Гц проведены усталостные испытания образцов из исследуемой стали в исходном состоянии и после наводороживания. Часть образцов были испытаны при  $\sigma=620$  МПа до относительной долговечности  $N/N_f=0,5$  для изучения влияния механической деградации на кинетику разрушения образцов при последующем растяжении.

Испытания на растяжение проводили на установке Instron 3382 ( $P_{max}=100$  кН) с регистрацией сигналов акустической эмиссии (АЭ) при помощи системы Express-8 и датчиков WD 100-900 кГц (MISTRAS, PAC, США). Во время остановок нагружения фиксировали картины микротрещин на поверхности полированных образцов методом оптической микроскопии и по значению относительной площади кадра, занятой микротрещинами  $S^*$ , оценивали поврежденность материала.

Установлено, что долговечность образцов после выдержки в активной коррозионной среде значительно уменьшилась. Результаты испытаний на растяжение показали, что после предварительного циклирования образцов без выдержки наблюдается незначительное снижение остаточной прочности, заметное снижение накопленного числа сигналов АЭ ( $\Sigma M$ ), рост  $b$ -параметра (Таблица 1). Исследование влияния предварительного циклирования выдержанных в сероводородной среде образцов обнаружило небольшое увеличение прочности и работы разрушения, а также значительное увеличение активности АЭ на стадии

упругого деформирования, связанной с развитием дефектов, возникших при выдержке.

Таблица 1. Результаты испытаний образцов из стали 15Х2ГМФ

$N/N_f$	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$A_p$ , Дж	$\Sigma N$	$b$	$S^*_{max}$
До наводороживания						
0	916	1097	299,43	3040	0,965	24,6
0,5	868	1068	283,4	218	1,174	31,9
После наводороживания						
0	887	1049	196,4	751	0,7	38,3
0,5	882	1082	216,5	3171	1,17	38,3

Установлено, что в результате предварительного циклирования максимальное значение параметра поврежденности  $S^*$  возрастает, а после наводороживания – в еще большей степени (Таблица 1). Следует отметить, что предварительное циклирование наводороженных образцов не приводит к увеличению поврежденности, что свидетельствует о том, что структурная деградация исследуемой стали оказывает более существенное влияние, чем механическая деградация.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ КОНТРОЛЕ  
ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО  
ВЫРАЩИВАНИЯ**

**Кузиванов Д.О.<sup>1,2</sup>, Кинжагулов И.Ю.<sup>1,2</sup>, Коняшова К.А.<sup>1,2</sup>,  
Федоров А.В.<sup>2</sup>, Ильинский А.В.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>ООО «НТЦ «Эталон», Санкт-Петербург, Россия, [ntc-etalon@ya.ru](mailto:ntc-etalon@ya.ru)

<sup>2</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия, [od@itmo.ru](mailto:od@itmo.ru)

В настоящее время аддитивные технологии активно внедряются в различных отраслях промышленности. Одной из актуальных проблем при аддитивном производстве (АП) сложнопрофильных изделий является ограниченная контроледоступность и контролепригодность при оценке качества готовых изделий. Данные ограничения связаны с единичным характером производства, наличием закрытых внутренних полостей сложной формы и высокой шероховатости поверхности изделий. Данные факторы накладывают методические и аппаратные ограничения при создании сканирующих устройств для проведения неразрушающего контроля (НК) внутренних дефектов изделий, характерных для АП. Возможное решение данной проблемы состоит в создании средств и методик НК дефектообразования в процессе выращивания заготовок изделий для оценки качества изделий АП [1-2].

В работе представлены результаты экспериментальной оценки применимости метода акустической эмиссии (АЭ) для контроля дефектообразования в процессе прямого лазерного выращивания (ПЛВ) металлических изделий. В рамках экспериментального исследования при различных технологических параметрах проведено выращивание образцов из гранул сплава ЭП 648 с одновременной регистрацией сигналов АЭ. Выполнено исследование корреляции между параметрами АЭ и параметрами структуры изделий при различных режимах ПЛВ для выявления информативных параметров АЭ и сформирования диагностических признаков обнаружения и идентификации дефектов в процессе ПЛВ.

В ходе работы выявлены источники и определены частотные диапазоны акустических и механических шумов при ПЛВ для их последующей фильтрации. Установлено, что при регистрации широкополосными преобразователями АЭ значения доминантных частот акустического и механического шума, возникающего при ПЛВ, не превышают 250 кГц. Выделены две доминантные частоты шума  $f_{d1} = 150$  кГц и  $f_{d2} = 220$  кГц.

Выполнен анализ потоковых характеристик АЭ, а также амплитудных, энергетических и частотных параметров сигналов АЭ. Определены группы информативных параметров АЭ, формирующих АЭ

образы процесса ПЛВ образцов при разных значениях технологических параметров.

В ходе металлографического анализа образцов, выполненных ПЛВ, установлено наличие пористости (диаметр пор до 150 мкм) во всех исследуемых образцах. В одном из образцов обнаружены две поперечные горячие трещины протяженностью более 300 мкм.

По результатам анализа параметров сигналов АЭ сформированы акустико-эмиссионные образы ПЛВ бездефектных и дефектных образцов, для которых установлены следующие закономерности:

- максимальное значение амплитуды сигналов АЭ, зарегистрированных при ПЛВ образца с наличием дефектов типа трещин, превосходит значения данного параметра при ПЛВ условно бездефектных образцов более чем на 20 %;

- число сигналов АЭ и среднее значение амплитуды сигналов АЭ, зарегистрированных при ПЛВ образца с наличием дефектов типа трещин, превосходит значения данных параметров при ПЛВ условно бездефектных образцов на 5-10 %;

- установлена доминантная частота сигналов АЭ  $f_d = 300 \pm 10$  кГц, зарегистрированных при ПЛВ условно бездефектных образцов;

- отмечено смещение в высокочастотную область доминантной частоты сигналов АЭ, зарегистрированных при ПЛВ образца с наличием дефектов типа трещин, доминантная частота сигналов АЭ составила  $f_d = 410 \pm 10$  кГц.

Вышечисленные параметры могут являться информативными при разработке критериев идентификации образования трещин в изделиях в процессе выращивания.

Результаты экспериментальных исследований показали возможность применения метода АЭ для контроля дефектообразования в процессе ПЛВ изделий из металлических материалов. Использование критерия, основанного на амплитудном распределении параметров сигналов АЭ, позволит реализовать методики своевременного обнаружения и идентификации образования дефектов типа трещин в процессе ПЛВ.

#### **Список литературы:**

1. Kouprianoff D., Yadroitsava I., Plessis A., Luwes N., Yadroitsev I. Monitoring of Laser Powder Bed Fusion by Acoustic Emission: Investigation of Single Tracks and Layers // *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 7. pp. 1-17.
2. Eschner N., Weiser L., Häfner B., Lanza G. Development of an acoustic process monitoring system for selective laser melting (SLM) // *Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*. 2018. pp. 2097-2117.

## ПРОГРАММА ПО ОБРАБОТКЕ АЭ-ДАНЫХ «АЕГА»

Амелюшко П.Е., Шешуков А.Н.

ОАО «Нафтан» нефтеперерабатывающий завод, Беларусь,  
Sheshukov@naftan.by

Программное обеспечение современных акустико-эмиссионных систем отражает подходы разработчиков к решению определенных задач в том виде, как они им представляются. Пользователи зачастую не удовлетворены предлагаемыми возможностями, и попытки разработать собственный софт с той или иной долей успеха предпринимались некоторыми энтузиастами. Программа «Аега» реализует дополнительные возможности по фильтрации и оценке акустико-эмиссионных данных. Главный экран программы показан на Рис. 1.

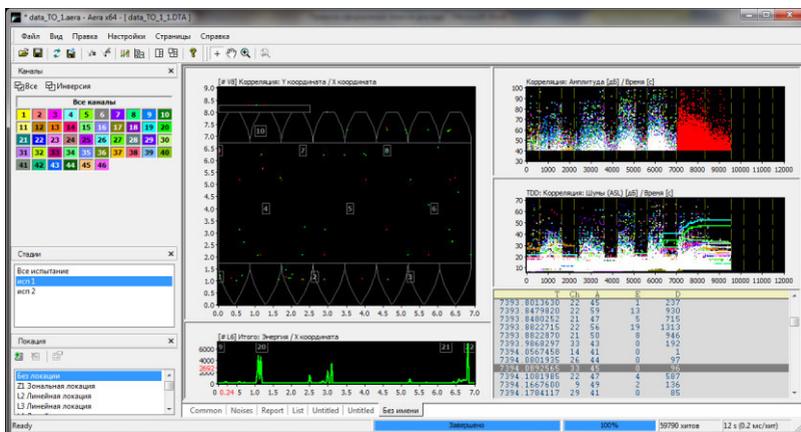


Рисунок 1. Экран «Аега» с графиками локации

Основные моменты, выгодно отличающие данную программу от «обычных» программ, следующие:

- отображение данных на цветных графиках при большом количестве каналов затрудняет их идентификацию по цвету. Поэтому, при наведении курсора мыши на хит, номер канала подсвечивается на панели каналов;
- хиты, выделенные на одном графике, выделяются и на других графиках;
- при изменении масштаба оси времени масштаб изменяется на всех графиках;
- при необходимости рассмотрения параметров отдельных хитов или пачек они выделяются на графике и отображаются в табличном виде. При настроенной зонной локации первые хиты в событии в таблице выделяются

цветом. Кроме того, при нажатии F3 отображается разность времен прихода хитов на разные датчики;

- фильтрацию можно проводить как непосредственным выделением хитов на графике, так и заданием логических выражений. В полной мере реализована возможность применения фильтра Swansong (фильтрует механические помехи);

- отфильтрованные данные не удаляются. Их всегда можно просмотреть или восстановить в произвольном порядке;

- реализована критериальная оценка по технологии MONPAC;

- реализована возможность разделения испытания на стадии «выдержка-подъем» для проведения оценки по технологии MONPAC или раздельной оценки результатов первого и второго подъема давления;

- алгоритм локации на сосуде работает с учетом реальной конфигурации объекта (цилиндрическая обечайка, сферические, эллиптические или конические элементы);

- для формирования отчета графики копируются в буфер обмена с заданным разрешением и вставляются в текстовый редактор в удобочитаемой форме.

Программа напрямую работает с данными, полученными от АЭ-систем Disp, Samos. Через конвертор принимаются данные Малахит АС-15А, Эксперт -2014, А-Line.

УДК 620.179.17

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РЕЗОНАНСА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Ушанов С.В.<sup>1,2\*</sup>, Барат В.А.<sup>1</sup>, Елизаров С.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ООО «Интерюнис-ИТ», РФ, Москва

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», РФ, Москва

*UshanovSV@mpei.ru*

Одной из проблем классического метода диагностики состояния подшипников является сложность определения в спектре сигнала дефектного подшипника конкретных подшипниковых гармоник – частот спектра сигнала, которые соответствуют дефектам элементов подшипника [1]. По этой причине диагностика подшипников может производиться только в случае, когда дефект разовьется до такой степени, когда мощность его гармоник будет соизмерима с мощностью гармоник, связанных с небалансом, расцентровкой, вибрацией элементов конструкции.

Метод АЭ, обладающий большей чувствительностью по сравнению с вибродиагностикой, позволяет обнаруживать дефекты на ранней стадии, предупреждая разрушение конструкции. Особенно важным это оказывается для подшипников, содержащих небольшие дефекты, которые не вызывают заметной вибрации в области низких и средних частот. Точность диагностики можно повысить с помощью декомпозиции сигнала на детерминированные и случайные составляющие.

С целью выделения из исследуемого сигнала представляющих интерес детерминированных составляющих используется метод высокочастотного резонанса [2-3], позволяющий исследовать спектр огибающей на наличие пиков, соответствующих подшипниковым гармоникам.

Алгоритм высокочастотного резонанса позволяет достичь высокого спектрального разрешения за счет применения авторегрессионной модели, позволяющей выделить детерминированную составляющую процесса, а также за счет определения спектрального эксцесса позволяющего определить диапазон частот для дополнительной фильтрации шумов.

С помощью данного алгоритма были исследованы конденсатные насосы турбоустановок ПТ-65/75-130/13 и Т-250/300-240-2. ТЭЦ-22. Запись сигналов производилась с помощью системы L-Card по 4-х канальной схеме, преобразователи GT-200 устанавливались на линии отсоса и уплотнения. По результатам исследования для конденсатных насосов ТГ-1 было установлено наличие в спектре составляющих, соответствующих подшипниковым гармоникам (рис. 1).

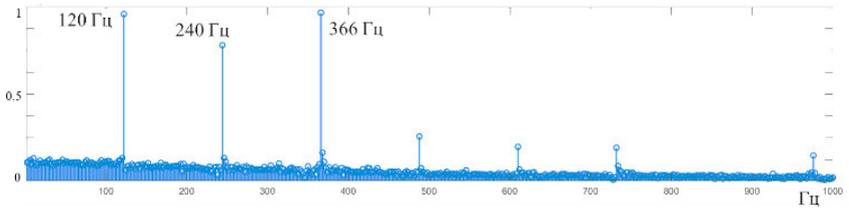


Рис. 1 Спектр огибающие сигнала кн ТГ-1

**Список литературы:**

1. В.А. Русов. Диагностика дефектов вращающегося оборудования по вибрационным сигналам: Монография. – Пермь, 2012. – 252 с.
2. S. KIM, D. AN, J.-H. Choi. 2020. Diagnostics 101: A tutorial for a fault diagnostics of rolling element bearing using envelope analysis in MATLAB. Applied Sciences (Switzerland)
3. J. SHIROISHI, Y. LI, S. LIANG, T. KURFESS AND S. DANYLUK. 1997. Bearing condition diagnostics via vibration and acoustic emission measurements. Mechanical Systems and Signal Processing, 11(5), 693-705.

## **МЕХАНИЗМЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ АЛЮМИНИЯ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

**Макаров С.В., Плотников В.А., Тихонский Н.Д., Плотникова А.О.**

*Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия  
[makarov@phys.asu.ru](mailto:makarov@phys.asu.ru)*

Пластическая деформация алюминия и алюминиевых сплавов при высоких температурах в условиях мягкой схемы нагружения характеризуется наличием на зависимости деформация от времени двух деформационных участков. В низкотемпературной области 1 (до  $0,5 T_{nl}$ ) – монотонной деформации (3-5 %, с низкой скоростью) соответствует акустическая эмиссия, характеризуемая монотонным нарастанием среднеквадратичного напряжения при нагреве, свидетельствующей о низкой корреляции элементарных деформационных актов и низкой колебательной энергии акустической эмиссии в деформируемом объеме.

В высокотемпературной области 2 (более  $0,5 T_{nl}$ ) характер накопления деформации и акустической эмиссии меняется: быстрому (квазискачкообразному) накоплению деформации соответствует активный рост амплитуды среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии. Резкое возрастание среднеквадратичного напряжения говорит о существенном увеличении колебательной энергии акустической эмиссии в деформируемом объеме образца. Отметим, что процесс эмиссии акустического сигнала осуществляется при выходе дислокационного ансамбля на свободную поверхность кристалла [например 1]. Такой же эффект должен наблюдаться и при выходе дислокаций на внутреннюю границу – границу зерна.

Переход из области 1 в область 2 осуществляется за счет смены механизма деформации и представляет собой деформационный структурный переход – происходит смена процесса накопления деформации, контролируемого термически активируемым переполнением дислокаций (область 1), на процесс накопления, контролируемый процессом производства дислокаций на тройных зернограницных стыках в ходе зернограницного проскальзывания (область 2). Деформационный структурный переход осуществляется, когда температурно-силовые параметры и колебательная энергия акустической эмиссии в деформируемом объеме достигают критических значений. Таким образом, деформационный структурный переход 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. Очевидно,

производство полных дислокаций при активации зернограничного проскальзывания позволяет обеспечить значительное увеличение скорости накопления деформации в области 2.

Колебательная энергия акустической эмиссии накапливается в объеме деформируемого образца. Единственным процессом, который может обеспечить накопление колебательной энергии, является процесс формирования стоячих акустических волн на естественных резонаторах в системе образец-волновод [2]. Разумеется, бегущая волна (точнее волновой пакет) также характеризуется некоторой колебательной энергией, однако эта энергия быстро затухает при распространении волнового пакета. При формировании стоячей волны энергия первичных сигналов акустической эмиссии перераспределяется по всем резонаторам системы, но наиболее важным является резонатор в области локализации деформации. Колебательная энергия стоячей волны этого резонатора совместно со статическими смещениями и тепловыми флуктуациями обеспечивает активацию элементарных сдвигов и их корреляцию в области локализации деформации.

Рост энергии акустической эмиссии при переходе в область 2 свидетельствует о повышении корреляционных эффектов в системе элементарных деформационных актов [3]. Фактически процесс накопления деформации в области 2 контролируется акустической эмиссией (точнее акустическими стоячими волнами), в то время как в области 1 эта корреляция отсутствует. При этом с ростом температуры повышение корреляции в системе элементарных деформационных актов может привести к формированию макроскачка. Формирование макроскачка свидетельствует о макроскопическом масштабе корреляции деформационных актов в образце.

#### **Список литературы:**

1. Криштал М.А. и др. Влияние примесей на акустическую эмиссию при деформировании высококочистой меди / ФММ. – 1988. – Т. 66. – № 3. – С. 599–604.
2. Макаров С.В. и др. Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии и макроскопическая корреляция деформационных актов в слабоустойчивом состоянии кристаллической решетки при высокотемпературном нагружении алюминия / Известия вузов. Физика. – 2014. – №7. – С. 81–86.
3. Макаров С.В. и др. Высокотемпературная пластическая деформация и акустическая эмиссия алюминия в слабоустойчивом состоянии / Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – №6. – С. 23–30.

## **РЕКОНСТРУКЦИЯ ПЕРВИЧНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО ПАРАМЕТРАМ ПОТОКА ДАННЫХ АЭ**

**Кудряшов К.В.<sup>1,2</sup>, Ушанов С.В.<sup>1,2</sup>, Барат В.А.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ООО «Интерюнис-ИТ», РФ, Москва

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», РФ, Москва

*KudriashovKV@mpei.ru*

Современные системы акустической эмиссии (АЭ) представляют собой многоканальные измерительные комплексы, осуществляющие регистрацию данных АЭ с высокой частотой дискретизации. В случае высокой активности процесса АЭ за время контроля регистрируется большой объем измерительной информации. Для удобства хранения и анализа данных первичную диагностическую информацию записывают, как правило, не в полном объеме, поскольку для обнаружения и классификации источников АЭ достаточно значений стандартных АЭ параметров.

Однако в ряде случаев, например, при проведении экспертного анализа данных, целесообразно анализировать именно первичную диагностическую информацию – сигналы АЭ. В рамках данной работы был предложен алгоритм, позволяющий проводить восстановление формы АЭ сигнала по параметрам потока данных.

Алгоритм был реализован следующим образом, огибающая импульса моделировалась ассиметричной оконной функции с экстремумом, совпадающим по времени с максимальным значением сигнала. Передний и задний фронт импульса восстанавливался с помощью функций Гаусса с длительностями, соответствующими времени нарастания и времени спада импульса. Для заполнения огибающей использовался окрашенный шумовой процесс, соответствующий по диапазону частот полосе пропускания измерительного тракта.

**АКТИВНОСТЬ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ  
ГОРНЫХ ПОРОД****Шнюкова О.М.***Санкт-Петербургский горный университет императрицы  
Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, [s225008@stud.spmi.ru](mailto:s225008@stud.spmi.ru)*

Зачастую добыча полезных ископаемых осуществляется на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях, где можно наблюдать высокий уровень активизации сейсмических событий.

Известно, что при механическом воздействии на горные породы происходят процессы образования трещин, что является источником возникновения акустической эмиссии (АЭ) [1].

Изучение АЭ является неразрушающим методом контроля за состоянием горного массива [2]. Данная методика успешно применяется на рудниках Кольского полуострова и Дальнего Востока [3]. Метод АЭ позволяет производить контроль за состоянием горного массива с целью прогнозирования опасных геодинамических явлений, которые на рудниках склонных и опасных по горным ударам, могут проявляться в виде горных ударов, шелушения, стреляния и процессов заколообразования [4].

На базе лаборатории АО ВНИМИ (Санкт-Петербург) произведены лабораторные испытания образцов горных пород на одноосное сжатие до момента разрушения образца с одновременной регистрацией акустических и электромагнитных сигналов. Измерения акустического сигнала производились с помощью датчика колебаний KD35. Испытания осуществлялись над образцами керна богатой сульфидной руды, вмещающих пород-роговиков, габбро-долеритов такситовых (GD-T) и габбро-долеритов оливиновых (GD-O) с Октябрьского месторождения медно-никелевых руд.

В результате испытаний рассчитывались активности АЭ (количество событий акустической эмиссии в единицу времени) для пород четырех вышеперечисленных литотипов. Для каждого образца также определялся предел прочности на одноосное сжатие. В ходе испытаний установлено, что образцы руды имеют наименьшую прочность и наибольшую активность АЭ в среднем равную 6,2 имп/с, а наибольшее количество сигналов АЭ наблюдалось при достижении критических напряжений. Вмещающие породы и габбро-долериты обладают большим пределом прочности и меньшей активностью АЭ. Средняя активность АЭ GD-T, GD-O и роговиков равна 1,2 имп/с; 3,4 имп/с; 1,7 имп/с соответственно.

В ходе испытаний образцов определено, что породы различных литотипов обладают отличающимися значениями активности, из чего можно сделать вывод, что активности зависят от свойств горных пород, что

может служить критерием для определения опасных проявлений горного давления. Появление большого числа акустических сигналов может говорить о нахождении горного массива в состоянии повышенных рисков проявления опасных геодинамических явлений.

#### **Список литературы:**

1. Голосов Андрей Михайлович Локализация очага разрушения в образце горной породы методом акустической эмиссии // Вестник ИШ ДВФУ. 2011. №3-4 (8-9). С.174-186.
2. Лузина Н.П. Анализ результатов контроля технических изделий методом акустической эмиссии //Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2011. №3 (73). С.78-83.
3. Рассказов М. И., Терёшкин А. А., Цой Д. И., Константинов А. В., Сидляр А. В. Оценка геомеханического состояния горнорудного массива по данным сейсмоакустического мониторинга на удароопасных месторождениях//ГИАБ. 2021.№ 12-1. С. 167-182. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_121\_0\_167.
4. Господариков А.П., Киркин А.П., Ковалевский В.Н. О некоторых локальных методах предупреждения горных ударов // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2021. №2. С. 77-93.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В МАТЕРИАЛЕ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ.**

**Барат В.А.<sup>1,2</sup>, Ушанов С.В.<sup>1</sup>, Лепшеев Е.А.<sup>1</sup>, Кудряшов К.В.<sup>1,2</sup>,  
Марченков А.Ю.<sup>2</sup>, Чулков И.С.<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup> ООО «Интерюнис-ИТ», РФ, Москва*

*<sup>2</sup> ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», РФ, Москва  
baratva@mpei.ru*

Современный уровень развития машиностроения предъявляет все более высокие требования к контролю процесса механической, и в частности – токарной, обработки. Использование метода акустической эмиссии (АЭ) при контроле производственных процессов находит все большее применение в обрабатывающей промышленности благодаря возможности его высокой чувствительности, дистанционности, а также возможности применения непосредственно во время процесса обработки [1].

В данной работе рассмотрен контроль процесса токарной обработки, с применением метода АЭ. Целью контроля является обнаружение поверхностных дефектов деталей в процессе обточки.

В работе были исследованы цилиндрические образцы из стали 45 с искусственными дефектами типа пропил, глубиной 5 мм и раскрытием 0,25 мм. Образцы обтачивались на токарном станке ROMI C 420 при скорости подачи 0,09 об/мин, частоте вращения от 70 до 140 об/мин и глубине резания от 0,05 до 0,15 мм.

Данные АЭ измерялись в процессе обточки с помощью системы сбора данных L-Card, в качестве преобразователя АЭ использовался полосовой преобразователь ДИС 30-300, установленный на резцедержатель. Измерения проводились с частотой дискретизации 1 МГц в полосе частот 30-500 кГц. На основании измеренных данных было проведено исследование взаимосвязи параметров и режимов токарной обработки и характеристик АЭ сигнала.

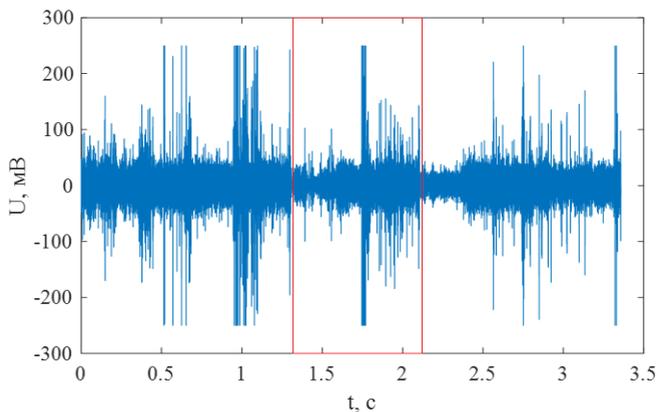


Рис. 1 Сигнал АЭ, соответствующий прохождению резца над пропилом при обычных параметрах работы

В работе было установлено, что в процессе токарной обработки обнаружение дефекта может быть проведено по характерному снижению среднеквадратического значения сигнала, которое происходит за счет потери контакта резца с поверхностью образца. Характерный вид АЭ сигнала при прохождении резца над пропилом показан на рисунке 1.

Для обнаружения участков сигнала с пониженным значением с.к.о. в рамках данной работы был предложен непараметрический ранговый алгоритм, позволяющий выявлять фрагменты сигнала, соответствующие прохождению резца над поверхностью дефекта.

#### **Список литературы:**

1. Rossing T. Springer Handbook of Acoustics / T. Rossing // Springer, New York. 2014.