Межгосударственный координационный совет по физике прочности и пластичности материалов
Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике
Объединенный экспертный Совет по проблемам метода акустической эмиссии
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
Крыловский государственный научный центр
Университет ИТМО

АПМАЭ-2021
Санкт-Петербург

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2021)

13 - 16 апреля 2021

Санкт-Петербург, Россия
2021

Межгосударственный координационный совет по физике прочности и пластичности материалов

Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике

Объединенный экспертный Совет по проблемам
метода акустической эмиссии

Университет ИТМО

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Крыловский государственный научный центр

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ» (АПМАЭ-2021)

13 - 16 апреля 2021 года,
Санкт-Петербург, Россия

Сборник материалов

Санкт-Петербург
Издательство «Свен»
2021

УДК 620.179.17(063)

ББК 30.3я43

А43

«Актуальные проблемы метода акустической эмиссии», всероссийская конференция с международным участием (2021; Санкт-Петербург).

Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» (АПМАЭ-2021), 13-16 апреля 2021, [Санкт-Петербург] : сборник материалов / Межгосударственный координационный совет по физике прочности и пластичности материалов [и др.] ; редакционная коллегия: д.т.н. Федоров А.В. [и др.]. – Санкт-Петербург : Свен, 2021. – 144 с.

ISBN 978-5-91161-051-7.

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

Редакционная коллегия:
д.т.н., Федоров А.В., к.ф.-м.н., Дамаскинская Е.Е., к.ф.-м.н., Нефедьев Е.Ю. – отв. редакторы; к.т.н. Е.В. Черняева – отв. за выпуск сборника.

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

Сборник предназначен для специалистов в области метода акустической эмиссии, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

ISBN 978-5-91161-051-7 © Издательство «Свен», 2021

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АЭ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Иванов В.И.

НИИИН МНПО «Спектр», Москва, РФ,
ivi444@mail.ru

1. Метод акустической эмиссии (АЭ), являющийся комплексным методом диагностики, применяется как инструмент исследования динамических процессов, излучающих акустические сигналы, и используется при выполнении контроля и диагностирования технических объектов. Поэтому перед специалистами, использующими метод АЭ, стоят задачи, связанные с техногенной (промышленной) безопасностью.

2. При обеспечении промышленной безопасности важную роль играют методы неразрушающего контроля (НК). Основная задача традиционного НК - обнаружить дефект конструкции и определить (измерить) его параметры. Кроме неразрушающего контроля в проблеме сохранения промышленной безопасности (ПБ) участвуют также механика разрушения (МР), материаловедение (металловедение) и ряд других технологий, составляющих систему ПБ. МР решает задачи оценки прочности («статической», циклической, долговременной), а также прогнозирования изменения прочности, деградации материала и конструкции.

3. Ранее МР и материаловедение работали самостоятельно, отдельно от НК и объединялись они только при разработке норм браковки.

4. В настоящее врем все эти научно-технические направления объединены в техническом диагностировании (ТД). С самого начала метод АЭ был не только методом НК, но диагностическим методом и привлек тем самым внимание многих исследователей. Метод АЭ подавал большие надежды. Другие методы НК, в отличие от метода АЭ, ранее не могли непосредственно использоваться для определения (расчета) безопасности.

5. В настоящее время традиционные методы значительно продвинулись в оценке промышленной безопасности через использование информации о параметрах дефектов при расчетах вероятности разрушения и, соответственно, риска аварии. Кроме того, в настоящее время в НК начинается практическое использование показателей вероятности обнаружения дефектов (*ВОД-PoD* – диаграммы) и диаграммы информации о дефектности (*ДИД-ROC* – диаграммы).

6. Указанные диаграммы в области АЭ пока не настолько проработаны, чтобы их возможно было использовать при диагностировании промышленных объектов.

7. В отличие от других методов при использовании метода АЭ имеется возможность наблюдения деградации материалов промышленных объектов, образования и увеличения размеров дефектов в реальном времени. В потенциале метода АЭ, который необходимо реализовывать, возможна оценка величины скачков трещин и их размеров.

8. Если имеется возможность наблюдать АЭ поведение объекта с самого начала в течение всего срока эксплуатации, то повышается возможность предотвратить разрушение и прогнозировать состояние объекта. Но для этого требуются организационные мероприятия по созданию систем АЭ мониторинга.

9. Поэтому пока мы говорим о предотвращении разрушения. Когда источник из 3-го класса трансформируется в 4-ый класс для некоторых материалов и конструкций прогнозирование возможно за 20-10% до разрушения. Но это необходимо каждый раз подтверждать, прежде чем использовать для оценки опасности разрушения.

10. В докладе рассмотрен ряд проблем и задач, которые необходимо решать при осознанном использовании метода АЭ для диагностики технических объектов.

МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ КАК ТОНКИЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Мерсон Д.Л.[1], Виноградов А.Ю.[2]

[1]Тольяттинский государственный университет, РФ, d.merson@tltsu.ru
[2]Норвежский университет естественных и технических наук, Норвегия

В настоящее время доказано, что в процессе нагружения металлов акустическая эмиссия (АЭ) регистрируется только с началом микропластической деформации, то есть напрямую связана с движением дефектов кристаллической решетки. Этот экспериментальный факт инициировал в 60-80 годах прошлого столетия теоретические исследования многих аспектов акустического излучения, связанного с элементарными носителями пластической деформации – дислокациями, в результате чего на основе континуальный динамики дислокаций были рассчитаны функции источников элементарных дислокационных механизмов пластической деформации [1-3].

С практической точки зрения важно объяснить не столько почему происходит излучение звука при деформировании материалов, сколько найти решение обратной задачи: по зарегистрированной АЭ научиться распознавать ее источники, т.е. с помощью АЭ идентифицировать процессы, происходящие в материале, в том числе, устанавливать кинетику различных механизмов пластической деформации в реальном времени.

Сложность этой задачи состоит в том, что излучение звука отдельной дислокацией практически невозможно зарегистрировать, поскольку энергия единичных элементарных источников АЭ существенно ниже чувствительности самой лучшей аппаратуры. Поэтому наблюдаемая экспериментаторами АЭ – есть суперпозиция сигналов от большого числа ее элементарных источников, т.е. является следствием коллективных дислокационных процессов.

Благодаря развитию цифровых методов анализа сигнала и фильтрации шума, в том числе, предлагаемых авторами [4-7], появляются совершенно новые возможности выделения слабого сигнала в стационарном шуме, даже тогда, когда их амплитуда существенно ниже уровня шума.

В докладе приводится ряд экспериментальных результатов, демонстрирующих современные возможности метода АЭ, в том числе: зависимости параметров и энергочастотных характеристик АЭ от кристаллографии и энергии дефектов упаковки деформируемого металла; применение байесовского подхода к анализу АЭ при деформационных процессах в магниевых сплавах для разделения вклада основных механизмов (скольжения дислокаций и двойникования); использование медианной частоты для определения точки начала процесса рекристаллизации и многие другие результаты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 20 19 00585

1. Eshelby J.D., Proc.Roy.Soc. 1962, v.260, p.222.
2. Косевич А.М., ЖЭТФ, 1962, т.42, с.152-162.
3. Нацик В.Д., Письма в ЖЭТФ, 1968, т.8, вып.6, с.324-328.
4. E. Pomponi, A. Vinogradov, A. Danyuk, Signal Processing 115 (0) (2015) 110-119.
5. E. Pomponi, A. Vinogradov, Mech. Syst. Signal Proc. 40 (2) (2013) 791-804.
6. Agletdinov, E.Pomponi, D. Merson, A. Vinogradov, Ultrasonics. 2016.v. 72. 89-94.
7. E. Agletdinov, A. Vinogradov, D. Merson, Applied Science. 2020. v. 10(1). № 73

АЭ КАК КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ. ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ.

Петерсен Т.Б., Шемякин В.В., Самохвалов А.Б., Курносов Д.А., Черниговский В.Ю.

ООО «ДИАПАК», Москва, Россия
tpetersen@diapac.ru

Возрастающая роль АЭ метода применительно к проблеме мониторинга опасных производственных объектов (ОПО) обусловлена тем, что в настоящее время АЭ является практически единственным методом НК, который способен обеспечить дистанционный мониторинг целостности статических объектов. В частности, метод позволяет обнаруживать различные акустические источники, связанные не только с трещинами, но также с другими эффектами, стимулирующими рост поврежденности. К таким воздействиям относятся удары элементов или технологической среды, например, химических агломератов о стенки объекта или гидроудары, а также трение поверхностей, способные вызывать деградацию и последующее разрушение материала. Кроме того, как было показано в [1], АЭ наряду с методом диагностики вибраций может с успехом применяться для контроля работоспособности динамических устройств и механизмов. Наметившаяся в последние годы тенденция расширения круга задач, которые решает метод, является следствием изменения общей парадигмы использования АЭ, в рамках которой метод может рассматриваться и как способ мониторинга целостности ОПО, и как средство диагностики параметров технического состояния объекта, и как основа для осуществления предиктивного анализа.

Сотрудники компании Диапак, выделившейся из Лаборатории Акустических Методов Контроля РНЦ «Курчатовский Институт», уже начиная с 80-х годов прошлого века, помимо лабораторных исследований, занимались также вопросами мониторинга компонентов 1 контура атомных электростанций и макетов сосудов давления. Наиболее трудоемкие и масштабные работы были проведены совместно с коллегами из таких организаций, как Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе (лаб., А.М. Лексовский); ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова» (сектор, В.А. Гуменюк, В.А. Сульженко), АО «ОКБМ Африкантов» (отдел, С.Н. Пичков), НПЦ Прометей (отделение, А.А. Блюмин).

За прошедшие более чем 30 лет сменилось 2 поколения АЭ приборов, существенно возросли память, быстродействие и надежность аппаратуры, расширились наши знания о процессах излучения и распространения волн. В настоящее время на крупных ОПО в среднем монтируется от 30 до 60 АЭ датчиков, при этом контроль может осуществляться непрерывно в течение многих лет. Так наша компания обеспечивает мониторинг целостности и оценки состояния нескольких нефтехимических объектов на протяжении более чем 8 лет. Максимальное количество используемых каналов на одном объекте составляет 150 шт., в день производится обработка более 1 ГБ информации. Кроме АЭ данных, система мониторинга позволяет регистрировать/вводить непосредственно из базы реального времени (MODBUS) десятки технологических и технических параметров, доступ к которым предоставляет завод. Некоторые из этих параметров, включая температуру, давление, скорость потока приведены в качестве примера в нижней части рис. 1.

Несмотря на известные трудности АЭ мониторинга, в основном связанные с нестационарным характером и повышенным уровнем шума, а также с возможностью

доступа к месту обнаруживаемых источников только в период ТОиР или внепланового останова, имеются также факторы, которые облегчают возможность правильной интерпретации информации. К ним относятся наличие больших выборок данных, повторяемость режимов работы объекта и соответствующей АЭ информации и, следовательно, возможность получения устойчивых признаков нормальной/аномальной работы, а также наличия/отсутствия дефектов. Для примера в верхней части рис.1 приведена типичная картина роста одного из индикаторов состояния объекта, отношения парциальных частот акустического шума, характерная для нарушения нормальной работы объекта и отказа. Показаны 3-х месячные исторические данные, однако программа обработки позволяет детализировать информацию с точностью до секунды (усреднение по секундному интервалу), при этом частота сбора АЭ данных, как правило, задается равной 1-2,5 МГц в зависимости от используемого частотного диапазона.

Для корректной интерпретации данных разработанное в Диапак ПО одновременно использует различные АЭ признаки, включая параметры формы и спектра сигналов, потоковые характеристики, спектральные свойства НЧ шума, тренды и корреляции с технологическими параметрами.

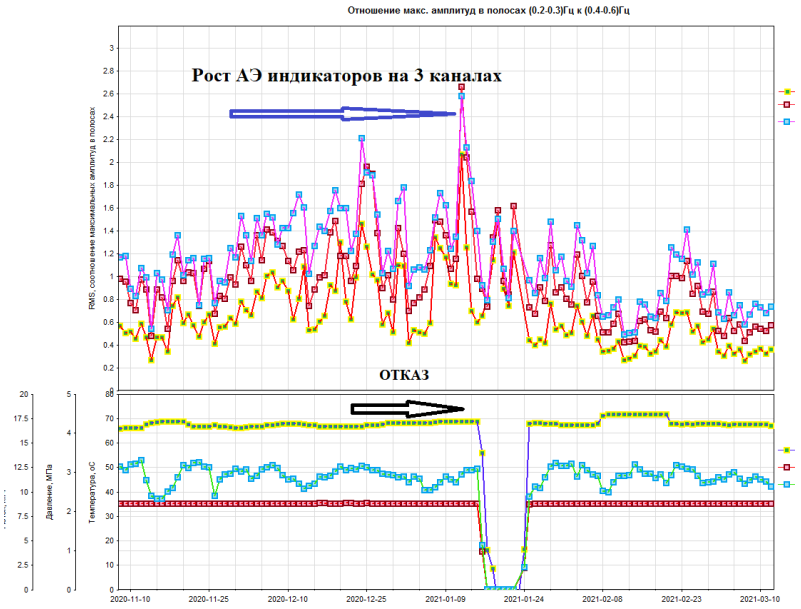


Рис. 1. Динамика отношения парциальных частот акустического шума

Резюмируя, отметим, что основные перспективы развития и внедрения технологии АЭ мониторинга будут связаны с дальнейшим увеличением надежности аппаратуры, использованием технологии Big Data, акустическими исследованиями эффектов распространения волн в объекте контроля, развитием алгоритмов обработки данных. Не менее важным станет решение частных задач мониторинга, продиктованных особенностями технологии производства и режимов работы ОПО и связанных с разработкой специализированных алгоритмов и программ, ориентированных на решение конкретных производственных проблем.

1. Petersen T.B., Shemyakin V.V, Chernigovsky V. Noise diagnostics at AE monitoring of hazardous industrial assets. Springer. Advances in Acoustic Emission Technology. Proceedings of the ISAE WCAE-2013 Shanghai, China, pp.93-102.

МОНИТОРИНГ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО СОСТОЯНИЯ

Науменко А.П. [1], Кудрявцева И.С. [1], Одинец А.И. [1], Язовский А.В. [2]

[1]*ФГБОУ ВО Омский государственный технический университет*
[2]*ООО «Нефтехимремонт», Омск, Россия*

Мониторинг безопасности колонно-ёмкостного оборудования в процессе эксплуатации, а также контроль его состояния во время ремонта базируются на системах акустико-эмиссионного контроля (АЭ) [1, 2, 3, 4]. В основе оценки состояния лежат статистические данные [5] и величины измеряемых параметров [6].

С целью повышения достоверности контроля состояния в системах комплексного мониторинга и, в частности, с использованием акустической эмиссии, целесообразно использовать вероятностно-статистические методы принятия решений [6]. Методы принятия решения оперируют с гипотезами о возможности одного из вероятных исходов события. Естественно, что должны быть известны хотя бы оценки законов распределения вероятностей исходов. Каждый показатель, который описывает события, представляется совокупностью признаков и является элементом системы определяющих критериев оценки состояния. Каждый из признаков также должен быть охарактеризован вероятностными характеристиками. Суть вероятностно-статистических методов принятия решений состоит в использовании вероятностных моделей для проверки гипотезы о принадлежности выделенных признаков события тому или иному образу.

Метод, основанный на обобщённой формуле Байеса, является простым и эффективным решением задачи. Однако такой подход обладает способностью «угнетать» редко встречающиеся события или признаки [7].

При возможности проведения повторных измерений или при наличия потока событий весьма эффективным является метод последовательного анализа (метод Вальда). Данный метод позволяет принять статистически обоснованное решение на ограниченном объёме выборочных данных и/или в процессе измерений [7].

В радиотехнических системах, в частности, в радиолокации, в технической диагностике широко применяются такие методы, как метод Неймана-Пирсона, минимакса, наибольшего правдоподобия, минимального числа ошибочных решений, минимального риска, которые дают возможность выбрать решающее правило исходя из условий оптимальности, например, из условия минимального риска принятия решения, минимизации ошибок первого или второго рода [7, 8].

Определим вероятность ложной тревоги $\boldsymbol{P_{ЛТ}}$, т.е. когда $\boldsymbol{x>x_0}$ (порог превышен), а узел является исправным. Вероятность такого события равна вероятности произведения двух событий: наличие исправного состояния и величины диагностического признака $\boldsymbol{x>x_0}$ события (рис. 1), а при наличии дефекта и величине $\boldsymbol{x<x_0}$ определим вероятность пропуска дефекта или опасного состояния $P_{ПД}$:

$$P_{ЛТ} = P_1 \int_{x_0}^{\infty} f(\frac{x}{D_1})dx,\ P_{ПД} = P_2 \int_{-\infty}^{x_0} f(\frac{x}{D_2})dx. \qquad (1)$$

Здесь $f(x/D_1)$ и $f(x/D_2)$ – соответственно плотности вероятностей для исправного D_1 и неисправного D_2 состояний; $P_1 = P(D_1)$ и $P_2 = P(D_2)$ – априорные вероятности соответственно диагнозов D_1 и D_2, которые являются известными.

Достоверность диагноза определяется вероятностями правильных диагнозов: вероятностью определения исправного и неисправного состояний:

$$P_{ИС} = P_1 \int_{-\infty}^{x_0} f(\frac{x}{D_1})dx, P_{НС} = P_2 \int_{x_0}^{\infty} f(\frac{x}{D_2})dx. \quad (2)$$

В общем случае средний риск (ожидаемая величина потерь) оценивается как:

$$R = P_{ИС}C_{11} + P_{ЛТ}C_{21} + P_{НС}C_{22} + P_{ПД}C_{12}. \quad (3)$$

Здесь цены правильных решений есть C_{11} и C_{22}; C_{21} – цена ложной тревоги; C_{12} – цена пропуска дефекта (первый индекс – принятое состояние, второе – действительное), обычно $C_{12} >> C_{21}$.

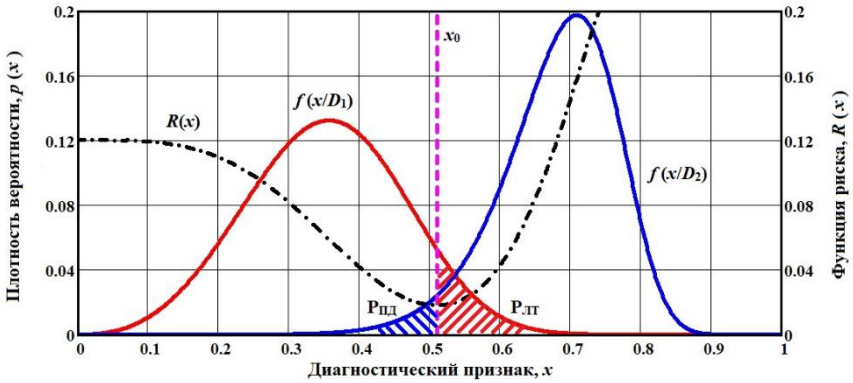


Рис. 1. Плотности вероятности диагностического признака для исправного $f(x/D_1)$ и неисправного $f(x/D_2)$ состояний, функция риска принятия решения $R(x)$

Таким образом, при наличии статистических данных о параметрах АЭ сигналов для различных состояний объекта можно определить вероятностные характеристики параметров и на их основе реализовать систему принятия решений о наличии или отсутствии сигнала, о принадлежности объекта к одному или другому состоянию. Принятое решение будет основываться на математически обоснованных методах и оперировать с такими критериями, как достоверность и риск принятия решения.

1. Бородин Ю.П., Харебов В.Г., Шапарев В.А. Основные принципы комплексного диагностического мониторинга / В мире неразрушающего контроля. – 2003. № 4. – С. 16-18.
2. Харебов В.Г., Попков Ю.С. Автоматизированные системы комплексного коррозионного мониторинга и перспективы применения метода АЭ в их составе / В мире неразрушающего контроля. – 2008. № 3 (41). – С. 14-17.
3. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Науменко А.П. Комплексный мониторинг состояния оборудования опасных производств нефтегазохимического комплекса / Химическая техника. – 2008. № 9. – С. 30.
4. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Науменко А.П. Комплексный мониторинг оборудования опасных производств / Химическая техника. – 2008. № 3. – С. 24.
5. Науменко А.П., Язовский А.В. Эмпирические характеристики акустико-эмиссионных сигналов // Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018) сборник материалов / отв. ред. Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов. – 2018. – С. 144-145.
6. Науменко А.П., Кудрявцева И.С., Одинец А.И. Оценка пиковых значений параметров колебательных процессов / Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. Т. 6. № 4. – С. 47-52.
7. Харкевич А.А. Борьба с помехами. Изд. 5-е, стереотип. – М.: ЛЕНАНД. 2018. – 280 с.
8. Костюков В.Н., Науменко А.П. Оценка риска выбора нормативных величин диагностических признаков / Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. № 4. – С. 150-154.

ПРИМЕНЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ СТАЛИ НА СИГНАЛЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Нефедьев Е.Ю.[1], Григорьева А.В.[2], Стояновский Л.О.[3], Гомера В.П.[4]

[1]*ФГУП «КГНЦ»,*
[I]*СПбГУ,*
[3]*СПбПУ им. Петра Великого,*
[4]*ООО «КИНЕФ»,*
Санкт-Петербург, Россия,
ne246@ya.ru

Различными исследователями показана важность границ зерен, как источников и стопоров микротрещин. Но нет единого мнения относительно того, какой именно элемент структуры отвечает за образование микротрещин. Большинство исследователей ограничивается изучением лишь связи среднего размера зерна с прочностными и пластическими свойствами [1]. Поэтому значительный интерес представляет изучение влияния размера различных компонент поликристаллической структуры на размер образующихся микротрещин. В проверке также нуждается справедливость предположения о сохранении вида связи между размером микротрещин и амплитудой сигналов АЭ при изменении размера зерна [2]. Подтверждение этого предположения можно рассматривать как доказательство того, что основным источником дискретной АЭ в конструкционных сталях является образование микротрещин.

Изучение связи размеров микротрещин, образующихся при деформировании конструкционных сталей, с размерами структурных зерен, выполнено на стали 08ГДНФЛ, подвергнутой различным режимам термической обработки.

Для изменения размера зерна использовалось три режима термообработки:

1. Нагрев до 800°С, выдержка 4 часа, охлаждение на воздухе.
2. Нагрев до 1050°С, выдержка 4 часа, охлаждение на воздухе.
3. Нагрев до 1100°С, выдержка 5 часов, охлаждение с печью.

Измерение размеров структурных элементов было проведено по методу хорд Спектора [3]. Средние размеры зерен при трех режимах термообработки составили 11 мкм, 21 мкм и 35 мкм.

Для изучения влияния структуры стали на размер микротрещин и амплитуды сигналов акустической эмиссии проведены испытания на растяжение трех партий образцов. Испытания образцов производились на установке "ИМАШ", позволяющей производить нагружение с постоянной скоростью и наблюдать при этом поверхность образца в микроскоп.

Для регистрации АЭ во время испытания были подготовлены специальные образцы с волноводами на головках.

Использование двухканальной установки АЭ позволило определить координаты источников эмиссии и выделить зону контроля на рабочей поверхности образца. Выделение зоны контроля позволило исключить сигналы от трения головок образцов в захватах и производить амплитудный анализ исключительно тех сигналов, которые приходили из рабочей части образца.

Образцы нагружались до предела текучести материала. Появившиеся микротрещины измерялись на образце, не снимая нагрузки. Регистрировались все микротрещины, начиная с размера 2 мкм. Для сравнения распределения микротрещин с

распределением размеров структурных элементов использовался критерий Колмогорова. Распределения структурных элементов в кумулятивном виде сравнивались с распределением микротрещин, считавшимся эталонным. Во всех трех случаях распределение микротрещин по размерам совпадает с распределением хорд ферритных зерен. Распределение микротрещин подобно распределению случайных хорд, потому что микротрещина представляет собой случайную плоскость, делящую зерно на две части. Эта плоскость не обязательно должна быть диаметральной плоскостью. Поэтому след ее на поверхности шлифа представляет собой случайную хорду.

Используя полученные параметры для каждого экспериментального распределения, было построено теоретическое логарифмически нормальное распределение и произведено их сравнение по критерию Колмогорова. Для всех распределений максимальное нормализованное отклонение λ не превышало 0,3. Это свидетельствует о том, что с вероятностью 1,0 данные распределения описываются логарифмически нормальным законом.

Амплитудное распределение сигналов АЭ полученных из зоны контроля образцов аппроксимировали функцией степенного вида.

В этих выражениях длина трещины выражается в микронах, а амплитуда сигнала АЭ в микровольтах. Постоянные множители находились из минимального размера регистрируемой микротрещины, который для данного случая изменялся от 38 мкм до 45 мкм, и минимально регистрируемой амплитуды сигнала, которая для данного прибора составляла 5 мкВ. Все полученные выражения, не внося большой ошибки, можно заменить одним выражением которое удовлетворительно описывает экспериментальные результаты:

$$A = 0.02 * L^{1.5} \quad \{1\}$$

Таким образом, показано, что выражение для зависимости амплитуды сигнала АЭ от размера возникающей микротрещины не содержит переменных, которые в явном виде обозначают размер структурных элементов, что является подтверждением того, что основным источником сигналов АЭ в конструкционных сталях является возникновение микротрещин. При этом характер распределения микротрещин по размерам и, соответственно, импульсов АЭ по амплитудам, определяется распределением размеров структурных элементов.

Список литературы

1. Мешков Ю.Я. Физические основы разрушения стальных конструкций. – Киев, Наукова думка, 1981, 240 с.
2. Нефедьев Е.Ю., Волков В.А., Ляшков А.И., Савельев В.Н. Связь размеров микротрещин с параметрами АЭ при статическом и циклическом нагружении конструкционных сталей. В сб.: 1-я Всесоюзная конференция «Акустическая эмиссия материалов и конструкций», ч.1 Ростов-на-Дону, 1984, с 226.
3. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1976, 270 с.

МЕТОДОЛОГИЯ АЭ-КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ШВОВ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Казаков Н.А., Нефедьев Е.Ю., Сульженко В.А., Яковлев А.В.

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия,
ne246@ya.ru

Акустико-эмиссионный контроль (АЭК) качества сварных швов при изготовлении корпусных конструкций проводится непосредственно в процессе выполнения сварочных проходов и при последующем остывании сварного соединения. АЭ-контроль осуществляется путем выявления в сварных швах и в прилегающих к ним зонах основного металла локализованных АЭ-источников (потенциальных дефектов структуры материала) и определения их местоположения (координат). Качество выполненных сварочных проходов оценивается в соответствии со степенью опасности выявленных АЭ-источников.

Основным преимуществом метода АЭ является возможность выявить опасные, развивающиеся дефекты непосредственно в процессе сварки. Применение АЭ приводит к своевременному обнаружению дефектных мест, что позволяет существенно снизить трудоемкость их исправления и ремонта.

Таким образом, оперативность и непрерывность АЭК на всем протяжении выполнения сварки при неоспоримом преимуществе в выявлении наиболее опасных трещиноподобных дефектов восполняет слабые стороны традиционных методов неразрушающего контроля (НК), что особенно важно при изготовлении ответственных конструкций из толстостенных материалов.

Однако, до настоящего времени этот прогрессивный метод АЭ-диагностики пока не нашел должного применения в технологии сварки. Одна из причин такого положения заключается в том, что для реализации метода АЭК при решении практических задач в заводских условиях требуется выполнение комплекса сложных программно-алгоритмических, методологических и организационных вопросов.

Главная проблема заключается в том, что процесс сварки неизбежно сопровождается высокой интенсивностью и большими объемами регистрируемой информации, основную часть которой составляют помехи различного вида [1]. Необходимость фильтрации регистрируемой акустической информации непосредственно в ходе сварки, т.е. в реальном масштабе времени, предъявляет очень высокие требования как к быстродействию аппаратуры АЭ, так и к ее программно-алгоритмическому обеспечению.

Не менее важной задачей при контроле качества выполнения сварки является обработка и критериальный анализ отфильтрованной информации с целью определения опасности выявляемых источников АЭ, т.е. допустимости или недопустимости выявленного дефекта и принятия решения о необходимости его выборки. Для этого нужно иметь объективную систему классификации зарегистрированных источников АЭ.

По методологии Крыловского центра при АЭ-контроле качества процесса сварки опасность выявленного источника АЭ оценивается показателем «Опасность кластера» S, который, в свою очередь, определяется количеством событий АЭ с высоким значением интегрального параметра «Степень опасности события» [2]. Одна-

ко эти параметры не являются достаточными характеристиками источника АЭ, регистрируемого в процессе сварки.

Это объясняется тем, что по методологии Крыловского центра основным критериальным признаком наличия недопустимого, развивающегося дефекта в процессе сварки является активное излучение сигналов АЭ в локальном месте сварного шва после его прохождения сварочной дугой, т.е. на стадии остывания металла сварочной ванны [3]. Поэтому важным признаком опасности источника АЭ являются его временные характеристики.

В рамках договора с НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» были проведены исследования по АЭ-контролю процесса сварки различных объектов. В результате выполненных работ предложен индикатор класса опасности источника *J*, который формируется в результате оценки с использованием аппарата «нечеткой логики» функции 4-х параметров выявленного источника АЭ:

$$J = f(N, S, T, K), \quad (1)$$

где N – число событий АЭ в кластере; S – опасность кластера; T – длительность излучения источника АЭ, определяемая как среднеквадратическое отклонение распределения событий АЭ во времени, и K – коэффициент асимметрии распределения событий АЭ во времени.

Работоспособность предложенного параметра, который является обобщенной характеристикой источника АЭ, проверена при сварке проб и полномасштабной модели. В результате выявлены допустимые и недопустимые источники АЭ. После сварки проведена оценка качества сварных швов методом ультразвукового контроля, а также выполнена цветная дефектоскопия при послойном вскрытии сварного шва полномасштабной модели.

Оба метода НК подтвердили факт существования недопустимых дефектов в районах сварных швов, где по результатам АЭ-контроля с применением разработанного критерия, были выявлены опасные источники АЭ.

Таким образом, предлагаемая методология АЭ-контроля позволяет достоверно и объективно оценивать качество сварных швов при их изготовлении.

Список литературы

1. В. П. Гомера, А. Д. Смирнов, Е. Ю. Нефедьев и др. Обнаружение методом акустической эмиссии трещин в сварном шве в процессе сварки // Контроль. Диагностика. 2016. №7. С.25-32.
2. Гуменюк В.А., Сульженко В.А., Казаков В.А., Яковлев А.В. Система классификации степени опасности источников акустической эмиссии и критерии экспресс-оценки состояния объектов на основе нечеткой логики // Контроль. Диагностика. 2003. №1. С.49-53,57.
3. Гуменюк В.А., Казаков Н.А., Сульженко В.А. Акустико-эмиссионный контроль процесса сварки объектов морской техники // В мире неразрушающего контроля. 2010. №4. С.24-29.

ЭФФЕКТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЦИКЛИРОВАНИЯ: ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРОЧНОСТИ

Ботвина Л.Р.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), г. Москва, Россия
lbotvina@imet.ac.ru

Изучено влияние предварительного циклирования на параметры акустической эмиссии, включающие интенсивность акустической эмиссии (dN_{AE}/dt), суммарное число сигналов (ΣN_{AE}), кумулятивную энергию акустических сигналов (E_{AE}) и b_{AE} - параметр, соответствующий угловому коэффициенту кумулятивных распределений числа акустических сигналов.

Предварительное циклическое нагружение конструкционных сталей с различной структурой осуществляли до значений циклической долговечности, составляющих 0,3, 0,5 и 0,7 от числа циклов до разрушения образцов при амплитуде напряжения, равной 1,1 от предела текучести материала. После предварительного нагружения образцы испытывали на растяжение с регистрацией акустической эмиссии с использованием системы Express-8 (PAC, USA). С помощью оптического микроскопа, снабженного цифровой видеокамерой, во время остановок при растяжении получали картины микротрещин на поверхности полированных образцов, и затем, используя программу анализа изображений, оценивали число (N), среднюю длину (l_{av}), плотность (n) микротрещин и относительную площадь (S^*) повреждений (суммарную площадь микротрещин, отнесенную к площади снимка). Это позволило построить зависимости характеристик реальной поврежденности и акустической эмиссии от относительной деформации, проследить стадийность развития поврежденности и связать ее со стадийностью изменения параметров акустической эмиссии в исходном состоянии и после предварительного циклирования.

Анализ полученных результатов обнаружил существенное влияние структуры и прочности исследуемой стали, а также длительности предварительного циклирования на характеристики акустической эмиссии, которые могут быть использованы в качестве критериев диагностики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №19-19-00674).

ОЦЕНКА КИНЕТИКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПО ПАРАМЕТРАМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКОГО И ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ

Тютин М.Р.[1], Ботвина Л.Р. [1], Петерсен Т.Б. [2]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), г. Москва, Россия
mtyutin@imet.ac.ru
[2]ООО «ДИАПАК», г. Москва, Россия

Оценка состояния конструкций является важнейшей задачей в промышленности для обеспечения безопасной эксплуатации оборудования и сооружений. Метод акустической эмиссии (АЭ) является одним из наиболее информативных и широко применяется для исследования процессов разрушения на различных масштабных уровнях, мониторинга и диагностики. Применяемые для технической диагностики методы неразрушающего контроля позволяют выявлять различные дефекты материала, возникшие при эксплуатации, производстве или монтаже. Однако оценка степени поврежденности металла является не менее важной задачей для прогнозирования работоспособности изделий и конструкций.

Цель данной работы заключалась в комплексном исследовании кинетики повреждений и стадийности разрушения образцов из конструкционных сталей (20, 45 и 12Х18Н10Т) при статическом нагружении. Оценивали поврежденность, как прямым методом оптической микроскопии, так и косвенно с помощью регистрации сигналов акустической эмиссии и измерения магнитных характеристик (коэрцитивной силы, напряженности вихревых токов и собственного магнитного поля). Акустическую эмиссию и напряженность собственного магнитного поля регистрировали в режиме реального времени при растяжении образцов. В качестве характерных параметров акустической эмиссии использовали скорость накопления ($\dot{N}_{АЭ}$), накопленное число ($\Sigma N_{АЭ}$) сигналов акустической эмиссии и $b_{АЭ}$-параметр. Поврежденность, коэрцитивную силу и вихретоковый параметр оценивали во время пауз при растяжении. Для оценки поврежденности использовали параметр S^*, являющийся относительной площадью, занятой микротрещинами [1].

Построены деформационные зависимости параметров акустической эмиссии, магнитных характеристик, а также параметра поврежденности S^*. Анализ полученных зависимостей позволил выделить характерные стадии разрушения изучаемых сталей, связанные с достижением предела текучести, зарождением микротрещин, началом их слияния, достижением предела прочности и окончательным разрушением образца. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что чувствительность используемых в данной работе методов существенно зависит как от стадии деформации, так и от структуры материала.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №19-19-00674).

1. Ботвина Л.Р., Солдатенков А.П., Левин В.П., Тютин М.Р., Демина Ю.А., Петерсен Т.Б., Дубов А.А., Семашко Н.А. Оценка характеристик поврежденности малоуглеродистой стали физическими методами // Металлы. 2016. № 1. С. 27–39.

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ КАК МЕТОД ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Линдеров М.Л.[1], Вагапов М.А.[1], Мерсон Д.Л.[1], Виноградов А.Ю.[1,2]

[1]Лаборатория физики прочности и интеллектуальные диагностические системы Тольяттинский Государственный Университет, Тольятти, Россия
[2]Department of Mechanical and Industrial Engineering, Norwegian University of Science and Technology-NTNU, Trondheim, Norway
dartvi@gmail.com

Введение

Известно, что метод акустической эмиссии с использованием современных алгоритмов для обработки сигналов возможно использовать для идентификации кинетики деформационных процессов, протекающих в материале при его нагружении, что было ранее продемонстрировано для магниевых сплавов [1], метастабильных сталях [2] и других материалов. Также широко известно, что все источники сигналов акустической эмиссии очень чувствительны к структурным изменениям. Так сигналы от движения скопления дислокаций могут блокироваться наклепом поверхности образца, а двойникование кардинально менять свою кинетику в зависимости от размера зерна. Кроме того, в записанном АЭ стриме содержатся сигналы от всех подвергшихся деформации областей образца. Подобные особенности метода можно использовать для идентификации комплексного состояния структуры материала в тех случаях, когда технологически возможно локальное воздействие на него, будь то точечный разогрев или нагружение, которые ввиду ограниченности своего действия могут быть сложны для поиска, например, с помощью металлографических методов исследования, но важны для получения корректных данных при проведении усталостных испытаний. Подобные сведения, в совокупности с диаграммой нагружения, могут быть полезны, например, при отработке методики нанесения диффузионных покрытий, где возможен локальный перегрев образца.

В представленной работе проводится исследования кинетики процессов, протекающих при одноосном растяжения магниевого сплава МА14 системы Mg-Zn-Zr после различных температур отжига для имитации изменения структуры от возможного локального разогрева.

Материалы и методы исследования

Из прутка магниевого сплава МА14 изготавливались стандартные цилиндрические образцы. Диаметр и длина рабочей части составила ∅6 мм и l_0=30 мм соответственно. Часть образцов отжигалась в среде аргона при T = 200°C, 300°C, 400°C и 500°C в течение 2 часов для оценки влияние температуры на физико-механические свойства и АЭ исследуемого сплава. Испытание на растяжение проводились на разрывной машине Tinius Olsen H50kT при скорости перемещения траверсы 5 мм/мин. Датчик АЭ PAC Pico механически закреплялся на образце. Запись сигнала проводилась без порога с частотой 2МГц платой PCI2 фирмы PAC в диапазоне частот 20-1000кГц. Для распознавания различных процессов, использовалась методика адаптивного последовательного кластерного анализа k-средних [3].

Результаты

Данные для образцов, испытанных в исходном состоянии и после отжига при 500°C, показаны на *рисунке 1*. Невооруженным взглядом видны значимые отличия как в прочностных свойствах, где предел прочности снизился с 340МПа, до 315МПа,

так и в акустических, где медианная частота f_m на линейной области возросла с 450кГц до 470кГц, что свидетельствует об увеличившейся доли высокочастотных сигналов. Также у образца, подвергнутого предварительному отжигу, доля импульсных высокоамплитудных сигналов значительно возросла, что говорит об интенсификации процессов двойникования. Данное явление хорошо прослеживается по результатам кластерного анализа, где наблюдается увеличение количества элементов АЭ для кластера, соответствующего процессам двойникования при сохранении общей кинетики самого процесса.

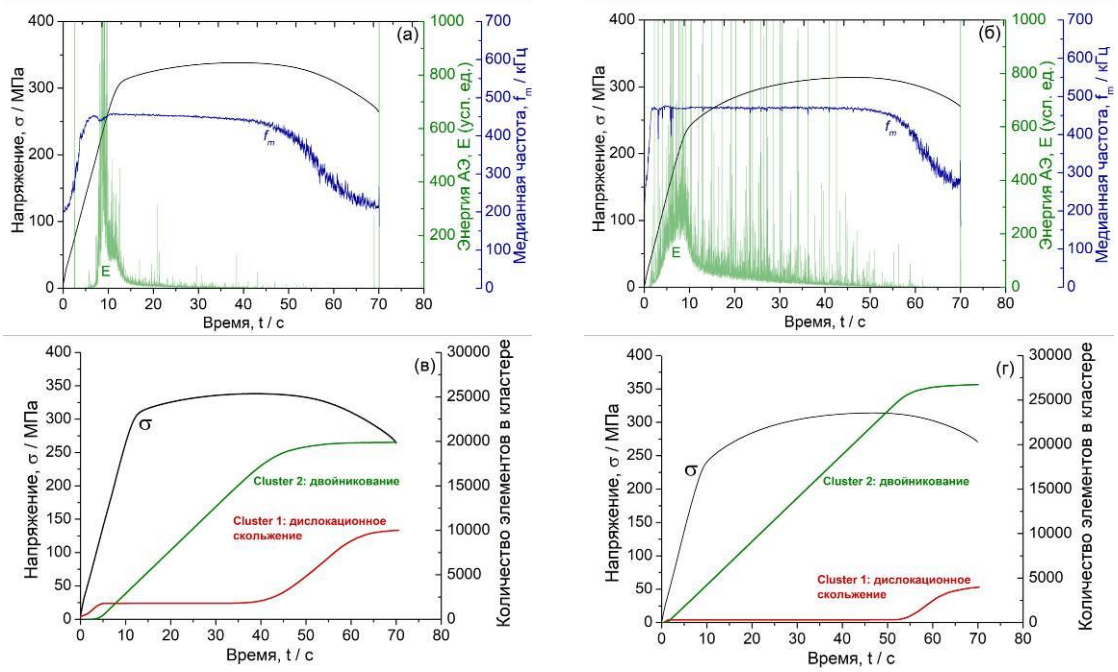


Рис. 1. Диаграммы растяжения, синхронизированные с энергией *E* и медианной частотой f_m (а, б), а также результаты кластерного анализа (в, г) для образцов в исходном состоянии (а, в) и после отжига при 500°С (б, г) в среде аргона.

Заключение

Использование метода акустической эмиссии с комплексом программ для обработки сигналов, позволяет расширить понимание о процессах, протекающий в материале при нагружении, что может быть использовано в качестве экспресс оценки его состояния.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-00258)

1. Vinogradov A., Orlov D., Danyuk A., Estrin Y. Effect of grain size on the mechanisms of plastic deformation in wrought Mg–Zn–Zr alloy revealed by acoustic emission measurements // Acta Materialia. 2013. Vol. 61. № 6. P. 2044–2056.
2. Vinogradov A, Lazarev A, Linderov M, Weidner A, Biermann H. Kinetics of deformation processes in high-alloyed cast TRIP/TWIP steels determined by acoustic emission and scanning electron microscopy // Acta Materialia. 2013. V. 61. №7. P. 2434-2449.
3. Pomponi E, Vinogradov A. A real-time approach to acoustic emission clustering // Mechanical Systems and Signal Processing. 2013. №2. P. 791-804

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРОМЫШЛЕННОГО АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ НА ПРИМЕРЕ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Растегаев И.А.[1], Чугунов А.В.[2], Растегаева И.И.[1], Мерсон Д.Л.[1]

[1]ТГУ, г. Тольятти, Россия,
RastIgAev@yandex.ru
[2]ООО «Профиль», г.Тольятти, Россия

Несмотря на очевидные успехи и преимущества метод акустической эмиссии (АЭ) до сих пор находится на стадии промышленной апробации. Это значит, что ни в нормативных документах, ни в литературных источниках нет пока конкретизированных норм и требований по применению метода АЭ в каком бы то ни было направлении. Например, в отличие от других методов неразрушающего контроля нет понимания о том: какие дефекты гарантированно возможно выявить при определенной настройке АЭ аппаратуры; как настроить АЭ аппаратуру, чтобы обеспечить максимальную чувствительность поиска определенного вида дефекта; какие критерии оценки опасности источника следует использовать и какие значения эмпирических параметров и коэффициентов требуется задать для обеспечения их наибольшей эффективности и т.д. Как следствие, основным способом АЭ выявления дефектов остаются локационные данные и практически не используется потенциал АЭ критериев оценки степени опасности. Парадокс заключается в том, что многочисленные АЭ результаты, полученные многими исследователями при лабораторных испытаниях материалов до разрушения, напрямую не пригодны (не переносимы) для практической реализации метода, т.к. при АЭ контроле объект не доводят до разрушения. При этом не менее ценные результаты АЭ выявления повреждений при промышленном контроле накапливаются медленно (т.к. являются редкими событиями) и практически не афишируются (во многом из опасения конкуренции или сокрытия информации о реальном техническом состоянии оборудования), что существенно сдерживает развитие и становление, как самого метода АЭ, так и нормативной базы его применения. Между тем без практического установления границ работоспособности метода невозможно накопить справочные данные для классифицирования и распознавания дефектов по АЭ признакам, что в итоге не позволяет реализовать имеющийся у метода АЭ высокий потенциал для организации адекватного и надежного контроля промышленных объектов.

Для решения обозначенной проблемы предлагается следующий комплексный подход обработки данных промышленного АЭ контроля: (i) При обнаружении дефекта проводится его описание и измерение с применением других методов неразрушающего и разрушающего (при возможности) контроля. (ii) Измерение АЭ ДО и ПОСЛЕ устранения дефекта (если ремонт с применением сварки, то АЭ записывается после предварительного нагружения объекта с целью снятия внутренних напряжений). Для обеспечения безопасности АЭ измерений на дефектном объекте испытательное давление не должно превышать рабочее более чем на 10%. (iii) Фильтрации помех и выделение АЭ, принадлежащей дефекту (дефектной области) или АЭ зарегистрированной с минимальными искажениями (ближайшей антенной группой или преобразователем АЭ). При возможности параметры АЭ приводятся к источнику (учет затухания и трансформации АЭ сигналов). (iv) Далее, с использованием всех полученных АЭ данных и данных выделенной АЭ от источника с минимальными искажениями раздельно проводится классификация и анализ динамики развития

дефекта за время испытания с использованием набора (нескольких) критериев, минимально регламентируемых ПБ 03-593-03, а именно: амплитудного, интегрального, локально-динамического, интегрально-динамического и MONPAC. При этом первоначально при оценке степени опасности устанавливаются известные (рекомендуемые) значения для всех эмпирических и настроечных коэффициентов и параметров. (v) Если дефект при использовании рекомендуемых значений эмпирических и настроечных коэффициентов не проявляется, то проводится подбор их величин до тех пор, пока по АЭ данным источник не будет отнесен к III классу опасности (обязательный для проверки другими методами неразрушающего контроля).

Из описания видно, что предлагаемый подход мало чем отличается от традиционной схемы проведения производственных работ, а его особенности, фигурирующие в п.п. ii, iv и v, позволяют выделить АЭ, генерируемую дефектной зоной, и провести оценку границ чувствительности (применимости) метода в каждом случае обнаружения дефекта подтвержденным другими методами контроля по всем полученным АЭ данным и АЭ выделенной дефектной зоной. Кроме этого, немаловажным фактором является наличие в АЭ системах возможности обработки данных в расширенном режиме изменения настроечных параметров (т.е. помимо автоматического следует реализовать ручной режим настройки алгоритма работы АЭ критериев). Последнее позволит в кратчайшие сроки проводить подобные исследования и получать требуемые результаты. В настоящей работе АЭ данные выгружались в текстовом формате и обрабатывались в пакетах Excel и Octave, что заняло достаточно длительное время.

Указанный подход апробирован при анализе АЭ данных, полученных при испытании подогревателя бутана газофракционирующей установки нефтеперерабатывающего завода с коррозионным растрескиванием сварного соединения приварки штуцера с внутренней стороны. Подогреватель представлял собой горизонтальный цилиндрический сосуд ø2,0×7,2 м с эллиптическими днищами. Корпус подогревателя изготовлен из листовой стали ВСт3 толщиной 20 мм. Сначала дефект был обнаружен при проведении внутреннего осмотра, а затем дважды был проведен АЭ контроль (ДО и ПОСЛЕ ремонта дефекта) при испытании сосуда при сниженном значении пробного давления и выделена АЭ, связанная с дефектом. Оказалось, что дефект генерирует АЭ невысокой активности и амплитуды и с высокой степенью вероятности он мог быть пропущен при АЭ контроле с применением рекомендуемых значений эмпирических коэффициентов АЭ критериев. Поэтому был проведен поиск таких значений эмпирических и настроечных параметров АЭ критериев, при которых по массиву АЭ данных дефект устойчиво соответствовал III классу. В результате, для дефекта в виде коррозионного растрескивания металла, находящегося на ранней стадии развития, установлены следующие величины эмпирических параметров (обозначения по ПБ 03-593-03): амплитудный ($B_1 = B_2 = 1$; At = 46,5 дБ); интегральный (k = 20; K = 80; w = 0,25); интегрально-динамический (граница между рангом 1 и 2: lg$E$ = 10,5; lg$C$ = 3); MONPAC ($N–K$ = 5). Локально-динамический критерий рассматривался в вариации применения МР-204-86, при которой было получено максимальное значение m = 5,9.

Учитывая, что оборудование химических, нефте- и газоперерабатывающих производств в большинстве случаев является типовым, есть все основания полагать, что при использовании установленных значений эмпирических коэффициентов коррозионное растрескивание может быть выявлено на подобном оборудовании соответствующими АЭ критериями, а предложенный подход может быть рекомендован для дальнейшего накопления аналогичных данных.

СТАНДАРТЫ ПО КОНТРОЛЮ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Сагайдак А.И.

АО НИЦ «Строительство», Москва, Россия,
sagaidak-niizhb@mail.ru

.

В 2019 году Международной организацией по стандартизации (ISO) разработала три новых стандарта:

- Стандарт ISO 16836 Контроль неразрушающий. Акустико-эмиссионный контроль технического состояния. Метод измерения сигналов АЭ в бетоне [1];
- Стандарт ISO 16837 Контроль неразрушающий. Акустико-эмиссионный контроль технического состояния. Метод квалификационной оценки повреждений в железобетонных балках [2];
- Стандарт ISO 16838 Контроль неразрушающий. Акустико-эмиссионный контроль технического состояния. Метод классификации активных трещин в бетонных конструкциях. [3].

Областью применения данных стандартов являются методика измерения сигналов в бетоне и практические методики контроля технического состояния конструкции из бетона и железобетона методом АЭ.

Стандарт ISO 16836 устанавливает методы измерения сигналов АЭ в бетоне. Для бетона рекомендуется использовать следующие типы преобразователей:

a) Преобразователи АЭ с резонансной частотой 150 кГц для лабораторных измерений образцов небольшого размера, например, 10 см x 20 см;

b) Преобразователи АЭ с резонансной частотой 60 кГц для измерений крупных образцов, например, размерами 1 м * 1 м * 1 м.

Для серьезно поврежденных конструкций можно использовать сейсмоприемники с резонансной частотой менее 20 кГц. В стандарте приводятся рекомендации по локации источников и выборе частотного диапазона датчиков АЭ в зависимости от размеров дефекта. При мониторинге можно применить зонную локацию для идентификации участков относительного повреждённой конструкций там, где можно использовать преобразователи АЭ с резонансной частотой менее 60 кГц или сейсмоприемники с резонансной частотой менее 20 кГц при учете скорости ослабления и расстояния распространения сигнала в материалах конструкциях. Чтобы установить источники АЭ. как для участков относительного повреждения, идентифицированных с помощью зонной локации, можно применить линейную локацию, планарную локацию и трехмерную локацию источников АЭ, чтобы узнать расположение источника АЭ на линии, на поверхности и в пространстве соответственно.

Измерение сигналов АЭ в бетоне требует обеспечение надежного акустического контакта с конструкцией, например, при помощи волноводов. В данном стандарте эти рекомендации отсутствуют. Также отсутствуют рекомендации по измерению АЭ в бетонах при высокой температуре (до плюс 800^0C) и измерение сигналов АЭ твердеющего бетона.

Несмотря на отличное название, коэффициент нагрузки, является коэффициентом Фелисити. Значение коэффициента, превышающее единицу, свидетельствует о структурной стабильности материала. Значение коэффициента нагрузки меньше единицы, означает, что АЭ активность при повторном нагружении возникает до до-

стижения величины предыдущей нагрузки, что в свою очередь свидетельствует о повреждении структуры исследуемого материала.

Наличие АЭ активности в течение цикла разгрузки указывается на структурную нестабильность. Использование коэффициента нагрузки и коэффициента разгрузки позволяет проводить классификацию степени повреждений на незначительные, промежуточные и значительные.

Стандарт ISO 16838 определяет метод испытания для классификации активных трещин в железобетонных конструкциях. В данном стандарте разработан метод испытания для классификации активных трещин. Стандарт позволяет проводить классификацию трещин на два типа: поперечные трещины (трещины растяжения) и наклонные трещины (трещины сдвига) на основании параметров АЭ сигналов, зарегистрированных при испытании бетонных и железобетонных балок.

Практическое применение положений данных стандартов приводится в [4-7].

1. ISO 16836:2019 Non-destructive testing -- Acoustic emission testing -- Measurement method for acoustic emission signals in concrete
2. ISO 16837:2019 Non-destructive testing -- Acoustic emission testing -- Test method for damage qualification of reinforced concrete beams.
3. ISO 16838:2019 Non-destructive testing -- Acoustic emission testing -- Test method for classification of active cracks in concrete structures
4. В. В. Бардаков, А. И. Сагайдак, С. В. Елизаров «Акустическая эмиссия переармированных железобетонных балок» Контроль и диагностика, №9, 2019 г
5. Сагайдак А.И., Бардаков В.В, Елизаров С.В. Оценка технического состояния железобетонных балок методом акустической эмиссии
6. Ohtsu M., Uchida M., Okamoto T. and Yuyama. Damage assessment of reinforced concrete beams qualified by acoustic emission//ACI Structural Journal. 2002. 99(04). pp. 411-417.
7. Grosse C.U., Ohtsu M., eds. Acoustic emission testing. Springer, 2008

АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СЛОЖНО КОНТРОЛИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННО-КИНЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Носов В.В., Хохлова Е.Д.

Санкт-Петербургский Горный Университет, Санкт-Петербург, Россия
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Под сложно контролируемыми объектами понимается частичное или полное отсутствие возможности установки датчиков аппаратуры НК непосредственно на контролируемый объект в связи с его конструктивными, техническими, геометрическими или другими характеристиками. Такими объектами являются сосуды давления, в частности, криогенные газификаторы, служащие, для транспортировки, хранения жидкого кислорода, аргона, азота, диоксида углерода и метана. Предпочтительность использования метода акустической эмиссии (АЭ) при этом объясняется возможностью регистрации сигнала посредством установки АЭ преобразователей к патрубкам, исходящих из контролируемого внутреннего сосуда и служащих акустическими волноводами. Поскольку патрубки располагаются в разных точках сосуда и имеют различную протяжённость, возникает проблема расшифровки данных, полученных в условиях существенного влияния дестабилизирующих факторов, когда традиционные критерии опасности АЭ, основанные на регистрации числа импульсов

или амплитуды сигналов АЭ, не являются достоверными диагностическими параметрами. В связи с этим актуальной является задача разработки методики АЭ диагностирования, позволяющей исключить зависимость от дестабилизирующих факторов и обеспечить оценку остаточного ресурса.

В качестве решения предлагается информационно-кинетический подход к акустико-эмиссионному диагностированию, согласно которому АЭ контроль должен осуществляться в условиях метрологической и прочностной однородности, а ресурс длительно нагруженных материалов определяется моментом накопления критической концентрации микротрещин упругого протекающего процесса микротрещинообразования. Разделение стадии мелкодисперсного разрушения на неоднородный и однородный этапы по кинетическому признаку позволяет выделить информативный временной интервал из общего потока сигналов АЭ. Структурные элементы, отобранные по кинетическим и временным критериям подобия, представляют прочностные свойства изделия. Данный подход имеет ряд преимуществ перед традиционными методиками АЭ, выражающиеся в принципах оптимизации диагностирования [1-3].

Положенная в основу подхода многоуровневая микромеханическая модель временных зависимостей параметров АЭ подразумевает анализ как процесса разрушения, так и условия регистрации сигналов и связанных с ними дестабилизирующих факторов. При переходе между каналами регистрации вариативным является конкретный параметр модели- акустико-эмиссионный коэффициент (АЭК), зависящий от функции распределения амплитуд, содержащий в себе информацию об аддитивных помехах и нуждающийся в стабилизации. Кратковременная стабилизация в пределах одного канала за период нагружения и регистрации позволяет при соответствующей математической обработке результатов регистрации освободиться от влияния АЭК, как от неопределенной величины. Таким образом, из временной зависимости числа импульсов АЭ на этапе прогностического однородного разрушения, регистрируемой при равномерном диагностическом нагружении объекта контроля, вытекают информативные концентрационно-кинетические АЭ показатели прочности, свободные от АЭК и потому устойчивые к влиянию помех и дестабилизирующих факторов, что создает благоприятные условия для диагностики. Достоверность оценки ресурса обеспечивает также наличие в модели устойчивого параметра, определяемого по макроскопическим данным прочностных усталостных испытаний и обоснованного стабильностью величин, характеризующих атомно-молекулярную структуру материала. Всё это снимает неопределенность модели, что обеспечивает её эффективное использование.

Таким образом, применение информационно-кинетического подхода АЭ позволяет сократить влияние факторов различного масштабного уровня на регистрацию сигналов материала, что стабилизирует и оптимизирует контроль и эффективно используется при диагностике объектов в условиях ограниченной контролепригодности.

1. Носов В.В. Методика определения информативных параметров акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1998. № 5. С.92–98. 5.
2. Носов В.В., Номинас С.В., Зеленский Н.А. Оценка прочности сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии// Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2(219)’ 2015. С. 182-190.
3. Носов В.В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов // Дефектоскопия, № 7, 2016, с. 52-67

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОТРЕЩИН И КРИТЕРИЙ ПЕРЕХОДА ДЕФОРМИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ В КРИТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ

Дамаскинская[1] Е.Е., Гиляров[1] В.Л., Пантелеев[2] И.А., Корост[3] Д.В., Фролов[1] Д.И.

[1] *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, Пермь, Россия*
[3] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
Kat.Dama@mail.ioffe.ru

Целью наших исследований является поиск индикаторов (признаков), позволяющих оценить степень критичности состояния механически нагруженных гетерогенных материалов. Безопасное (неопасное) состояние означает, что образование новых дефектов не приводит к изменению прочности материала. Опасное состояние означает, что сформировалась локальная дефектная структура, лавинообразное развитие которой приведет к катастрофическому разрушению. Для решения поставленной задачи использовался подход, основанный на теории хаоса и концепции самоорганизованной критичности.

Накопление дефектов в образцах различных материалов (монокристаллический кварц, гранит, песчаник) при одноосном сжатии было изучено с помощью акустической эмиссии (АЭ) и рентгеновской компьютерной микротомографии (КТ). Такая постановка экспериментов позволила нам контролировать эволюцию дефектной структуры (образование и развитие микротрещин) и сопоставить ее с параметрами сигналов АЭ. На основе анализа томографических срезов построены 3D-изображения внутренней структуры образцов. Было обнаружено, что тип распределения сигналов АЭ по энергии может использоваться в качестве индикатора состояния нагруженного материала. Экспоненциальный вид энергетического распределения указывает на некритическое состояние; степенной - указывает на то, что процесс накопления дефектов перешел в опасную стадию. Эта особенность может быть использована в качестве основы для нового метода неразрушающего контроля, который позволит выявить «опасные» (требующие замены или ремонта) пространственные области объектов (сооружений, трубопроводов и т. д.).

Кроме того, проведен мультифрактальный анализ интервалов между сигналами АЭ в процессе деформирования. Построены изменения коэффициента Hürst и ширины спектра сингулярности в зависимости от времени. Обнаружены следующие особенности: при приближении к моменту разрушения коэффициент Hürst становится больше, а ширина спектра - уже. Сделан вывод о том, что фрактальное самоорганизующееся состояние формируется до разрушения, т. е. природа процесса изменяется от более сложной мультифрактальной к более простой монофрактальной. Анализ энергетических распределений сигналов АЭ позволил выделить принципиально разные этапы роста магистральной трещины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 19-05-00248).

ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ И АНАЛИЗУ СИГНАЛОВ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИЙ

Сенкевич Ю.И.

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР ДВО РАН), с. Паратунка, Россия

ИКИР ДВО РАН проводит исследования по поиску маркеров в сигналах геоакустической эмиссии (ГАЭ) и электромагнитной эмиссии (ЭМЭ), которые опосредовано отражают характеристики процессов, происходящих в приповерхностном слое литосферы и в приземном слое атмосферы, соответственно. Сигналы ГАЭ представляют собой упругие колебания, возникающие в процессе локальной динамической перестройки внутренней структуры приповерхностных осадочных пород, которые характеризуются малой прочностью и высокой пластичностью. В них акустическая эмиссия возникает даже при слабых деформационных изменениях, соизмеримых по уровню с приливными. Источниками ЭМЭ являются: атмосфера (грозовые очаги), магнитосфера, потоки низко энергетических частиц неустойчивых к возбуждению волн вблизи нижнего гибридного резонанса на высотах нижней ионосферы. Как ГАЭ, так и ЭМЭ представляют потоки разномасштабных по длительности (от сотен микросекунд до десятков миллисекунд) потоки импульсов с различной формы с широким динамическим диапазоном амплитуд. Наиболее известные работы, касающиеся поиска предвестников сейсмических событий на основе названных геофизических сигналов, ограничены анализом энергетических характеристик названных сигналов с использованием спектральных и корреляционных методов, которые не показали устойчивых связей с искомыми событиями [1,2]. В представляемом исследовании предпринята попытка рассмотреть потоки импульсов с позиции теории информации, как закодированные сообщения, и постараться выявить определенные закономерности в последовательностях кодовых символов. Для трансформации каждого отдельного импульса в потоке его паттерн описывается отношениями значений локальных экстремумов между собой по правилу: если $x_i > x_{i+j}$ $i,j = 1,...N$, то результат сравнения равен 1, если иначе, то - 0, где $\{x_i\}$ - множество локальных экстремумов принадлежащих конкретному импульсу. На основании результатов сравнения формируется квадратная бинарная матрица отношений амплитуд. Для учета фазовых отношений внутри импульса, измеряются временные интервалы между его локальными экстремумами, которые сравниваются между собой аналогично правилу сравнения амплитуд экстремумов. На основании результатов сравнения также формируется квадратная матрица. Обе матрицы информационно избыточны, поскольку они кососимметричны. Обнуляя избыточные элементы, превращаем первую матрицу в вернетреугольную, а вторую в нижнетреугольную. Дополняя вторую матрицу дополнительной нулевой строкой и столбцом, получаем равно размерные матрицы. Складывая обе матрицы, получаем результирующую бинарную матрицу - шаблон, которая сохраняет в себе информацию амплитудно-фазовых отношений внутри импульса, и полноценно характеризует структурную морфологию его паттерна. Далее на заданной эпохе анализа осуществляется поиск матриц - шаблонов, которые по критерию сходства, построенному на значении пересечения множеств элементов матриц, формируются кластеры. В каждом из автоматически сформированных кластеров матрица-шаблон наиболее близкая к центру кластера принимается назначается символом, а совокупность выделенных символов составляет алфавит за

эпоху наблюдения. Исходный сигнал переписывается в символах алфавита. Полученная последовательность рассматривается как закодированное сообщение.

Структурно-лингвистическая обработка и анализ сообщений [3,4] проводится по двум направлениям. Первое - оценка изменения состава и статистики символов алфавитов в разных по размеру временных окнах анализа. Наличие значительных приращений состава алфавита указывает на изменения, происходящие в порождающей сигнал ГАЭ среды и изменение условий распространения электромагнитных волн в приповерхностном слое атмосферы.

Второе направление анализа осуществляется с использованием энтропийного анализа сообщений [5]. Вычисление относительной энтропии на равноотстоящих временных интервалах наблюдения позволили отследить изменения функции распределения вероятностей импульсной активности. Расчеты значений условной энтропии дали возможность оценить наличие связи между аномалиями ГАЭ и ЭМЭ.

Сопоставление обнаруженных отклонений по результатам лингвистического анализа с каталогом землетрясений Камчатского региона привело к формированию вероятностных маркеров сейсмических событий.

В результате исследования удалось разработать методологию лингвистической обработки и анализа импульсных потоков сигналов ГАЭ и ЭМЭ. Применение информационного подхода к анализу геофизических сигналов позволило глубже изучить физическую природу их связи с сейсмическими событиями, получить ряд новых признаков смены состояний среды распространения ГАЭ и ЭМЭ.

Разработанные алгоритмы структурно-лингвистической обработка и анализа сообщений реализованы в программно-аппаратном комплексе, собранном в ходе выполнения задания по гранту РНФ 18-11-00087. Комплекс обеспечивает обработку и анализ потоков импульсных сигналов, поступающих с приемников полевых станций наблюдения в реальном времени. Результаты анализа обеспечивают своевременную выработку решений о возникновении очередных сейсмических явлений в пределах ближней зоны сейсмической активности на Камчатке в радиусе до 600 км от полевой станции приема сигналов ГАЭ и ЭМЭ Карымшино ИКИР ДВО РАН.

1. Дружин Г.И., Марапулец Ю.В., Чернева Н.В., Исаев А.Ю., Солодчук А.А. Акустические и электромагнитные излучения перед землетрясением на Камчатке // Доклады академии наук. 2017. Т. 472. №5. С. 584-589.
2. Дружин Г.И., Марапулец Ю.В., Чернева Н.В., Исаев А.Ю., Солодчук А.А. Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатка, Россия
3. Senkevich Yu.I , Duke V.A., Mishchenko M.A., Solodchuk A.A. Information approach to the analysis of acoustic and electromagnetic signals // E3S Web of Conferences. 2017. Vol. 20. 02012. 9 p.
4. Сенкевич, Ю. И., Марапулец, Ю. В., Луковенкова, О. О., Солодчук, А. А. Методика выделения информативных признаков в сигналах геоакустической эмиссии. // Труды СПИИРАН, 2019, 18(5), 1066-1092.
5. Цветков О.В. Энтропийный анализ данных в физике, биологии и технике. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 202 с.

ДОСТОВЕРНОСТЬ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Мисейко А.Н.

ООО «НТЦ «ЭгидА», г. Москва, Россия,
miseyko-an@yandex.ru

Важнейшим показателем, определяющим эффективность любого метода контроля, является его достоверность. Под достоверностью результатов акустико-эмиссионного (АЭ) контроля следует понимать вероятность принятия безошибочных решений по наличию/отсутствию источников АЭ различных классов опасности в контролируемом объекте. При принятии таких решений могут возникать ошибки двух видов: перебраковка и недобраковка. Перебраковка возникает в случае, если выявленному источнику АЭ присвоен класс более высокий, чем он имеет в действительности или если выявлен источник, в действительности являющийся ложным. Недобраковка возникает в случае, если выявленному источнику АЭ присвоен класс более низкий, чем он имеет в действительности или если не выявлен источник АЭ, который мог бы быть выявлен при проведении АЭ-контроля объекта.

Оценка достоверности АЭ-контроля для подземных участков магистральных трубопроводов (МТ) имеет особое значение, поскольку перебраковка влечет за собой лишние затраты на подготовку и проведение дополнительного контроля, а недобраковка может привести к техногенной катастрофе.

При решении задачи оценки достоверности АЭ-контроля МТ приходится сталкиваться со следующими проблемами:

- сложность точного воспроизведения одинаковых условий на объекте для соблюдения репрезентативности АЭ-контроля и корректной оценки достоверности его результатов;
- сложность различения сигналов АЭ, зарегистрированных от близко расположенных дефектов и воспринимаемых как один источник АЭ;
- зависимость результатов классификации источников АЭ от выбора конкретного критерия оценки технического состояния объекта;
- значительные ограничения в выборе образцовых методов (при оценке достоверности АЭ-контроля по альтернативному признаку);
- ограниченные возможности в проведении экспериментальной оценки достоверности АЭ-контроля на натурных объектах.

Достоверность результатов АЭ-контроля МТ складывается, по большому счету, из двух составляющих: достоверности определения степени опасности (класса) выявляемых источников АЭ и достоверности определения их местоположения (локализации). Достоверность определения класса источника АЭ зависит от вида, величины и скорости нагружения МТ, надежности выявления сигналов АЭ на фоне помех, точности измерения параметров сигналов АЭ, правильности выбора критериев оценки технического состояния МТ и проведения расчетов в соответствии с выбранными критериями. Достоверность определения местоположения источника АЭ определяется метрологическими характеристиками используемых технических средств АЭ-контроля, точностью задания расстояний между преобразователями АЭ и скоростей распространения акустических волн, погрешностью времён регистрации сигналов АЭ, правильностью выбора алгоритмов локации и точностью проведения расчетов в соответствии с выбранными алгоритмами.

Достоверность АЭ-контроля МТ, в принципе, может быть оценена 2 способами: по количественному и альтернативному признакам.

Оценка достоверности АЭ-контроля по количественному признаку связана с необходимостью определения условной границы деления участков МТ на годные и негодные и нахождения ошибок 1-го и 2-го рода. Для такой оценки достоверности необходимо знать вид распределения источников АЭ на участках МТ и оперативную характеристику контроля L(x) или её разновидность – функцию выявляемости дефектов $W(x) = 1 - L(x)$. Очевидно, что данный способ сложно реализуем и малоприменим на практике.

Оценка достоверности АЭ-контроля по альтернативному признаку реализуется намного проще и эффективнее. В этом случае производится сравнение метода АЭ с образцовым методом и используется матрица сравнительной достоверности методов:

Число проконтролированных элементов $n_\Sigma = n_г + n_н + n_\alpha + n_\beta$		**Образцовый метод**	
		Годные	**Негодные**
Пробный метод (АЭ)	Годные	Дважды годные $n_г$	Недобраковка n_β
	Негодные	Перебраковка n_α	Дважды негодные $n_н$

Возможны 4 варианта сочетаний принятия решений: $n_г$, $n_н$, n_α и n_β. Несовпадающим сочетаниям n_α и n_β соответствует перебраковка и недобраковка. Достоверность АЭ-контроля МТ может быть определена по формулам:

$$Д_\alpha = (n_\Sigma - n_\alpha) / n_\Sigma = 1 - n_\alpha / n_\Sigma.$$
$$Д_\beta = (n_\Sigma - n_\beta) / n_\Sigma = 1 - n_\beta / n_\Sigma.$$
$$Д_\Sigma = (n_\Sigma - n_\alpha - n_\beta) / n_\Sigma = 1 - (n_\alpha + n_\beta) / n_\Sigma.$$

где показатель $Д_\alpha$ учитывает перебраковку, $Д_\beta$ – недобраковку; $Д_\Sigma$ – как перебраковку, так и недобраковку (при использовании $Д_\Sigma$ принимают, что ошибки, связанные с недобраковкой и перебраковкой, равноценны (критерий идеального наблюдателя), на практике же недобраковка опаснее перебраковки).

В докладе приводятся оценки достоверности результатов АЭ-контроля МТ по альтернативному признаку на основе данных, полученных при диагностировании нескольких протяженных участков линейной части магистрального нефтепровода «Омск-Иркутск». Технические характеристики МТ: наружный диаметр – 720 мм; толщина стенки – от 8 до 12 мм; тип прокладки – подземная; марки стали – 19Г, 17Г1С, XWT. Условия проведения АЭ-контроля: тип преобразователей – ДР6И (резонансные); порог амплитудной дискриминации – 28 дБ; расстояние между преобразователями – от 40 до 90 м; рабочая полоса частот – от 10 до 300 кГц; режим нагружения – от 3,2 до 4,0 МПа. Всего проведена оценка достоверности выявления более 100 источников АЭ 2 класса. В качестве эталонного метода использовался ультразвуковой эхо-метод. Установлено, что достоверность АЭ-контроля МТ повышается при уменьшении расстояния между преобразователями и увеличении разницы между величиной рабочего и испытательного давлений.

АЭ КОНТРОЛЬ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Бардаков В.В.[1], Елизаров С.В.[1], Барат В.А.[1], Харебов В.Г.[2], Медведев К.А.[2], Терентьев Д.А.[1]

[1] *ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ», Москва, Россия,*
bardakovvv@interunis-it.ru
[2] *НТЦ ЭГИДА, Москва, Россия*

Введение

Энергетическая отрасль является одной из важнейших в промышленности, так как обеспечивает подачу тепловой и электроэнергии. Основным источником производства энергии в данной отрасли являются тепло-электро централи (ТЭЦ), которые объединяют в себе большое количество единиц объектов, участвующих в ее работе на различных этапах. Для обеспечения работы ТЭЦ в бесперебойном режиме, возникает необходимость в оценке технического состояния ее объектов в режиме эксплуатации.

Основные результаты

Данная работа объединяет результаты комплексного акустико-эмиссионного (АЭ) контроля, проводимого на объектах энергетического оборудования ТЭЦ. В частности описываются подходы к контролю трубопроводов в процессе гидроиспытаний, представлены методики контроля герметичности запорной арматуры, контроля частичных разрядов возникающих в изоляции силовых трансформаторов, показаны результаты исследования по применению АЭ мониторинга железобетонных опор колон градирен, а также результаты испытания по оценке возможности выявления присосов вакуумного оборудования.

Обсуждение результатов

АЭ контроль трубопроводов в процессе эксплуатации

АЭ контроль трубопроводов в процессе гидроиспытаний является типовой задачей, решаемой при помощи метода АЭ. Для упрощения процедуры контроля протяженных объектов, таких как трубопроводы, рассматривается использование систем с последовательным цифровым каналом передачи данных. Использование последовательного соединения модулей позволяет сократить трудозатраты на монтаж/демонтаж системы, а также увеличить дистанцию контроля за 1 цикл нагружения, а использование цифрового канала передачи данных сделать систему максимально защищенной от влияния электромагнитных наводок.

АЭ контроль герметичности запорной арматуры

В качестве примера контроля герметичности запорной арматуры, рассматривается автоматическая функция контроля герметичности и величины утечки, реализованная в двухканальном портативном приборе UNISCOPE, производства компании «ИНТЕРЮНИС-ИТ». Данная функция позволяет определять герметичность/негерметичность арматуры, а также величину утечки, в случае, если арматура негерметична. При этом время контроля зависит от диаметра арматуры и занимает от 1 до 15 мин, с учетом процесса подготовки.

АЭ контроль изоляции силовых трансформаторов

На основании сравнительного анализа АЭ данных, зарегистрированных при контроле двух трансорматоров (бездефектного и с дефектом изоляции) показана возможность выявления импульсов АЭ от ЧР и фильтрации шумов, по синхронизации их появления с частотой питающей сети. Помимо этого демонстрируются локационные возможности метода АЭ, применительно к контролю изоляции обмоток силовых трансформаторов. По результатам работ, было определено положения АЭ источника, соответствующего ЧР из-за дефекта изоляции трансформатора.

АЭ контроль железобетонных опор колонн градирен

Были проведены исследования с целью оценки возможности осуществления мониторинга опор колонн градирен методом АЭ. В качестве объектов использовались три колонны с различным уровнем повреждений. Сбор данных осуществлялся в течение перехода день-ночь, ночь-день, который использовался с целью температурного нагружения. По результатам анализа полученных данных была выделена взаимосвязь между АЭ данными и уровнем повреждения колонны. Также была подтверждена возможность мониторинга.

Обнаружение присосов вакуумного оборудования

Были проведены исследования по оценке возможности обнаружению присосов возникающих в вакуумном оборудовании методом АЭ. Имитация присосов проводилась на вакуумном оборудовании. По результатам экспериментальных исследований были выделены характеристики АЭ сигналов в частотной области, соответствующих дефекту типа присос, в сравнении с шумовыми сигналами.

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

Кузьмин А.Н., Жуков А.В.

ООО «Стратегия НК»,
Екатеринбург, Россия

Разработка интегральных способов определения напряженно-деформированного состояния (НДС) оборудования предприятий нефте- и газопереработки является актуальной задачей. Известно, что расчетно-аналитические способы оценки НДС не способны учесть все нагрузки и воздействия, которым подвергается в процессе эксплуатации металлические узлы и элементы промышленных установок. Вместе с тем существующие практические способы оценки НДС на натурном объекте контроля носят локальный, избирательный характер и также не в полной мере отвечают задачам выявления очагов предельного прочностного состояния металла и последующего предотвращения наступления аварийных отказов оборудования. Существенным фактором разрушения силовых элементов технологических установок является дополнительный локальный изгиб конструкции, особенно в условиях внешних нескомпенсированных нагрузок, изменения внутреннего рабочего давления и температуры. Целью настоящей работы являлось практическое обоснование возможности использования метода акустико-эмиссионного контроля для оценки НДС

участков локальных деформаций металлоконструкций широкого спектра назначения. Известно, что уровни напряжений на локальных участках трубопроводов в процессе эксплуатации могут достигать значений пределов текучести материала и переходить в область пластических деформаций с сопутствующим образованием трещиноподобных дефектов. Изучен и представлен характер сигнала акустической эмиссии в зонах возникновения таких предельных напряжений. Показано, что акустическая эмиссия несет информацию о наступлении предельных нагрузок материала - критических значениях НДС, где запас прочности конструкции стремится к предельным значениям. Предложен эффективный способ интегральной оценки НДС объектов нефте- и газопереработки с применением метода АЭ, который может быть применен в процессе как периодического контроля, так и в условиях мониторинга их технического состояния.

ВОЗМОЖНОСТИ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗНОСА ПАР ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Растегаева И.И.[1], Растегаев И.А.[1], Мерсон Д.Л.[1]

ТГУ, г. Тольятти, Россия,
RastIgAev@yandex.ru

Метод акустической эмиссии (АЭ) один из немногих методов неразрушающего контроля, позволяющий проводить on-line мониторинг и контроль узлов трения. Однако наличие при трении и изнашивании множества источников АЭ и их случайный характер приводят к трудностям выделения и классификации «полезных» сигналов, что препятствует решению обратной, наиболее важной для практики задачи: установление по сигналам АЭ инициирующие их источники в реальном времени. Поэтому без решения вопросов организации обработки и анализа АЭ данных невозможно в полной мере использовать заложенный в методе АЭ потенциал для решения трибологических задач. Таким образом разработка новых и совершенствование имеющихся подходов к обработке акустических сигналов, регистрируемых при трибологических испытаниях, которые позволили бы идентифицировать источники АЭ по их физической природе происхождения, является актуальной задачей. Целью настоящей работы является апробация и повышение эффективности алгоритмов обработки АЭ данных при оценке разрушения контактирующих и смазочных материалов узлов трения скольжения за счет применения спектрально-временного подхода анализа АЭ.

Алгоритм спектрально-временного подхода строится на следующих постулатах:

- при формировании одинаковых условий трения и изнашивания действуют одинаковые механизмы разрушения или повреждения контактирующих материалов (источники АЭ);
- единые по природе источники и процессы генерируют сигналы АЭ со схожим спектральным составом;
- количество возможных одновременно действующих механизмов повреждения/разрушения ограничено, и они развиваются стадийно и циклически (например, разогрев-схватывание-отрыв или резание-окисление-скол окисла и т.д.) в нескольких местах по площади контакта;

- в силу свойства интегральности АЭ излучение в каждый момент времени отражает одно или несколько основных (доминирующих) механизмов повреждения/разрушения, масштаб действия (мощность) которых превалирует над всеми остальными (на основании принципа суперпозиции).

Таким образом, данные о степени схожести спектральных характеристик АЭ и времени их регистрации могут быть использованы для поиска источников АЭ, имеющих общее физическое происхождение в различные моменты работы трибоузла. В результате выполнения акустических исследований, итоги которых докладывались на АПМАЭ-2018 [1], была найдена эффективная схема обработки шумоподобной АЭ, кратко заключающаяся в сочетании применения алгоритма спектрального вычитания шума узла трения с алгоритмом кластеризации сигналов АЭ по подобию формы кривой их спектральной плотности. В настоящей работе приводятся результаты ее практической апробации для оценки разрушения контактирующих и смазочных материалов по данным АЭ, полученной при типовых трибологических испытаниях и исследованиях по схемам: ASTM D2596, ASTM D2783, ASTM G99 и ASTM G77.

Апробация предлагаемого подхода на реальных АЭ данных показала, что обозначенная цель легко достигается, если в узле трения изнашивается только один (наиболее мягкий) материал, например, баббитовый слой в подшипниках скольжения. Если тела в узле трения равной твердости и происходит их взаимный износ, то прежде, чем использовать результаты испытаний, требуется применение специальных приемов для разделения АЭ, исходящей от сопрягаемых материалов. В любом случае результаты апробации показали, что предложенный подход является эффективной схемой обработки АЭ данных в следующих направлениях применения:

1). Он-лайн мониторинг и корректировка режима работы узла трения;
2). Восстановление хронологии процесса разрушения узла трения;
3). Арбитражный метод разрешения спорных результатов сравнительных трибологических испытаний;
4). Предфильтр в существующих и новых АЭ алгоритмах измерения износа узлов трения скольжения;
5). Ускорение и сокращение себестоимости трибологических испытаний.

Полученные результаты также дают все основания полагать, что полученный результат может быть перенесен и на другие сферы применения метода АЭ, где преимущественно регистрируется акустическая эмиссия непрерывного (шумоподобного) вида или при небольшом отношении сигнал/шум (трибологические, аэро/гидродинамические, коррозионные, электромагнитные и др. явления). Положительный эффект достигается тем, что предложенный спектрально-временной подход анализа АЭ данных позволяет существенно повысить информативность применения метода АЭ сразу в нескольких направлениях: установить время начала, длительность и последовательность действия механизмов разрушения каждого вида, причем, даже при параллельном их сосуществовании. Дальнейшее развитие предложенного подхода представляется в оптимизации и упрощении примененных алгоритмов с целью значительного снижения временных и аппаратных ресурсов.

1. Растегаев И.А., Мерсон Д.Л., Растегаева И.И. Подходы к анализу шумоподобной акустической эмиссии при беспороговом режиме ее регистрации / Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (28 мая – 01 июня 2018): сборник материалов. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2018. – с. 103-104.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ

Григорьев Е.В.[a], Носов В.В.[a,b]

[a] *Санкт-Петербургский Горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[b] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия*
[a] arshavin58@mail.ru, [b] nosovvv@list.ru

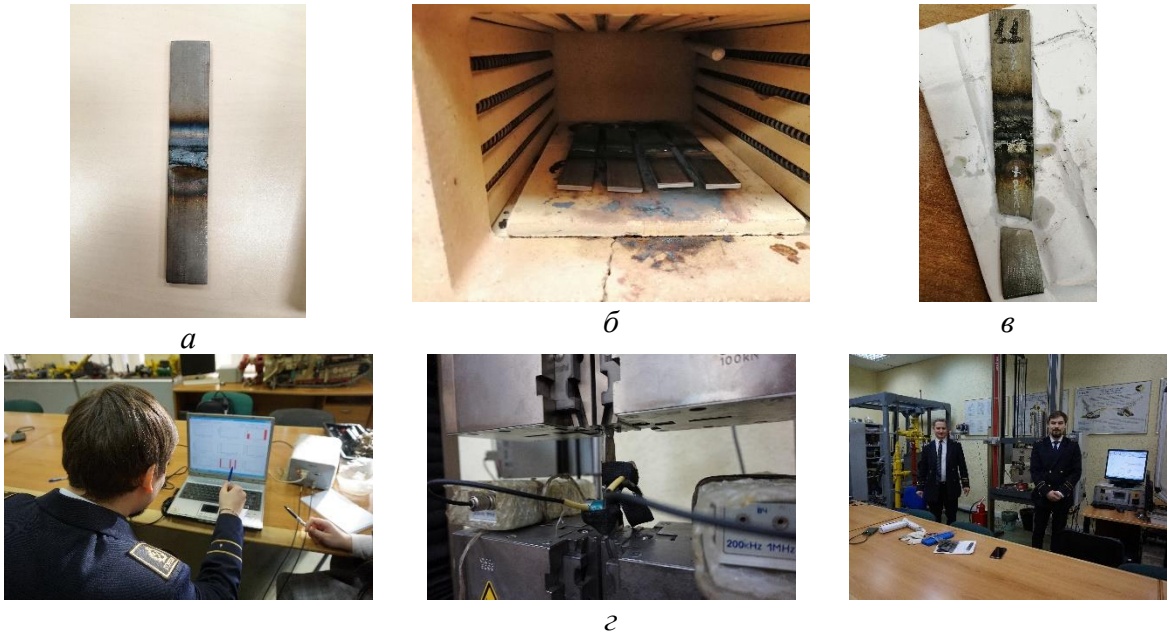
В связи с предъявлением высоких требований к эффективности использования и надежности технических устройств, разрабатываются и применяются новые материалы и технологии, улучшающие качество изготавливаемых из них изделий.

В частности, в промышленности получили распространение различные упрочняющие технологии, позволяющие формировать на поверхности изделий покрытия или слои, отличающиеся повышенными эксплуатационными характеристиками. Некоторые способы могут воздействовать на весь объем изделия, то есть, упрочнять его внутреннюю структуру. Существует большое разнообразие методов упрочняющей обработки металлов, разработанных к настоящему времени [1]. Имеются как традиционные, хорошо освоенные технологии, так и принципиально новые технологии (ультразвуковые, лазерные, электрофизические, электронно-лучевые, импульсные и др.), позволяющие получать тонкие покрытия (или слои) на самых различных материалах или воздействовать на весь объем изделия. В связи с разнообразием технологий, их применение не всегда обосновано, что делает актуальным необходимость проверять на целесообразность их применения и качество получаемых образцов. Критерием оценки качества технологий должна является степень упрочнения, что не всегда принимается во внимание.

Существующие методы оценки качества упрочняющих технологий можно классифицировать с точки зрения вида контролируемого сигнала и связи его с процессами, определяющими прочность материала. Сигналы, регистрируемые методами прохождения и отражения вводимых извне волн, связаны с прочностью и процессом роста повреждений неоднозначно, поскольку упускают нано-масштабные факторы из-за огибания волнами прочностных аномалий. Перспективными здесь являются методы излучения, так как испускают волны, которые связаны с процессом повреждения материала. Это электромагнитная и акустическая эмиссии (АЭ).

Основная проблема прочностного АЭ контроля связана со сложностью интерпретации и количественного увязывания результатов регистрации сигналов АЭ с характеристиками прочности. В данной работе предлагается информационно-кинетический подход [2], который опирается на многоуровневую модель, связывающую параметры АЭ и определяющих прочность процессов. Прочность образца определяется интенсивностью разрушения структурных элементов на этапе однородного разрушения, параметры модели позволяют связать диагностические параметры с ресурсом изделия. Данный подход показал высокую информативность для оценки состояния сварных соединений и изготовленных с их применением сосудов давления, глубоководных аппаратов, сложно нагруженных металлоконструкций, изделий из композиционных материалов и на других промышленных объектах [3] и был применён для оценки эффективности технологий, упрочняющих сварные соединения. Образцы сварных соединений подвергались растяжению до разрыва на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100. Сварные соединения изготав-

ливались по ГОСТ 1497-84 из конструкционной низкоуглеродистой стали 3, с помощью полуавтоматической сварки и обработанные различными методами упрочнения. В число таких методов (рис. 1) вошли термообработка (высокий отпуск), ультразвуковая ударная обработка [4] и особенности, связанные со сваркой (наличие кромок с 2-х сторон).



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Проведение испытаний. *а* – образец, *б* – печь для термообработки, *в* – разрушенный образец, *г* – процесс проведения исследований

Испытания проводились до полного разрушения материала, в процессе которого регистрировалась акустическая эмиссия. Обработка результатов регистрации на этапе упругого нагружения и показали, что наиболее прочными образцы получались после термообработки, далее ультразвуковая обработка шва, и наличие фаски. Полученные результаты согласуются с результатами циклических разрушающих испытаний, описанными в диссертации [5] и могут быть применены на реальном объекте.

Список литературы

1. Колмыков Д.В., Катенев В.В., Косинов Е.А. О методах упрочняющей обработки стальных изделий // Auditorium. Электронный научный журнал Курского государственного университета. № 4 (12). – 2016.
2. Носов В.В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов // Дефектоскопия, № 7, 2016, С. 52-67.
3. Носов В.В. Потапов А.И. Акустико-эмиссионный контроль прочности сложно нагруженных металлоконструкций // Дефектоскопия, № 1, 2015, С. 61-72.
4. Палаев А. Г., Потапов А. И., Технология, оборудование ультразвуковой упрочняюще-финишной обработки металлов и контроль качества / Металлообработка, № 6, 2018. С 38 – 41.
5. Вержбидский К.Д. Обеспечение ресурса вертикального стального резервуара путем дополнительной обработки сварных соединений нижнего пояса. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2018 – 103 с.

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО СПОСОБА КОНТРОЛЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА

Гневко А. И., Озеров К. Г., Соловов С. Н.

ВА РВСН им. Петра Великого, г. Балашиха, РФ,
a_gnevko@mail.ru

В последнее время возобновился интерес к высококонцентрированному раствору пероксида водорода (ПВ) как достаточно эффективному ракетному топливу, что обусловлено развитием космических программ и ростом требований к их экологической безопасности. Известно, что перекись водорода разлагается на кислород и воду. Но, с другой стороны, во время цикла эксплуатации ПВ сохраняется риск её самопроизвольного необратимого разложения с выделением большого количества энергии. Эксплуатация систем с данным продуктом является особо опасной работой, при которой подвергается риску персонал и оборудование. Актуальность подобных рисков для всего человечества подтверждается, например, трагедией атомной подводной лодки «Курск», которая, по заключению правительственной комиссии, была с наибольшей вероятностью вызвана взрывом ПВ. Поэтому возрастает значимость разработки эффективного способа контроля стабильности ПВ.

Традиционным методом контроля стабильности перекиси водорода, является способ по показателю термостабильности, заключающийся в том, что пробу перекиси нагревают до температуры 100 ºС и газометрическим методом определяют скорость её разложения. Очевидным недостатком данного способа является большая длительность процедуры определения стабильности ПВ и необходимость обеспечения специальных условий для проведения контроля, тогда как при эксплуатации ПВ требуются экспресс-методы, с возможностью автоматизации процесса контроля, пригодного для применения в полевых условиях.

Одним из таких способов является метод акустической эмиссии (АЭ). Из литературы известно, что метод АЭ позволяет регистрировать процессы кипения и кавитации жидкостей, причём указанные процессы по своей природе аналогичны процессу разложения ПВ (образование и схлопывание пузырьков газа).

С целью повышения достоверности и оперативности оценки стабильности ПВ в системах заправки ракетно-космической техники при сокращении времени и средств, за счёт использования аппаратуры акустической эмиссии и автоматизации параметров контроля Военной Академией РВСН им. Петра Великого и в/ч 35601 разработан акустоэмиссионный способ контроля стабильности перекиси водорода [1].

Предлагаемый способ заключается в следующем. Экспериментально устанавливают зависимость активности АЭ, возникающей в процессе выделения кислорода из перекиси, от скорости его выделения и определяют критические уровни газовыделения. На ёмкость с контролируемым продуктом, устанавливают преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ), количество и расположение которых обеспечивают контроль всего объёма и непрерывную регистрацию активности акустической эмиссии в процессе эксплуатации. По изменению активности АЭ во времени определяют скорость газовыделения и по отношению её к критическому уровню оценивают стабильность перекиси водорода.

В основе устройства, обеспечивающего реализацию метода контроля растворов ПВ заложено АЭ средство, которое обеспечивает измерение АЭ параметров механических вибраций стенок контролируемых объектов, вызываемых возникающими при

газовыделении акустическими волнами, пересчёт АЭ параметров в соответствии с эмпирическими уравнениями, связывающими стационарно скорость разложения растворов ПВ и активность АЭ, оперативное отображение полученной информации на экране монитора в режиме реального времени, сохранение и протоколирование полученной информации.

Так как ПАЭ устанавливают на наружной поверхности контролируемых объектов, то не требуется существенных изменений конструкции последних.

В зависимости от конструктивных особенностей, контролируемых объектов и требований заказчика, АЭ система контроля стабильности ПВ может иметь различные исполнения, отличающиеся количеством АЭ каналов, количеством ПАЭ, беспроводным или кабельным соединением блоков системы, выводом информации о стабильности ПВ на сигнально-оповещающие приборы, управлением системами предупреждения возникновения аварийных ситуаций (введение стабилизаторов, охлаждение, слив продукта и т. п.).

При создании экспериментальной установки использовался также способ проведения акустико-эмиссионного контроля с применением одноканальной аппаратуры [2], позволяющий, с одной стороны, существенно снизить стоимость комплекта необходимой АЭ аппаратуры, а, с другой стороны, за счёт использования компактных одноканальных приборов, повысить мобильность комплекса.

Совместно с РНЦ «прикладная химия» проведены лабораторные исследования с целью изучения влияния различных факторов на определение стабильности растворов ПВ методами АЭ – масштабного фактора, степени заполнения, природы материала, конструкции ёмкости и других факторов. Исследования проведены в диапазоне (20...60)ºС на 29% и 82% растворах ПВ. Определена принципиальная возможность использования методов АЭ для контроля стабильности (скорости разложения) растворов ПВ различной концентрации при их хранении и транспортировки в алюминиевой таре в широком диапазоне температур. Получены эмпирические уравнения, связывающие стационарно скорость разложения и активность акустической эмиссии растворов ПВ. Высокая чувствительность метода АЭ позволяет надежно зафиксировать увеличение скорости разложения ПВ на самых ранних стадиях возникновения аварийных ситуаций, что резко повышает безопасность обращения с растворами ПВ. Возможности методов АЭ, позволяют осуществлять непрерывный контроль стабильности растворов ПВ дистанционно и в автоматическом режиме.

Установлено, что данный способ обеспечивает такую же достоверность и точность измерений, что и применяемые в настоящее время способы, но оперативность измерений, а, значит, и заблаговременность предупреждения об опасном разложении перекиси, на порядок быстрее.

Результатом проделанной работы стало создание промышленного образца приборно-программной системы контроля на основе АЭ метода на подвижном заправщике ПВ, позволяющего проводить мониторинг параметров стабильности ПВ.

1. Пат. 2185619 Российская Федерация, МПК G01N 29/00. Акустоэмисионный способ контроля стабильности перекиси водорода / Гневко А.И., Озеров К.Г., Казаков Н.А., Гуськов В.А., Лазарев Д.В., Кузнецов В.И.; заявитель и патентообладатель ВА РВСН, в/ч 35601. – №99121899/28; заявл. 18.10.1999; опубл. 20.07.2002, бюл. №20. – 4 с.
2. Пат. 2210766 Российская Федерация, МПК G01N 29/14. Способ проведения акустико-эмиссионного контроля с применением одноканальной аппаратуры / Гневко А.И., Лазарев Д.В., Казаков Н.А., Гразион С.В.; заявитель и правообладатель ВА РВСН. – №2000131736/09; заявл. 21.12.01; опубл. 20.08.03, бюл №23. – 3 с.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС INOVA: АППАРАТУРНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАЗРУШЕНИЮ ГОРНЫХ ПОРОД

Патонин А. В., Шихова Н.М., Пономарёв А. В., Смирнов В.Б.

ИФЗ РАН, Москва,
avp46@mail.ru

На базе программно-управляемого гидравлического пресса Inova ZUZ 1000 создан геофизический комплекс, который установлен в Геофизической обсерватории Борок ИФЗ РАН. В состав комплекса помимо самой электрогидравлической системы, которая осуществляет управление положением поршня пресса, входит система создания всестороннего сжатия, система подачи порового давления, тензометрическая измерительная система, многоканальная система ультразвукового прозвучивания и регистрации отдельных волновых форм сигналов акустической эмиссии (АЭ) [Патонин и др., 2019], многоканальная система непрерывной регистрации потока акустической энергии. Синхронная работа систем управления прессом и измерительных станций осуществляется посредством 4-х канальной станции синхронизации.

Комплекс INOVA (рис.1) предназначен для испытания образцов горных пород в условиях гидростатического сжатия при избыточной осевой нагрузке. Программа управления задает необходимый режим испытания при максимальном осевом усилии до 1000кН, всестороннем давлении до 150МПа и поровом давлении до 25МПа.

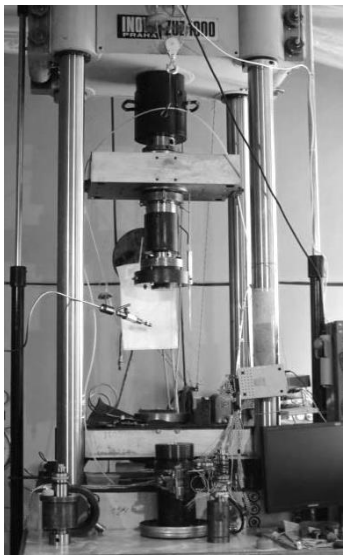


Рис. 1. Система INOVA

Обработка результатов проведенного испытания осуществляется с помощью нескольких авторских программ [Шихова, Патонин, 2018; Шихова и др., 2019]. По результатам ультразвукового зондирования определяются скорости распространения упругих волн и восстанавливается их распределение во всем объеме образца. По записям волновых форм сигналов АЭ определяются координаты источников сигналов и механизмы их формирования. Система непрерывной регистрации потока акустической энергии используется для выделения из общего потока сигналов АЭ и расчетов их характеристик. Станция синхронизации осуществляет привязку времени отдельных регистрирующих систем к единому времени с точностью до 25 мкс.

Работа выполнена по гос. заданию ИФЗ РАН.

Список литературы

1. Патонин А. В., Пономарев А.В., Шихова Н. М. Программа регистрации волновых форм сигналов акустической эмиссии № 2019660762, 13.08.2019
2. Шихова Н.М., Патонин А.В. Программа анализа волновых форм сигналов ультразвукового зондирования №2018666298, 13.12.2018
3. Шихова Н. М., Патонин А. В., Пономарев А.В. Программа определения механизма источника акустического сигнала № 2019660763, 13.08.2019

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ АКУСТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Патонин А. В., Шихова Н.М., Пономарёв А. В., Смирнов В.Б.

ИФЗ РАН, Москва,
avp46@mail.ru

Лабораторное моделирование разрушения горных пород с учетом пространственно-временных масштабов, опираясь на концепцию подобия, в некоторой степени воспроизводит процессы, происходящие в земной коре. Напряженное состояние испытуемого материала характеризуется тензором напряжений, который устанавливает связь между направлениями прикладываемых напряжений и направлениями предполагаемых подвижек материала в результате образующегося разрыва. Вавричек [Vavryčuk, V. 2014] подробно рассмотрел вопрос определения механизма сейсмического события на основе метода определения тензора сейсмического момента (MT). В лабораторных условиях испытаний горных пород количество приемных датчиков ограничено (в зависимости от размеров образца от 8 до 32 шт.), что накладывает существенные ограничения на точность оценки MT для акустических событий. В экспериментах измеряются скорости распространения упругих волн по разным направлениям, а также отдельные волновые формы сигналов акустической эмиссии (АЭ). Эти данные служат входными параметрами для моделей восстановления тензора как локальных, так и интегральных напряжений всего образца.

Применительно к лабораторным данным используются различные подходы для определения механизмов источников сигналов АЭ. Методика [Zang et al, 1998] основана на оценке отношения знаков вступления приходящих упругих волн. Эта методика не дает информации о направлении действующих напряжений и связанных с ними ориентациях микротрещин и подвижек берегов, исключая, тем самым, возможность восстановления поля напряжений. Программный пакет HybridMT, разработанный Квятеком [Kwiatek et al, 2016], позволяет рассчитать тензор сейсмического момента для событий АЭ, при этом для корректного решения задачи требуется равномерное покрытие поверхности образца приемными датчиками. Расчеты момента тензора по частотным характеристикам волновых форм [Ono K., 2010; Ohtsu M., 2007] дают приближенные оценки MT для ограниченного типа лабораторных моделей.

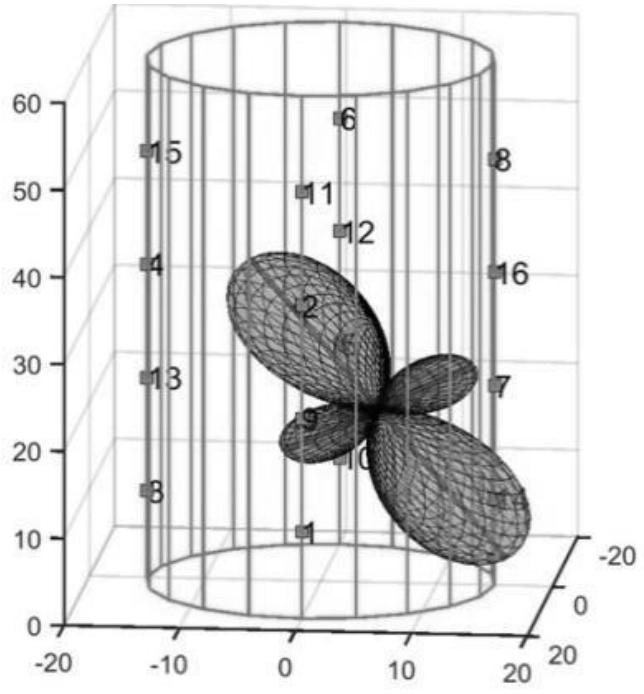


Рис.1. Схема расстановки датчиков и диаграмма направленности диполей сжатия и растяжения

Нами разработан и испытан оригинальный метод определения механизмов сигналов АЭ и параметров действующих локальных

напряжений по данным лабораторных испытаний. В основе метода лежит предположение, что источник сигнала АЭ представляет собой квадруполь, состоящий из диполя сжатия и диполя растяжения. Предполагается, что амплитуды вступления упругой волны соответствующих знаков на приемных датчиках согласуются с аналитической формой поверхности вращения, образованной фронтами движения волны. Диаграмма направленности квадруполя, задаётся в виде симметричного тела вращения (рис.1) вдоль оси диполя пропорционально cos(2*α), где α – угол между осью соответствующего диполя и направлением на приемник. Соответственно амплитуда упругой волны, пришедшая на *i*-й датчик, будет определяться как $A_i = A_0*\cos(2fi)/R_i$, где A_0 – амплитуда в источнике, *fi* – угол между осью диполя и направлением на *i*-й датчик, R_i –расстояние от источника до датчика, определяющее рассеяние упругой энергии. Алгоритм расчета использует координаты источника сигнала АЭ, амплитуды и знаки первого вступления на каждый из приемных датчиков. Решение обратной задачи - расчет направления осей диполя и амплитуд исходных сигналов проводится отдельно для положительного и отрицательного диполя (сжатие/растяжение) по данным трёх датчиков с максимальными амплитудами одного знака. Устойчивость решения определяется с помощью процедуры 10%-й рандомизации исходных амплитуд. К преимуществам метода можно отнести независимость от расположения датчиков относительно источника события, минимальное требуемое для расчётов количество знаков одной полярности, равное трем, оценку амплитуды акустического события – отдельно для положительного и отрицательного диполей, возможность гибкого изменения входных параметров и возможности разнообразной визуализации результатов вычислений тензора сейсмического момента.

Тестирование эффективности определения механизмов АЭ на модельных сигналах разными методами показало, что предложенный алгоритм восстанавливает направление главных осей квадруполя напряжений с допустимой ошибкой в несколько градусов для каждого события.

Работа выполнена по гос. заданию ИФЗ РАН.

Список литературы

1. Kwiatek, G., P. Martínez-Garzón, and M. Bohnhoff (2016), HybridMT: A MATLAB/shell environment package for seismic moment tensor inversion and refinement, Seismol. Res. Lett., doi:10.1785/0220150251
2. Vavryčuk, V. (2014). Moment tensor decompositions revisited, J. Seismol. 19, 231–252, doi: 10.1007/s10950-014-9463-y.
3. Zang, A., Wagner, F., Stanchits, S., Dresen, G., Andresen, R., Haidekker, M. A. Source analysis of acoustic emissions in Aue granite cores under symmetric and asymmetric compressive loads // Geophys. J. Int.1998. V.135. № 3. P.1113—1130.
4. Ono K. Application Of Acoustic Emission For Structure Diagnosis // Diagnostyka - diagnostics and structural health monitoring. 2010. V. 2. N. 58. P. 3-18.
5. Ohtsu M., Isoda T., Tomoda Y. Acoustic emission techniques standardized for concrete structures // J. Acoustic Emission. 2007. V. 25. P. 21-32.

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КРИТЕРИЯ «ВЫДЕРЖКА НАГРУЗКИ» ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АЭ КОНТРОЛЯ

[1] Гомера В.П., [2] Гомера А.В.

[1] ООО «Константа», г. Санкт-Петербург, Россия
[2] РГГМУ, г. Санкт-Петербург, Россия
Gomera-V-P@yandex.ru

Критерий АЭ активности в процессе выдержки под нагрузкой входит в число критериев оценки технического состояния объектов АЭ контроля, определенных в ПБ-03-593-03 [1]. В технологии MONPAC критерий, учитывающий эмиссию в течение выдержек давления, отнесен к особенно важным критериям [2]. Продолжающаяся во время выдержек эмиссия сигнализирует о наличии процессов текучести или об опасности из-за крипа или роста дефектов. Значение использования данного критерия существенно возрастает при проведении АЭ контроля, сопровождающего процесс пневматического испытания (ПИ) промышленных сосудов или трубопроводов. Это связано с тем, что при ПИ при поднятии давления часто имеет место очень высокий уровень шумов нагружения, от которых не всегда возможно отстроиться полностью. В этом случае выдержки давления могут являться наиболее информативным блоком всего объема данных, зарегистрированных при проведении АЭ контроля. При проведении гидравлического испытания (ГИ) проблема шумов нагружения значительно менее актуальна.

Технологический пакет MONPAC разработан, в основном, в результате обработки обширных эмпирических данных по испытаниям сосудов и трубопроводов, т.е. его можно отнести к эмпирическим системам оценки состояния оборудования. Обоснования предлагаемых критериев, в частности критерия выдержек, с позиций механики разрушения в нем не представлено.

Предлагается в связи с этим рассмотреть явления, описанные в [3]: «пороговый уровень интенсивности напряжений» и «малоцикловая усталость при высоком напряжении» для интерпретации причин АЭ активности, регистрируемой на выдержках давления и их возможного использования при оценке состояния объекта контроля. Первое явление наблюдалось при выдержках сосудов под давлением: максимальное снижение разрушающего давления в этих экспериментах с дефектами в основном металле при длительной выдержке составляет около 5% независимо от длины поверхностного дефекта и уровня разрушающего напряжения; время до разрушения зависит от близости текущего значения напряжения. Это нижний уровень давления, при котором еще происходит рост дефекта; время до разрушения зависит от близости текущего значения давления до давления разрушения. Если напряжение σ*, выражающее некоторое среднее значение напряжения в области вершины дефекта и равное произведению окружного разрушающего напряжения σ_θ на коэффициент концентрации напряжений M, достигает критического уровня, наступает разрушение. Авторы [3] называют его напряжением пластической неустойчивости.

В результате малоциклового нагружения происходит подрастание дефекта, которое сложно выявить на докритическом уровне, но при приближении к критическому размеру вероятность обнаружения дефекта возрастает ввиду увеличения амплитуды генерируемых АЭ сигналов (по мере роста трещин и соответствующей длины их проскока). В [3] представлена кривая уменьшения разрушающего давления в зависимости от разрушающего давления по критерию σ*. Вероятно, сочетание двух этих явлений может также быть одной из причин нарушения эффекта Кайзера

(это тоже является признаком наличия развивающегося дефекта) при остановке подъема давления вблизи достижения дефектом критического размера и повторном его подъеме давления.

В предположении, что значения σ* для дефектов, присутствующих в материале объекта контроля, как и многие реальные ансамбли отказов, удовлетворительно описываются распределением Вейбулла с параметром формы распределения $\beta \geq 1$, проводится анализ АЭ активности на выдержках давления, учитывающий эффект близости значения выдержки давления к разрушающей нагрузке. В случае, если АЭ активность достаточно высокая, такой анализ предоставляет информацию для определения параметров распределения Вейбулла по значениям σ* дефектов, что, в свою очередь, позволяет оценить общее состояние объекта даже при потере части АЭ информации на этапах подъема давления из-за высоких шумов нагружения при ПИ. Положительным фактором ПИ именно при использовании критерия выдержек является то, что этот вид нагружения инерционен, в отличие от ГИ, которое является аналогом жесткой испытательной установки: при малейшей утечке, что не редкость для реальных крупнотоннажных сосудов с большим числом штуцеров, давление быстро снижается. В случае небольших утечек при проведении ПИ практически постоянный уровень давления является продолжительным.

Очевидно, что основной массив зарегистрированных сигналов при контроле реальных объектов не связан с регистрацией развития дефектов критического для данной конструкции размера. Эта информация может использоваться для ранней диагностики процессов разрушения.

В критериях для выдержек давления, рекомендованных в [1,2] не содержится требование по локализации АЭ источников. В предлагаемом подходе условие регистрации последовательности импульсов из одних и тех же локационных кластеров существенно. При этом число контрольных датчиков и схема их расположения должны решать задачу локализации источников.

Данный подход также предполагает возможность построения оптимальной схемы нагружения объекта при планировании АЭ контроля, в случае, если существует значительная вероятность того, что корректные АЭ данные можно будет собрать только на выдержках давления.

Рассмотрен пример практического испытания, в котором для выявления дефектов критического размера в аппарате колонного типа были успешно использованы критерий выдержек давления и процедура малоцикловой деформации.

Список литературы

1. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. Утв. постановлением Госгортехнадзора России от 09 06 03 № 77
2. Fowler T.J., Blessing J.A., Conlisk P.J., Swanson T.L. The MONPAC System. Journal of Acoustic Emission, 8 (3) (1989), p.1–8.
3. Даффи А.О поведении дефектов в сосудах давления / А. Даффи , Р.Эйбер, У.Макси // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению: сб. статей под ред. акад. Ю.Н.Работнова. – М.: Мир, 1972. – С.301-322.

АЭ-МОНИТОРИНГ СВАРНЫХ ШВОВ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ТРУБЫ В ПРОЦЕССЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Яковлев А.В., Балдычев С.В.

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург, Россия
sbaldychev@yandex.ru

В ФГУП «Крыловский государственный научный центр» проведены гидравлические испытания натурного образца одношовной сварной трубы, изготовленной с применением экспериментальной технологии сварки. Натурный образец (см. рис. 1) состоял из полноразмерной трубы длиной 12 метров, диаметром 1430 мм и толщиной стенки 30 мм, изготовленной из стали класса прочности К60. К торцам трубы, были приварены переходные кольца и заглушки (полусферические днища).

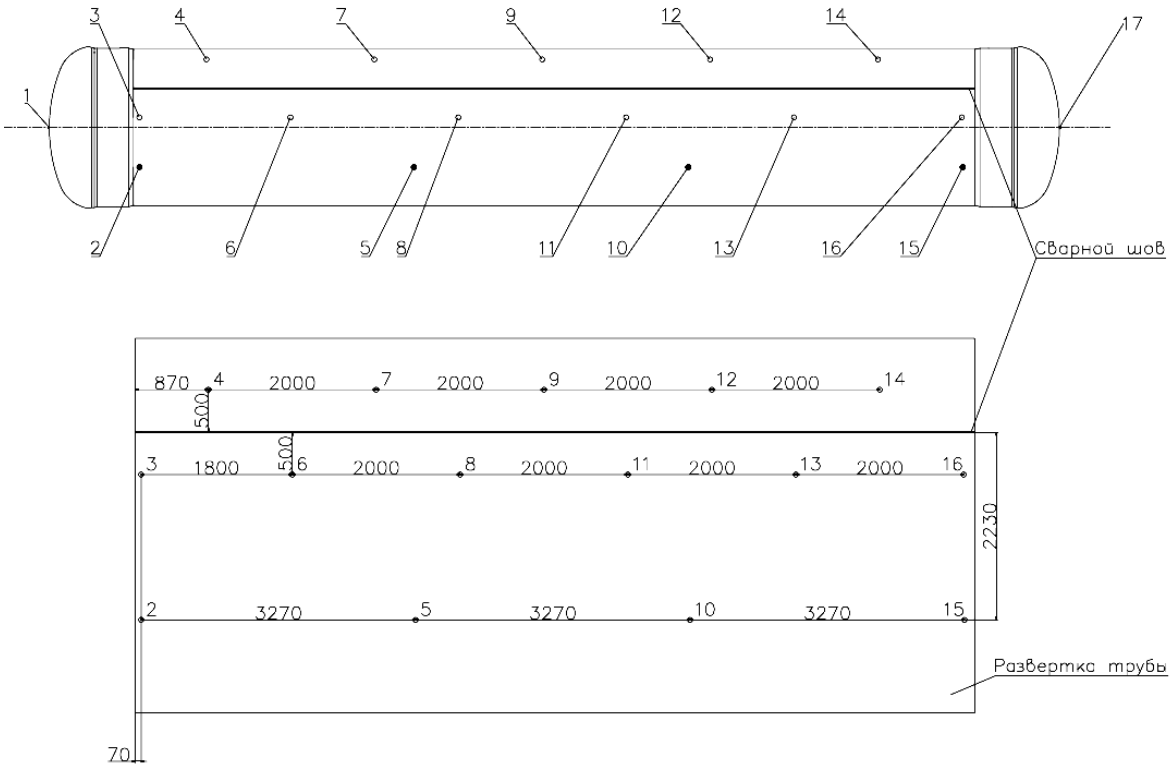


Рис. 1. Эскиз образца трубы и схема расстановки ПАЭ

Основной этап испытаний был выполнен на базе 10000 циклов нагружения до уровня 75% σ_T. В ходе испытаний осуществлялся АЭ-мониторинг состояния сварных швов образца с применением аппаратуры КАМС-Т разработки ФГУП «Крыловский научный центр» [1].

Нагружение сопровождалось большим числом сигналов акустических помех от различных источников, наличие которых неизбежно в условиях гидравлических испытаний. Например, к таким источникам относятся трение материала объекта кон-

троля об опоры. Однако, реализованные в аппаратуре КАЭМС-Т современные методы фильтрации импульсов помех по параметрам их волновой формы и частотного состава, позволили устранить подавляющее большинство побочных сигналов.

В процессе испытаний были зарегистрированы источники АЭ, свидетельствующие о наличии дефектов сварных соединениях полусферических днищ. Следует отметить, что поведение этих дефектов, зафиксированное в процессе АЭ-мониторинга, коренным образом различалось.

Так, например, в одном из швов подавляющее большинство событий АЭ регистрировалось при малых и средних значениях давления цикла нагружения. Как было показано в работе [2] такие события АЭ генерируются при трении берегов усталостных трещин в крупногабаритных конструкциях. Наличие дефекта в этом районе также было подтверждено результатами ультразвукового контроля (УЗК). Несмотря на наличие недопустимого дефекта, рассматриваемый стыковой сварной шов циклические испытания до 10000 циклов выдержал без разрушения.

Иначе вел себя дефект, выявленный в другом сварном шве опытного образца. На этапах нагружения до 5000 циклов опасные сигналы отсутствовали. На этапе от 5000 до 7000 циклов зафиксированы источники, свидетельствующие о начале развития дефекта. При количестве циклов, равном 8057, произошло локальное разрушение сварного шва.

После исправления заваркой дефектного участка события АЭ в данной зоне при высоких давлениях продолжали регистрироваться вплоть до 8780 цикла, когда произошло повторное разрушение.

После капитального ремонта разрушившегося шва приварки днища в при высоких давлениях цикла источников АЭ зарегистрировано не было.

Результаты проведенных испытаний показали:

– цифровая обработка импульсов в широкой полосе частот, реализованная в аппаратуре КАЭМС-Т[2, 5], обеспечивает возможность эффективной фильтрации сигналов помех, присущих усталостным испытаниям, и позволяет выполнять оценку степени опасности источников АЭ в реальном времени;

– накопленный экспериментальный материал может быть использован при разработке методики циклических испытаний в сопровождении метода АЭ-контроля с целью выявления усталостных трещин.

Список литературы

1. 50933-12. Описание типа СИ. Модули измерений и анализа информации аппаратуры акустико-эмиссионной специализированной промышленной КАЭМС-Т
2. Гуменюк В.А., Иванов Ю.Г., Сульженко В.А., Яковлев А.В. Анализ сигналов АЭ от трения берегов полуэллиптической усталостной трещины. Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 1989 г., № 3, с. 31-36

ИЗУЧЕНИЕ ИНВАРИАНТНОСТИ КРИТИЧЕСКОГО ЛОКАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ К НАДРЕЗУ И СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ МЕТОДОМ МЕХАНОСТИМУЛИРОВАННОЙ ФОТОЭМИССИИ

Мишин В.М.[1], Филиппов Г.А.[2], Щитов Д.В.[1], Мишин В.В.[1]

[1]Северо-Кавказский федеральный университет, филиал г. Пятигорск, Россия,
[2]ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, ИКС, Москва, Россия
mishinvm@yandex.ru

Ранее критическое локальное растягивающее напряжение (σ_F) в стали определяли только методами механики разрушения, что не являлось достаточным условием представления его как фундаментального [1,2]. Используя возможности метода механостимулированной фотоэмиссии, разработанного Н.П. Валуевым и И.В. Мойшем [3], была проведена оценка величины и рассмотрена зависимость локального разрушающего напряжения от внешних факторов для стали 3. Одновременно для этой же стали было определено критическое максимальное локальное растягивающее напряжение методами механики разрушения с привлечением метода конечных элементов [4].

Материал и методика исследования

Эксперименты проводили на горячекатанной стали 3. Использовали образцы на растяжение диаметром 8,00 мм гладкие и с кольцевыми проточками глубиной 2,00 мм, углом раскрытия 60° и *U*-образные, а также образцы для испытаний на сосредоточенный изгиб тип 11 (ГОСТ 9454-78) и с надрезом глубиной 0,5 мм, углом раскрытия надреза 45° для испытаний с применением механостимулированной фотоэмиссии.

Эмиссия атомов наиболее вероятна в зоне максимальных растягивающих напряжений, где межатомные силы сцепления атомов наиболее ослаблены и они могут за счет тепловых флуктуаций покидать массив металла. Максимальный уровень локальных растягивающих напряжений реализуется в вершине трещины, поэтому, регистрируя параметры фотоэмиссии металлов, можно оценить величину локального разрушающего напряжения экспериментальным путем [4]. Записав выражение для количества десорбируемых поверхностью металла атомов N за время разрушения можно оценить величину локальных напряжений:

$$N = J \cdot p = N_o \cdot C \cdot \exp[-\frac{U_o - {}_\Delta U}{KT}] \qquad (1)$$

где U_o – энергия связи атомов, N_o – количество атомов на поверхности излома, C – предэкспоненциальный множитель, J – количество квантов флоуресцентного излучения, K – постоянная Больцмана, T – температура в зоне разрушения, p – вероятность излучения десорбируемого атома.

Величина ${}_\Delta U$ соответствует энергии атома, смещенного под действием локального напряжения σ_M из положения равновесия. Связь между величинами ${}_\Delta U$ и σ_M линейная:

$${}_\Delta U = \sigma_M \cdot V \qquad (2)$$

где V – объем, занимаемый одним атомом.

Из выражений 1 и 2 может быть вычислена величина локального напряжения в вершине трещины:

$$\sigma_M = \frac{U_0}{V} - \frac{k \cdot T}{V} \ln\left(\frac{\varepsilon \cdot \Omega \cdot N_0 \cdot C_p}{J_p \cdot 4 \cdot \pi}\right) \quad (3)$$

где J_p – количество зарегистрированных квантов флоуресценции за время разрушения, Ω – телесный угол регистрации квантов, ε – эффективность регистрации.

Обсуждение результатов

Значения длины волны фотонов, соответствующие коротковолновой границе излучения, при этом практически не изменяются, что позволяет использовать данный параметр для оценки сил межатомных связей, характеризующих локальную прочность стали. Влияние концентрации напряжений обусловленных геометрией надреза иллюстрируется на рис. 1.

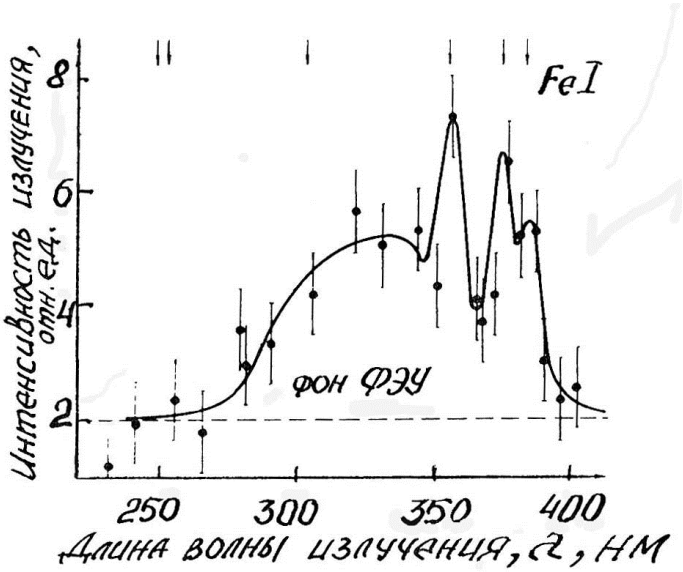


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения от длины волн

Анализ спектров эмиссии показывает, что падает также и интенсивность флуоресценции, однако положение коротковолновой границы спектра практически не изменяется, то есть локальное разрушающее напряжение практически не зависит от геометрии образца, надреза, скорости и температуры испытаний.

Для определения величины локального разрушающего напряжения по (3) необходимо знать величины U_o, T и V.

Методика оценки локального разрушающего напряжения заключается в следующем. Регистрируется граничная длина волны флуоресцентного излучения. Это значение используется для нахождения величины U_o. Регистрируется интенсивность длинно-волнового теплового излучения в диапазоне 0,8 – 5 мкм. По полученным значениям определяется температура поверхностей разрушения в момент их образования. Эта температура изменяется в зависимости от марки стали и характера разрушения от 300 до 500 ºС. Измеряется интенсивность флуоресцентного излучения J_p. Полученные значения используются для нахождения локального разрушающего напряжения по формуле (3). В результате расчета локального разрушающего напряжения для стали 3 на основе зависимости интенсивности флуоресценции от локальных напряжений в вершине трещины было получено значение 1200 МН/м^2.

С другой стороны, определяли критическое σ_F методом механики разрушения по методике [2,4]. Определенное, таким образом, значение критического максимального локального растягивающего напряжения на образцах с различной геометрией концентратора напряжений при растяжении и сосредоточенном изгибе составило для стали 3 – 1120 МН/м$^{2.}$

Таким образом, методом механостимулированной фотоэмиссии подтверждена инвариантность критического локального растягивающего напряжения к геометрии концентраторов напряжений и скорости нагружения.

Список литературы

1. Mishin V.M., Filippov G.A. Microstructural factors that decrease the local strength of grain boundaries in martensitic steels // Physics of Metals and Metallography, 2018. Vol. 119. № 5, pp. 504–509. DOI: 10.1134/S0031918X18050101
2. Мишин В. М., Филиппов Г. А. Критерий и физико-механическая характеристика сопротивления стали замедленному разрушению // Деформация и разрушение материалов. 2007. № 3. С. 37–42.
3. Валуев Н.П., Денисов В.Н., Мойш Ю.В., Подобедов В.Б., Саррак В.И., Филиппов Г.А., Беленький А.Я. Исследование фотонной эмиссии, возникающей при хрупком разрушении сталей // ФММ. – 1986. – Т.62. – в.4. – С. 724 - 729.
4. Мишин В.М., Филиппов Г.А. Физика замедленного разрушения сталей – Монография [Текст] / В.М. Мишин – М.-В: «Полиграфпром», 2013. – 455 с. ISBN 978-5-905831-05-8.

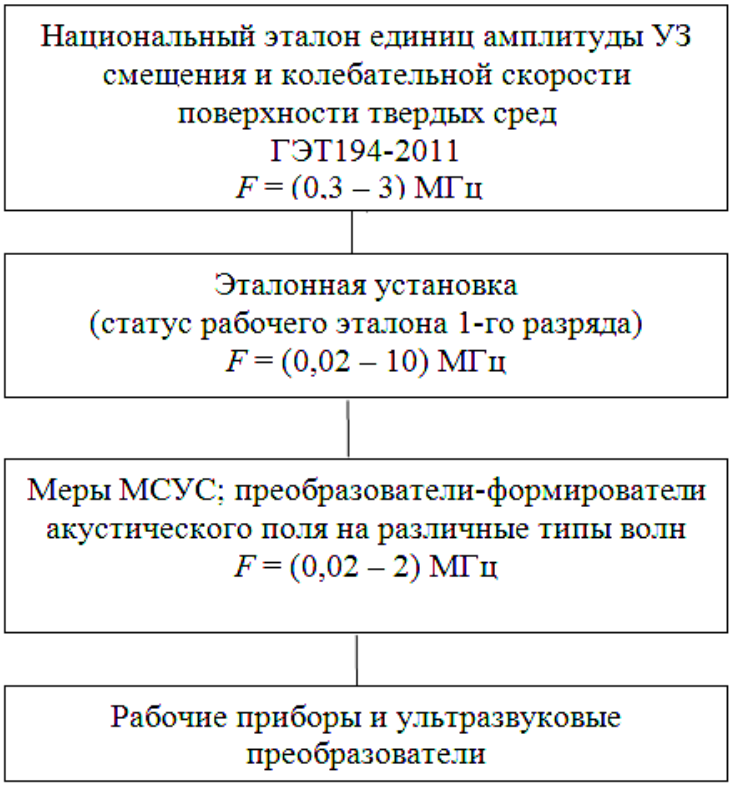
ЭТАЛОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ АМПЛИТУДЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СМЕЩЕНИЯ, КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ СРЕД И КОЭФФИЦИЕНТА ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРОВ ВОСПРОИЗВОДИМЫХ ЕДИНИЦ РАБОЧИМ СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЙ

Бакшеев В.Г., Панин В.И., Шулатов А.В., Хомяков В.В.

Дальневосточный филиал ФГУП «ВНИИФТРИ»,
г. Хабаровск, Россия,
shulatov@dfvniiftri.ru

Национальный эталон ГЭТ194-2011 возглавляет поверочную схему для средств измерений амплитуды ультразвукового смещения и колебательной скорости поверхности твердых сред в диапазоне частот от 0,02 до 30 МГц. В его состав входит исходная эталонная установка. Однако, она не может непосредственно осуществить передачу воспроизводимых эталоном единиц в столь широкой области частот при различных типах волнового движения в твердых телах. Она ограничена частотным диапазоном (0,3—3,0) МГц. Поэтому была разработана эталонная установка, обеспечивающая передачу размеров единиц УЗ смещения и колебательной скорости поверхности твёрдых сред от ГЭТ194-2011 нижестоящими СИ в диапазоне частот (0,02—10,0) МГц.

К ним относятся как рабочие, так и эталонные средства, воспроизводящие различные типы волн в различных средах и телах, в виде мер ультразвукового смещения (МСУС), преобразователей-формирователей акустического поля на различные типы волн, с помощью которых осуществляется калибровка и поверка рабочих приборов и ультразвуковых преобразователей. Упрощенная схема передачи размеров воспроизводимых единиц рабочим средствам приведена ниже.



Следует отметить, что разработанная эталонная установка позволяет также измерять коэффициент электроакустического преобразования. Кроме указанной на схеме функции передачи размеров единиц с помощью эталонной установки, реализована возможность непосредственного измерения параметров УЗ колебаний, например, в зоне касания рук оператора с преобразователями для проверки допустимого уровня «контактного ультразвука» на предмет его соответствия существующим нормам безопасности.

Таким образом, имеется возможность:

- обеспечить калибровку/поверку средств акустической эмиссии;
- обеспечить измерение уровней ультразвука;
- технического обеспечения разработки методик контроля, связывающих параметры состояния, показатели качества (течь и её величина, развивающиеся дефекты, их размеры и др.) с параметрами ультразвуковых колебаний (смещение, колебательная скорость, мощность и др.);
- проводить метрологические исследования ультразвуковых преобразователей и аппаратуры при их разработке и др.

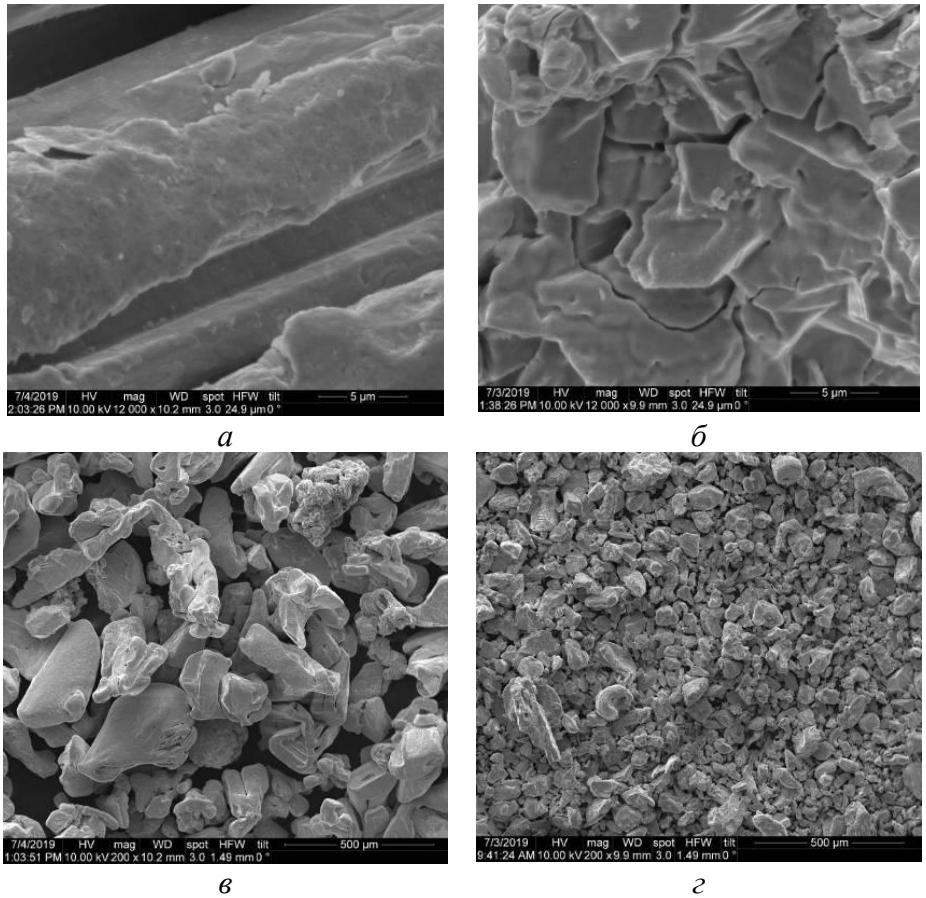
Авторы обладают необходимым опытом и имеют возможность осуществлять разработки эталонных средств в расширенном диапазоне частот и типов волновых воздействий для калибровки рабочих средств, в т.ч., в специфических условиях Заказчика. Авторами, в частности, разработаны меры, воспроизводящие среднеквадратическое значение коэффициента электроакустического преобразования в заданной полосе частот (по колебательной скорости поверхности твёрдых сред), являющееся рабочим параметром АЭ-системы Заказчика.

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ГИДРИРОВАНИИ ЦИРКОНИЯ

Кунавин С.М., Кузнецов А.А., Бережко П.Г., Царёв М.В., Кашафдинов., И.Ф., Соломонов А.В., Мокрушин В.В., Царёва И.А., Забродина О.Ю.

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики;
г. Саров Нижегородской обл., Россия

В работе исследованы сигналы акустической эмиссии (АЭ), возникающие при взаимодействии образцов металлического циркония с водородом, и изменения, происходящие в гидрируемых образцах и являющиеся источниками возникновения акустических сигналов высокой амплитуды. Исследовалось гидрирование стружки, полученной из компактного йодидного циркония, с характерным линейным размером частиц 2…3 мм и толщиной 0,2 мм; крупного порошка электролитического циркония фракции 400…550 мкм, и мелкого порошка натриетермического циркония с размером частиц менее 40 мкм.



а *б*

в *г*

Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения поверхности индивидуальных частиц (*а–б*) и скоплений частиц (*в–г*) крупного порошка циркония до (слева) и после (справа) гидрирования, полученные при одинаковом увеличении

Установлено, что источником возникновения акустических сигналов высокой амплитуды во всех случаях является растрескивание частиц циркония на макроуровне, которое приводит к образованию протяжённых трещин и разломов на поверхности индивидуальных частиц (рис. 1*а,* 1*б*), а также к измельчению исходных материалов (рис. 1*в,* 1*г*). Растрескивание и измельчение вызвано внутренними напряжениями, возникающими в образцах при гидрировании вследствие роста объема твердой фазы. Показано, что атомное отношение [H]/[Zr] в твердой фазе, соответствующее максимуму амплитуды сигнала акустической эмиссии, закономерно увеличивается в ряду: стружка циркония – крупный порошок – мелкий порошок, что может объясняться снижением величины внутренних напряжений, возникающих в данных образцах при образовании гидрида циркония.

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ГИДРИРОВАНИИ ТИТАНА

Кузнецов А.А., Кунавин С.М., Бережко П.Г., Жилкин Е.В., Царёв М.В., Ярошенко В.В., Мокрушин В.В., Забродина О.Ю., Митяшин С.А.

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики;
г. Саров Нижегородской обл., Россия

В работе исследованы сигналы акустической эмиссии (АЭ), возникающие при взаимодействии образцов металлического титана с водородом, и изменения, происходящие в гидрируемых образцах и являющиеся источниками возникновения акустических сигналов высокой амплитуды (рис. 1).

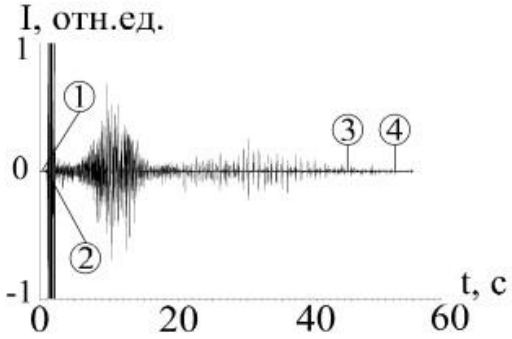
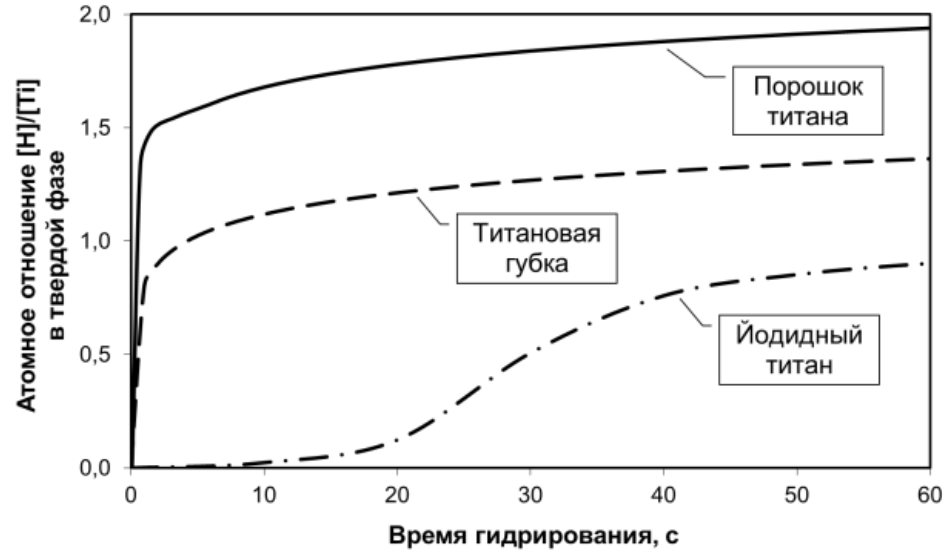


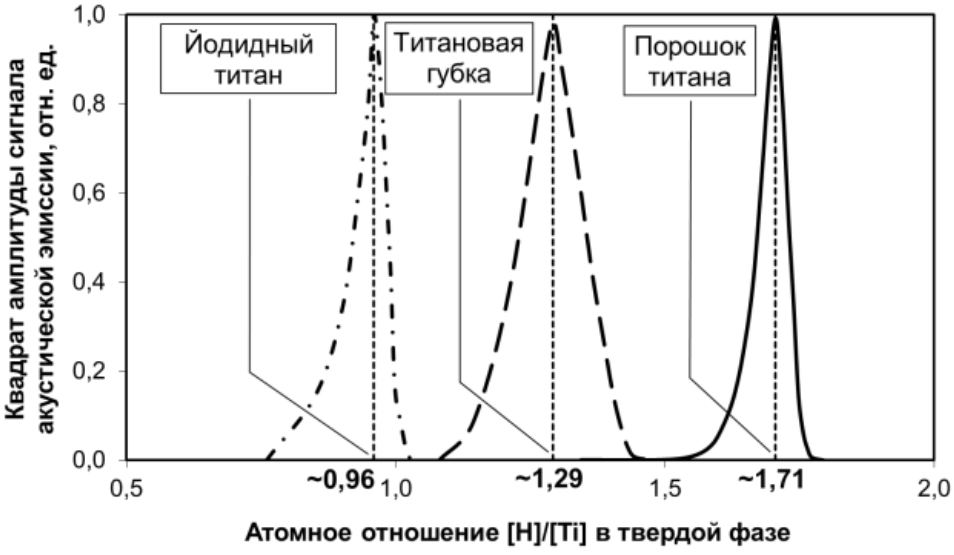
Рис. 1. Характерный вид сигнала АЭ, зарегистрированного при гидрировании (на примере кусков йодидного титана),
где: 1 – фоновый сигнал до начала опыта; 2 – момент начала опыта;
3 – время окончания акустической активности образца;
4 – время окончания реакции, определенное по давлению в реакционной камере

Исследовалось гидрирование кусков йодидного титана размером ~20 мм; титановой губки с размером кусков ~10 мм и порошка, изготовленного из этой губки, с размером частиц менее ~40 мкм (рис. 2*а*). Установлено, что источником возникновения сигналов высокой амплитуды во всех случаях является растрескивание частиц титана на макроуровне. Растрескивание вызвано внутренними напряжениями, воз-

никающими в гидрируемых образцах, вследствие роста объема твердой фазы, происходящего при образовании гидрида титана. Показано, что атомное отношение [H]/[Ti] в твердой фазе, соответствующее максимуму амплитуды сигнала акустической эмиссии, закономерно увеличивается в ряду: йодидный титан – титановая губка – порошок титана (рис. 2*б*), что может объясняться снижением величины внутренних напряжений, возникающих в данных образцах при образовании гидридной фазы.



а



б

Рис. 2. Характерные зависимости атомного отношения [H]/[Ti] в твердой фазе от времени эксперимента (*а*), и уровня акустической активности образцов в зависимости от степени прохождения реакции (*б*)

ОБ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЯХ БЕСКОНЕЧНОЙ КРАЕВОЙ ДИСЛОКАЦИИ В БЕЗДИССИПАТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ

Дежин В.В.

Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия
viktor.dezhin@mail.ru

В настоящей работе рассмотрено излучение упругих волн (акустическая эмиссия) при изгибных колебаниях бесконечной дислокации. Сопротивление среды не учитывалось. Впервые излучение колеблющейся прямолинейной дислокации исследовал Эшелби [1]. Он рассмотрел винтовую дислокацию. Позднее задача об излучении упругих волн дислокацией произвольной формы в изотропной бездиссипативной среде была решена в работах Нацика [2, 3] и Чишко [4]. Изгибные колебания дислокации в работах [1-4] не учитывались.

Воспользуемся результатами работы [5]. Тогда для краевой дислокации, бесконечно протяженной вдоль оси Oz и совершающей малые изгибные колебания вблизи положения равновесия (ось Oz), обратная обобщенная восприимчивость

$$\alpha^{-1}(k_z,\omega)=-\frac{\mu b^2}{8\pi}\left[-(1+\gamma)k_z^2+\frac{\omega^2}{c_t^2}\ln\frac{k_m^2}{\omega^2/c_t^2-k_z^2}+\gamma\left(\frac{\omega^2}{c_l^2}-2k_z^2\right)\ln\frac{k_m^2}{\omega^2/c_l^2-k_z^2}+\right.$$
$$\left.+\frac{k_z^4c_t^2}{\omega^2}\ln\frac{\omega^2/c_t^2-k_z^2}{\omega^2/c_l^2-k_z^2}\right]-i\frac{\mu b^2}{8}\left[\frac{\omega|\omega|}{c_t^2}+\gamma\left(\frac{\omega|\omega|}{c_l^2}-2k_z^2\right)\right]. \qquad (1)$$

Здесь k_z – компонента волнового вектора вдоль линии дислокации, ω – частота, μ – модуль сдвига, $\mathbf{b}$ – вектор Бюргерса дислокации, $\gamma=c_t^2/c_l^2$, c_t и c_l – скорости поперечных и продольных звуковых волн в бездиссипативном кристалле, k_z – компонента волнового вектора вдоль линии дислокации, k_m – максимальное волновое число. При записи формулы (1) предполагалось $|k_z|<\omega/c_l$ – условие излучения дислокацией упругих волн. Наличие мнимой части в (1) обусловлено излучением упругих волн. Далее аналогично работе [6], используя формулу из [7], получим для средней величины энергии, дисссипируемой в единицу времени

$$W=\frac{\omega}{2}\operatorname{Im}\alpha(k_z,\omega)|f_0|^2=\frac{4\omega}{\mu b^2}\left[\frac{\omega|\omega|}{c_t^2}+\gamma\left(\frac{\omega|\omega|}{c_l^2}-2k_z^2\right)\right]|f_0|^2\times$$
$$\times\left[\frac{1}{\pi^2}\left\{-(1+\gamma)k_z^2+\frac{\omega^2}{c_t^2}\ln\frac{k_m^2}{\omega^2/c_t^2-k_z^2}+\gamma\left(\frac{\omega^2}{c_l^2}-2k_z^2\right)\ln\frac{k_m^2}{\omega^2/c_l^2-k_z^2}+\right.\right.$$
$$\left.\left.+\frac{k_z^4c_t^2}{\omega^2}\ln\frac{\omega^2/c_t^2-k_z^2}{\omega^2/c_l^2-k_z^2}\right\}^2+\left\{\frac{\omega|\omega|}{c_t^2}+\gamma\left(\frac{\omega|\omega|}{c_l^2}-2k_z^2\right)\right\}^2\right]^{-1}, \qquad (2)$$

где $|f_0|$ – амплитуда внешней силы, действующей на дислокацию. Эта величина энергии W равна энергии излучения упругих волн в единицу времени (акустической эмиссии) при изгибных колебаниях бесконечной краевой дислокации.

Излучение упругих волн также происходит при условии $\omega/c_l < |k_z| < \omega/c_t$. В этом случае формула для обратной обобщенной восприимчивости (1) примет вид

$$\alpha^{-1}(k_z,\omega) = -\frac{\mu b^2}{8\pi}\left[-(1+\gamma)k_z^2 + \frac{\omega^2}{c_t^2}\ln\frac{k_m^2}{\omega^2/c_t^2 - k_z^2} - \gamma\left(2k_z^2 - \frac{\omega^2}{c_l^2}\right)\ln\frac{k_m^2}{k_z^2 - \omega^2/c_l^2} + \right.$$

$$\left. + \frac{k_z^4 c_t^2}{\omega^2}\ln\frac{\omega^2/c_t^2 - k_z^2}{k_z^2 - \omega^2/c_l^2}\right] - i\frac{\mu b^2}{8}\left[\frac{\omega|\omega|}{c_t^2} - \frac{k_z^4 c_t^2}{\omega|\omega|}\right].$$

И тогда для средней величины энергии, дисссипируемой в единицу времени, получим в отличие от выражения (2):

$$W = \frac{\omega}{2}\operatorname{Im}\alpha(k_z,\omega)|f_0|^2 = \frac{4\omega}{\mu b^2}\left[\frac{\omega|\omega|}{c_t^2} - \frac{k_z^4 c_t^2}{\omega|\omega|}\right]|f_0|^2 \times$$

$$\times\left[\frac{1}{\pi^2}\left\{-(1+\gamma)k_z^2 + \frac{\omega^2}{c_t^2}\ln\frac{k_m^2}{\omega^2/c_t^2 - k_z^2} - \gamma\left(2k_z^2 - \frac{\omega^2}{c_l^2}\right)\ln\frac{k_m^2}{k_z^2 - \omega^2/c_l^2} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \frac{k_z^4 c_t^2}{\omega^2}\ln\frac{\omega^2/c_t^2 - k_z^2}{k_z^2 - \omega^2/c_l^2}\right\}^2 + \left\{\frac{\omega|\omega|}{c_t^2} - \frac{k_z^4 c_t^2}{\omega|\omega|}\right\}^2\right]^{-1}. \qquad (3)$$

Для анализа найденных выражений (2) и (3) построены графические зависимости W от k_z и ω. Полученные результаты обсуждаются в работе.

Список литературы

1. Eshelby J.D. Dislocations as a cause of mechanical damping in metals // Proc. Roy. Soc. London A. 1949. V. 197, N 1050. P. 396-416.
2. Нацик В.Д. Радиационное торможение дислокационных петель // Физика твердого тела. 1966. Т. 8, № 7. С. 2244-2246.
3. Нацик В.Д. Излучение звука дислокацией, выходящей на поверхность кристалла // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 8, № 6. С. 324-328.
4. Чишко К.А. Теория акустической эмиссии дислокации и трещин в кристаллах с внутренними и внешними границами: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07. НАН Украины, Физ.-техн. ин-т низких температур. – Харьков, 1994. 304 с.
5. Батаронов И.Л., Дежин В.В., Рощупкин А.М. Влияние центров пиннинга и рельефа Пайерлса на обобщенную восприимчивость дислокаций в реальных кристаллах // Изв. РАН. Сер. Физическая. 1993. Т. 57, № 11. С. 97-105.
6. Батаронов И.Л., Дежин В.В. Обобщенная восприимчивость и колебания дислокации в рельефе Пайерлса // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2018. Т. 15, № 4. С. 500-505.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. V. Статистическая физика. Ч. 1 – М.: Физматлит, 2002. 616 с.

ОБ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ СЕГМЕНТА КРАЕВОЙ ДИСЛОКАЦИИ В БЕЗДИССИПАТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ

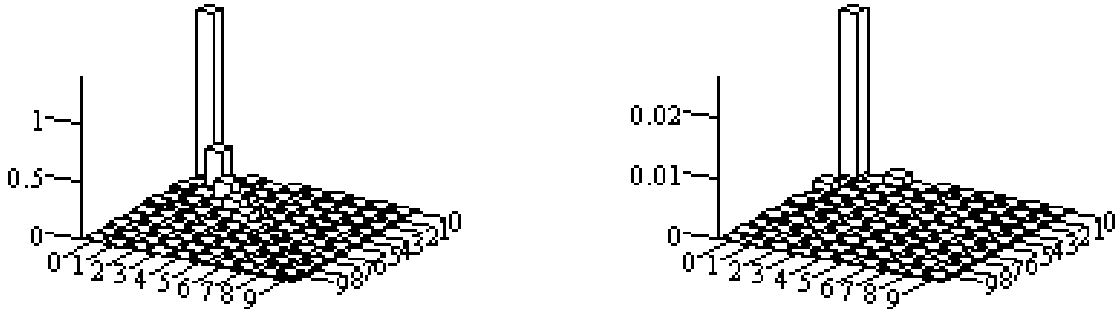
Дежин В.В.

Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Россия
viktor.dezhin@mail.ru

Первый расчет излучения упругих волн (для прямолинейной винтовой дислокации) был проведен Эшелби [1]. В дальнейшем Эшелби [2] и Лоте [3] независимо друг от друга рассмотрели излучение упругих волн колеблющимся дислокационным перегибом. Излучение упругих волн при колебаниях отрезка дислокации исследовалось в работах [4-6]. Задача об излучении упругих волн дислокацией произвольной формы в изотропной бездиссипативной среде была решена в работах [7-9]. Однако в этих работах не рассматривался спектр изгибных колебаний дислокационного сегмента. В настоящей работе рассмотрено излучение упругих волн (акустическая эмиссия) при колебаниях сегмента краевой дислокации с пользованием лагранжевого формализма. Сопротивление среды не учитывалось, поэтому торможение дислокации вызывалось только радиационном излучением (акустической эмиссией). В работе [10] найдены элементы матрицы обратной обобщенной восприимчивости сегмента краевой дислокации в бездиссипативном кристалле B_{mn}. С использованием этих результатов проведены численные и приближенные расчеты действительных и мнимых частей элементов матрицы обобщенной восприимчивости сегмента краевой дислокации α_{mn} [11, 12] ($\alpha = B^{-1}$).

В соответствии с общей теорией обобщенной восприимчивости [13], средняя величина энергии, диссипируемая в единицу времени под влиянием монохроматического излучения $W = \frac{\omega}{2}\operatorname{Im}\alpha(k_z,\omega)\left|f_0\right|^2$. Здесь ω – частота излучения, k_z – компонента волнового вектора вдоль линии дислокации, $\left|f_0\right|$ – амплитуда внешней силы, действующей на дислокацию. Для исследуемого случая колебаний сегмента краевой дислокации раскладываем в ряд смещение дислокации $\xi(z,\omega) = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n(\omega)\varphi_n(z)$ и внешнюю силу $f(z,\omega) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(\omega)\varphi_n(z)$ по системе ортогональных функций $\varphi_n(z) = \begin{cases}\cos(\pi n z/L), & n = 1,3,5,\ldots \\ \sin(\pi n z/L), & n = 2,4,6,\ldots\end{cases}$, где L – длина дислокационного сегмента, линия дислокации лежит вдоль оси Oz, и получаем матричное уравнение $\sum_n B_{mn}(\omega)Q_n(\omega) = F_m(\omega)$. Таким образом, энергию, излучаемую дислокационным осциллятором записываем в виде $W_{mn} = \frac{\omega}{2}\operatorname{Im}\alpha_{mn}(k_z,\omega)\left|f_0\right|^2$. Диагональные элементы обратной матрицы обобщенных восприимчивостей дислокационных осцилляторов существенно превосходят недиагональные элементы [11]. Причем из численных расчетов [11] видно, что элемент α_{11} (на рисунке нумерация начинается с нуля) является преобладающим до частоты 10^{10} Гц (рис.). В первом приближении для расчета излу-

чаемой энергии можно использовать только этот элемент. Аналогичное допущение сделали Гранато и Люкке [14] при расчете дислокационного амплитуднонезависимого внутреннего трения.



а) $|\mathrm{Re}\,\alpha_{mn}|$ *б*) $|\mathrm{Im}\,\alpha_{mn}|$

Рис. Модули матричных элементов обобщенной восприимчивости дислокационных осцилляторов для краевой дислокации, $k_{\mathrm{m}}L=100$, $\omega L/c_t=1$, где k_{m} – максимальное волновое число.

Полученные результаты обсуждаются в работе.

Список литературы

1. Eshelby J.D. // Proc. Roy. Soc. London A. 1949. V. 197, N 1050. P. 396-416.
2. Eshelby J.D. // Proc. Roy. Soc. London A. 1962. V. 266, N 1325. P. 222-246.
3. Lothe J. // J. Appl. Phys. 1962. V. 33, N 6. P. 2116-2125.
4. Stenzel G. // Phys. status solidi. 1969. V. 34, N 1. P. 351-364.
5. Stenzel G. // Phys. status solidi. 1969. V. 34, N 1. P. 365-376.
6. Garber J.A., Granato A.V. // J. Phys. and Chem. Solids. 1970. V. 31, N 8. P. 1863-1867.
7. Нацик В.Д. // Физика твердого тела. 1966. Т. 8, № 7. С. 2244-2246.
8. Бойко В.С., Нацик В.Д. // Элементарные процессы пластической деформации кристаллов. – Киев: Наукова Думка, 1978. С. 159-189.
9. Чишко К.А. Теория акустической эмиссии дислокаций и трещин в кристаллах с внутренними и внешними границами: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07. НАН Украины, Физ.-техн. ин-т низких температур. – Харьков, 1994. 304 с.
10. Bataronov I.L., Dezhin V.V. // J. Phys. Conf. Ser. 2016. V. 738. 012108.
11. Bataronov I.L., Dezhin V.V. // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 936. 012036.
12. Bataronov I.L., Dezhin V.V. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1203. 012060.
13. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. V. Статистическая физика. Ч. 1. – М.: Физматлит, 2002. 616 с.
14. Granato A., Lücke K. J. Appl. Phys. 1956. V. 27. P. 583-593.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Носов В.В.[1, 2a], Артющенко А.П.[1, 2b]

[1] *Санкт-Петербургский горный университет,*
[2] *Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*
[a] nosovvv@list.ru, [b] artemartyuschenko@gmail.com

Контроль и диагностика технических объектов направлены на обеспечение надежности и безопасности их эксплуатации, а также эффективности их функционирования. Ресурс и безопасность работы сложнонагруженных технических объектов различных отраслей промышленности определяются их прочностью. Представительной характеристикой прочности и показателем одного из свойств надежности объекта является время до его разрушения, лимитируемое моментом накопления критической концентрации повреждений. Для определения времени до разрушения объекта необходимо определить входящие в многоуровневую модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии нанохарактеристики прочности материала. Определение данных нанохарактеристик может быть полезным в области исследований по выявлению механизмов физико-химических процессов, происходящих в материалах в периоды изготовления и эксплуатации, для последующей оптимизации технологических процессов изготовления материалов. Для обеспечения возможности доступного взаимодействия с многоуровневой моделью временных зависимостей параметров акустической эмиссии требуется проведение мероприятий по усовершенствованию существующего программного обеспечения до такого уровня, на котором программное обеспечение смогло бы обеспечить автоматизированный процесс определения нанохарактеристик прочности материала и времени до разрушения объекта с минимальной неопределенностью.

Недостаточная надежность технических систем приводит к увеличению доли эксплуатационных затрат по сравнению с общими затратами на проектирование, производство и применение этих систем. При этом стоимость эксплуатации технических систем может во много раз превзойти стоимость их разработки и изготовления. Кроме того, отказы технических систем приводят к различного рода последствиям: потерям информации, простоям сопряженных с техническими системами других устройств и систем, к авариям. Для обеспечения возможности минимизации подобных рисков ведется развитие методов диагностирования, опирающихся на разработку программного обеспечения диагностических систем, предназначенных для автоматизированного определения остаточного ресурса технических объектов и нанохарактеристик прочности материалов. Перспективным эти разработки стали на основе многоуровневой модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии. В следствие того, что из-за сложности необходимых математических вычислений актуальность многоуровневой модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии не возрастает, разработка программного обеспечения несет с собой, в том числе, цель упростить процесс взаимодействия пользователя с данной моделью. Готовое программное обеспечение должно обладать понятным и современным интерфейсом, должно обеспечивать необходимый для полноценных контроля и диагностики функционал и возможность автоматизированного определения результатов.

Поиски возможности практического использования нано технологий диагностирования для оценки состояния технических объектов выделяет среди прочих метод акустической эмиссии (АЭ) и информационно-кинетический подход к АЭ диагностированию как наиболее перспективный с точки зрения наблюдения за процессом роста повреждаемости и оптимизации производственных технологий [1-3]. Основанный на многоуровневой модели временной зависимости параметров АЭ, оценке параметров интенсивности упругого однородного разрушения представительных структурных элементов изделия и универсальных прочностных наноконстант, подход объединяет традиционный экспериментальный подход к оценке ресурса [4] и кинетические представления о разрушении, позволяет отделить влияние на АЭ материала макро- и нано- факторов, по разному связанных с прочностью и акустико-эмиссионной активностью материала. В качестве АЭ характеристик прочности выступают многомодельные многоуровневые концентрационно-кинетические АЭ-показатели прочности, устойчивые к влиянию дестабилизирующих факторов АЭ контроля. Практическое применение подхода подробно описано в работах [3,5,6], где показана возможность эффективной оценки ресурса разнообразных технических объектов на основе информационно-кинетического подхода к их акустико-эмиссионному диагностированию. В качестве методологической основы взята многоуровневая модель временных зависимостей параметров АЭ, представленная формулой (1), описывающая их поведение в условиях прочностной и метрологической неоднородности.

$$N_{\sum}(t) = V \iiint\limits_{\Delta t, f, u} \Phi(\Delta t, f, u) du df d\Delta t \cdot C_0 \int\limits_{\mu}^{\mu+\Delta\omega} \psi(\omega) \left\{ 1 - exp\left[- \int\limits_{0}^{t} dt' / \theta\left(U_0, \omega(t')\right) \right] \right\} d\omega \qquad (1)$$

Связь модели с результатами традиционных усталостных испытаний позволяет объединить результаты АЭ контроля с широкой базой справочных данных, обеспечив снижение неопределённости в оценке ресурса опасных технических объектов.

В результате анализа требований к разрабатываемому программному обеспечению были определены следующие основные пункты требований:

- автоматизированное построение временных зависимостей диагностических параметров;
- автоматизированное определение линейного участка зависимости логарифма числа импульсов от времени (этап однородного разрушения) в качестве интервала для аппроксимации;
- автоматизированная аппроксимация зависимости регистрируемого числа импульсов АЭ от времени теоретической кривой для определения параметров функции распределения *ψ(ω)*.

Исходя из поставленных требований, можно выделить актуальные задачи проектирования разрабатываемого программного обеспечения:

- разработка алгоритма автоматизации процесса определения этапа однородного разрушения (процесса определения линейного участка зависимости логарифма числа импульсов от времени);
- разработка алгоритма автоматизации процесса определения оптимальных значений параметров функции распределения *ψ(ω)* для определения значения

остаточного ресурса технического объекта с минимальной неопределенностью.

Таким образом, создание предлагаемого программного обеспечения, основанного на многоуровневой модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии, обеспечит упрощение процесса взаимодействия потенциального пользователя с моделью и даст возможность потенциальному пользователю автоматизированно оценивать остаточный ресурс технических объектов с минимальной неопределенностью и проводить информативную оценку прочностных свойств материалов.

Список литературы

1. Петров, В. А. Сравнительный анализ методик определения ресурса / В. А. Петров, Г. В. Петров, О. Ю. Рыжов // Труды СПбГПУ /.— СПб., 2005 .— №494: Технологические и транспортные системы. Логистика .— С. 8-14 .— (Технологические системы) .— Библиогр.: с. 14.
2. Буйло С. И. Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики: монография / Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. – 184 с.
3. Nosov V. V. On the Principles of Optimizing the Technologies of Acoustic-Emission Strength Control of Industrial Objects// Russian Journal of Nondestructive Testing, 2016, 2016, Vol. 52, No. 7, pp. 386–399.
4. Borovkov, D.V. Mamchits, A.S. Nemov, A.D. Novokshenov. Problems of Modeling and Optimization of Variable-Hardness Panels and Structures Made of Layered Composites // Mechanics of Solids, 2018, v.53, n.1, pp. 93-100.
5. Носов В.В., Григорьев Е.В., Артюшенко А.П., Перетятко С.А. Многоуровневая модель временных зависимостей параметров акустической эмиссии как основа нанодиагностики состояния технических объектов // Нанофизика и наноматериалы: Сборник научных трудов / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2019. 322 с. (Международный симпозиум «Нанофизика и Наноматериалы» (НиН-2019)27 - 28 ноября, 2019 г., Санкт-Петербург), с.173-178
6. V.V. Nosov, Automated Evaluation of the Service Lives of Specimens of Structural Materials on the Basis of a Micromechanical Model of the Time Dependences of Acoustic Emission Parameters, Russian Journal of Nondestructive Testing, Vol. 50, No. 12 (2014) 719–729.

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ОТ СТЕПЕНИ ИСКАЖЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ФЕРРИТА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СТАЛИ

Соколов С.И., Веретенников А.А.

ООО «Газпром трансгаз Чайковский», г. Чайковский, Россия,
Andrey_59.83@mail.ru

ООО «Газпром трансгаз Чайковский» (ГТЧ) являясь одним из элементов Единой газотранспортной системы ПАО «Газпром», осуществляет транспорт газа по 15 крупнейшим в мире магистральным газопроводам (МГ). При этом значительная часть трубопроводов эксплуатируется более 30 лет, а климатические и географические особенности расположения трасс МГ ГТЧ, оказывают специфическое воздействие на трубопроводные системы подземного монтажа и обуславливают высокую

степень вероятности повреждения материала элементов трубопроводов коррозионным растрескиванием под напряжением (КРН) или стресс-коррозией.

Одним из наиболее перспективных методов выявления подобных развивающихся дефектов подземных участков технологических трубопроводов компрессорных станций (подключающие шлейфы, узлы подключения и т.п.) на сегодняшний день является акустико-эмиссионный контроль (АЭК).

Специфика конструктивных решений рассматриваемых участков МГ, определяет схему их нагружения внутренним давлением транспортируемого газа. Однако, особенности режимов работы смежных с обследуемым газопроводов, диктуют значения максимальных испытательных давлений, до которых возможно нагрузить исследуемый участок по описанной технологии проведения АЭК. Подчас это давление не превышает уровней воздействия, которому контролируемый участок был подвержен на предыдущем этапе жизненного цикла во время эксплуатации и является заведомо ниже испытательного давления, приложенного к элементам трубопровода ранее.

Эффект Фелисити позволяет рассчитывать на формирование эмиссионной активности при механических напряжениях, ниже их значений, соответствующих предварительно приложенной нагрузке т.е еще до момента достижения предшествующих нагрузок.

В настоящем докладе рассмотрена зависимость изменения параметров АЭ (амплитудное распределение сигналов АЭ, суммарного счета и др.) в зависимости от степени искажения кристаллической решетки (напряжений) ферритной составляющей поверхностных слоев образцов из ферритных, ферритно-перлитных (в том числе и сталей контролируемой прокатки) и перлитных сталей при статическом четырехточечном изгибе.

Показано, что коэффициент Фелисити (отношение величины приложенной нагрузки, при которой регистрируется АЭ, к максимальной величине нагрузки предыдущего цикла нагружения) для сталей разных классов, является переменной величиной.

Показана зависимость параметров АЭ от значений предела микропластичности (макроупругости), уровень которого не является строго постоянным, особенно в приложении к сталям контролируемой прокатки и определяется как «старение стали».

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. Нохрин А.В., Чувильдеев В.Н. Старение трубных сталей труб магистральных газопроводов. Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского, 2010, № 5 (2), с. 171-180.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Медведев К.А.[1], Терентьев Д.А.[2]

[1]ООО «НТЦ «ЭгидА», г. Москва, Россия, diez163@gmail.com
[2]ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ», г. Москва, Россия, tyev@mail.ru

Коррозия является одной из основных причин аварий и преждевременных отказов на промысловых трубопроводах. На рынке имеется множество решений для борьбы с коррозией – применение высоколегированных сталей, антикоррозионных покрытий, металлопластмассовых труб, ингибиторов коррозии, средств электрохимической защиты. Однако перечисленные методы приводят к существенному удорожанию труб, увеличению стоимости и продолжительности строительно-монтажных работ, дополнительным эксплуатационным расходам.

Альтернативой стальным трубам, лишенной перечисленных недостатков, являются стеклопластиковые трубы (СПТ). СПТ не подвержены коррозии, в том числе сероводородной, имеют малый вес (до 4-х раз легче стальных), позволяют экономить на логистике и строительно-монтажных работах (скорость сборки трубопровода из СПТ от 4 до 10 раз выше скорости сборки стальных труб с покрытием), что существенно снижает капитальные и эксплуатационные затраты.

Опыт применения СПТ в мире составляет более 50 лет. Примерно половина производимых СПТ используются в нефтедобыче в качестве насосно-компрессорных и обсадных труб, а также при строительстве линейной части промысловых трубопроводов. По оценке экспертов, в нефтедобывающих странах доля СПТ в общей протяженности трубопроводов достигает уже 10-20%, а в ближайшие 10 лет рынок будет показывать рост более чем на 5%.

В условиях столь широкого применения СПТ на взрывопожароопасных объектах большую актуальность имеет задача выбора надежных методов и средств диагностирования их технического состояния. Традиционные методы неразрушающего контроля (ультразвуковой, радиационный, магнитный, вихретоковый и капиллярный), применяемые обычно для диагностирования стальных трубопроводов, либо неприменимы для контроля СПТ, либо имеют весьма существенные ограничения.

Для решения вышеуказанной задачи огромным потенциалом обладает метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на регистрации и анализе упругих волн, распространяющихся в объектах при возникновении и развитии опасных дефектов. Однако в России применение метода АЭ для диагностирования СПТ сдерживается отсутствием нормативных документов, регламентирующих вопросы проведения и оценки результатов контроля.

В течение 2019 г. ООО «НТЦ «ЭгидА» и ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ» с участием НКО «Ассоциация «Ростехэкспертиза» на территории ООО «Татнефть-Пресскомпозит» проводился ряд исследований, целью которых являлась разработка методики АЭ-контроля СПТ в процессе их эксплуатации.

Процесс разработки методики АЭ-контроля СПТ состоял из следующих этапов:

- изучение существующей нормативной документации и мировых стандартов качества;
- оценка возможности применения различных методов неразрушающего контроля на СПТ;
- разработка и проведение экспериментальной части по определению акустических свойств и характеристик СПТ и фитингов;

– оценка и анализ полученных данных;
– создание и утверждение методики.

Объектами экспериментальных исследований выступали трубы и фасонные детали из стеклопластика следующей номенклатуры: трубы длиной 2 м и 9 м, муфты, отводы на 90° и тройники. Диаметр объектов составлял от 47 до 202 мм. Нагружение объектов проводилось до момента их разгерметизации с использованием гидравлического стенда YDELS-300. При нагружении основной части объектов использовались выдержки, которые либо устанавливались с шагом в 25% от номинального давления, либо назначались при появлении резкого роста АЭ-активности. В общей сложности было испытано более 30 объектов.

В качестве системы для сбора данных использовался 12-канальный акустико-эмиссионный измерительный комплекс A-Line DDM производства ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ» со специализированным программным обеспечением «A-Line 32D» (v.5.01). В качестве преобразователей АЭ использовались пьезоэлектрические преобразователи GT200 (производство ООО «ГлобалТест») с полосой пропускания 130-200 кГц и коэффициентом электроакустического преобразования не менее 60 дБ отн. 1 В/(м/с). Для обеспечения записи АЭ системой точных ежесекундных данных о величине давления к ее параметрическому входу был подлючен манометр АИР-20 (производство НПП «Элемер»), имеющий токовый выход.

По результатам проведенных исследований авторами доклада были получены следующие результаты:

1) Определены акустические параметры СПТ: коэффициент затухания – 2,96 дБ/м, скорость распространения АЭ-сигналов – 1304 м/с, рекомендуемое значение порога амплитудной дискриминации– 42 дБ.

2) При значениях давления, превышающих 2,2-3 раза номинальное, происходила разгерметизация СПТ в виде образования небольшой течи через отверстие шириной в доли миллиметра. В большинстве случаев разгерметизация происходила в области галтельных переходов, т.е. в местах с наибольшей концентрацией напряжений.

3) В 60-80% случаев разгерметизации СПТ предшествует уверенное превышение АЭ-активностью уровня 100 имп./с. В разных экспериментах длительность такого превышения составляла от 0 до 300 с. и зависела от скорости нагружения, а также от того, насколько близко давление на выдержке, выбираемое с шагом 25%, к разрушающему давлению.

4) Значения амплитуд, превышающие 60-80 дБ, соответствуют разрушению единичного волокна диаметром 20 мкм.

5) Наиболее информативным параметром для оценки технического состояния СПТ является АЭ-активность. Поэтому рекомендуется проводить нагружение без выдержек. Появление непрерывной АЭ следует считать признаком источника IV класса опасности. Превышение АЭ-активностью уровня 100 имп./с в течение 3-5 с. следует считать признаком наличия источника III класса, а наличие линейного роста АЭ-активности с нагрузкой при значениях активности от 10 до 100 имп./с – источника II класса опасности. Наличие сигналов с амплитудой выше 60 дБ следует считать признаком наличия источника I класса опасности.

Вышеуказанные результаты легли в основу проекта методики АЭ-контроля СПТ, проходящего на данный момент апробацию с целью дальнейшего применения на объектах ведущих российских нефтегазодобывающих компаний и последующего согласования с государственными надзорными органами.

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ КАК МЕТОД ЛАБОРАТОРНОГО ИЗУЧЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ КРУПНОМАСШТАБНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Дамаскинская Е.Е.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,
Санкт-Петербург, Россия
Kat.Dama@mail.ioffe.ru

В науках о Земле глобальной целью сейсмологических измерений и АЭ-измерений в шахтах является поиск параметров, которые изменяются характерным образом при приближении к катастрофическому разрушению. В естественных условиях горные породы находятся в сложном напряженном состоянии: давление вышележащих пластов, боковое сжатие, сдвиговые напряжения, возникающие из-за движения тектонических плит. В образовании разлома определенного размера участвуют разломы всех масштабов меньше его; следовательно, процесс разрушения должен быть исследован на всех уровнях. Это ключевой момент, позволяющий лабораторным исследованиям пролить свет на подготовку землетрясений. В связи с тем, что землетрясения в земной коре и явления АЭ в напряженных породах демонстрируют механическое и статистическое сходство в широком диапазоне аспектов, АЭ в образцах можно в ограниченном масштабе рассматривать как модель природных землетрясений. В отличие от натурных измерений, в лабораторных экспериментах имеется возможность дифференцировать влияние различных параметров на развитие процесса разрушения. Поэтому в данном обзоре основное внимание будет уделено лабораторным экспериментам по разрушению горных пород, в которых АЭ используется в качестве инструмента, позволяющего исследовать эволюцию дефектов.

За последние пять десятилетий было проведено большое количество лабораторных исследований. Анализировались изменения таких параметров, как активность, кумулятивные кривые, b-value (угол наклона графика повторяемости – распределения числа землетрясений по магнитуде), параметры модифицированного закона Омори (уменьшение числа сигналов после проскальзывания). Исследуется влияние степени гетерогенности материала на развитие процесса разрушения.

Прогресс в области экспериментальной аппаратуры, технологии АЭ-мониторинга и методологии обработки сигналов позволил добиться высокой точности определения координат гипоцентров источников (порядка первых миллиметров) и оценки излучаемой энергии. В результате стало возможным применение современных методов математической обработки временных и пространственных рядов для анализа АЭ данных. В ряде работ исследованы фрактальная размерность распределения гипоцентров АЭ сигналов и временных интервалов между сигналами, выполнен кластерный анализ. Применяются методы нелинейной механики: вейвлет-преобразования, анализ рекуррентных графиков, мультифрактальный анализ, машинное обучение и т.д.

Однако, несмотря на большой интерес к экспериментам по разрушению горных пород, который наблюдается в последнее десятилетие, остаются нерешенные вопросы:

1. Что является источником сигнала?

Необходимо использовать прямые методы наблюдения дефектов, которые позволят установить взаимно-однозначное соответствие между характеристиками источника сигнала и параметрами собственно АЭ-сигнала.

2. Какова связь параметров сигналов АЭ с параметрами образовавшегося дефекта?
3. Каким образом корректно учесть масштабный фактор при переходе от лабораторных образцов к натурным наблюдениям?

Ответы на эти вопросы необходимы для выяснения закономерностей процесса разрушения и построения физических моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 19-05-00248).

ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

Терентьев Д. А.[1], Иванов В.И.[2]

[1]*ООО «ИНТЕРЮНИС-ИТ», г. Москва*
[2]*НИИИН МНПО «Спектр», г. Москва*
tyev@interunis-it.ru

Характерной особенностью метода акустической эмиссии (АЭ) является его весьма высокая чувствительность к развивающимся дефектам, которая превосходит чувствительность других методов неразрушающего контроля и обусловлена тем, что при образовании и росте дефектов в твердом теле выделяется акустическая энергия значительной величины. Амплитуда сигнала АЭ при подрастании трещины на 0.01-0.1 мм достаточна для его регистрации и в сотни раз превышает расчетное изменение амплитуды ультразвукового (УЗ) сигнала, отраженного той же растущей трещиной при использовании обычных методов УЗ дефектоскопии. Это вызвано тем, что имеет место дифракция УЗ волны на дефекте, которая приводит к резкому уменьшению амплитуды эхосигналов, которая наступает при линейных размерах отражателя, меньших 0.2-0.5 длины волны.

Естественный предел чувствительности аппаратуры АЭ определяют собственные тепловые шумы преобразователя. Эти шумы ограничивают чувствительность приборов АЭ, которая может быть выражена в предельно возможной регистрируемой величине колебательного перемещения поверхности контролируемого объекта. Из всех видов акустических преобразователей наилучшие значения предельной чувствительности имеют пьезоакустические преобразователи. В различных статьях приведены теоретические и экспериментальные оценки их предельной чувствительности, которые находятся в диапазоне от основанной на значении мощности тепловых шумов величины $6.6 \cdot 10^{-17}$ м в полосе 1 кГц до величин порядка $10^{-13}..10^{-14}$ м, гарантированно регистрируемых любыми типами пьезоэлектрических преобразователей в реальных условиях.

В статьях, посвященных оценке минимального размера дефекта типа микротрещины или включений, критерий возможности регистрации, как правило, включает в себя произведение скорости развития дефекта и квадрата его размера. При максимально возможных скоростях развития дефекта (обычно, равных примерно 3000 м/с), его минимальный размер, при котором возможна регистрация АЭ сигнала, как правило, составляет величину порядка 0.35-10 мкм.

В статьях, посвященных движению дислокаций или распространению двойника, критерий возможности регистрации, как правило, включает в себя произведение радиуса дислокационной петли (размера двойника) и средней скорости. Показано, что энергия движения единичной дислокации в большинстве случаев недостаточна для превышения порога регистрации акустической эмиссии, однако АЭ аппаратурой может быть зарегистрировано синхронное движение большого числа дислокаций.

Приведенные выше значения предельной чувствительности получены без учета внешних шумов. В производственных условиях выявление подобных трещин существенно усложняется из-за действия внешних акустических шумов, электромагнитных помех, вибрации расположенного вблизи оборудования, а также больших расстояний между ПАЭ и источниками АЭ. Согласно ПБ 03-593-03, чрезмерные шумы должны быть идентифицированы и снижены как минимум до 20 мкВ на выходе преобразователя АЭ.

В докладе проведен обзор литературных источников, а также приведены результаты собственной оценки предельной чувствительности АЭ контроля.

ВЛИЯНИЕ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ НА РАБОЧУЮ ЧАСТОТУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Шитов Д. В., Жуков А. В., Пегушин Я.А., Ладыгин Ю.Н.

ООО «Стратегия НК»,
Екатеринбург, Россия,
22sdv@strategnk.ru

Преобразователь акустической эмиссии (ПАЭ) является первичным средством измерения в АЭ системе, поэтому оказывает существенное влияние на результат регистрации сигналов. Известно [1, 2], что частотные характеристики ПАЭ, установленного на поверхность объекта контроля, отличаются от ПАЭ, находящего в свободном состоянии.

Большинство объектов, контролируемых методом акустической эмиссии (АЭ), являются листовыми конструкциями, в которых распространяются волны Лэмба. Скорость волны Лэмба зависит от частоты и толщины объекта контроля [3]. Некорректно заданная скорость приводит к возникновению большой погрешности определения координат источника АЭ. Таким образом, для повышения достоверности и чувствительности акустико-эмиссионного контроля необходимо оценить степень влияния объекта на рабочую частоту ПАЭ.

Анализ проводился для образцов из низколегированных сталей с толщиной стенки от 4 до 270 мм. В измерениях участвовало несколько типов преобразователей без предусилителей с разной резонансной частотой. В качестве контактной среды использовалась вязкая смазка Литол-24, в качестве имитатора импульсов АЭ – имитатор Су-Нильсена. Регистрация сигнала производилась цифровым осциллографом без фильтров.

На предварительном этапе оценивались характеристики преобразователя, находящегося в свободном состоянии путём слома карандаша на протекторе. В дальнейшем исследовалось влияние объектов с плоской и криволинейной поверхностью на рабочую частоту.

Отмечается, что увеличение толщины объекта контроля снижает рабочую частоту, на которой регистрируется максимум энергии.

Как видно из рисунка 1, снижение рабочей частоты ПАЭ при его установке на объекты с плоской поверхностью разной толщины может достигать 50% от собственной резонансной частоты свободного ПАЭ. При этом для каждого типа ПАЭ существует некоторая предельная толщина, выше которой рабочая частота практически не изменяется.

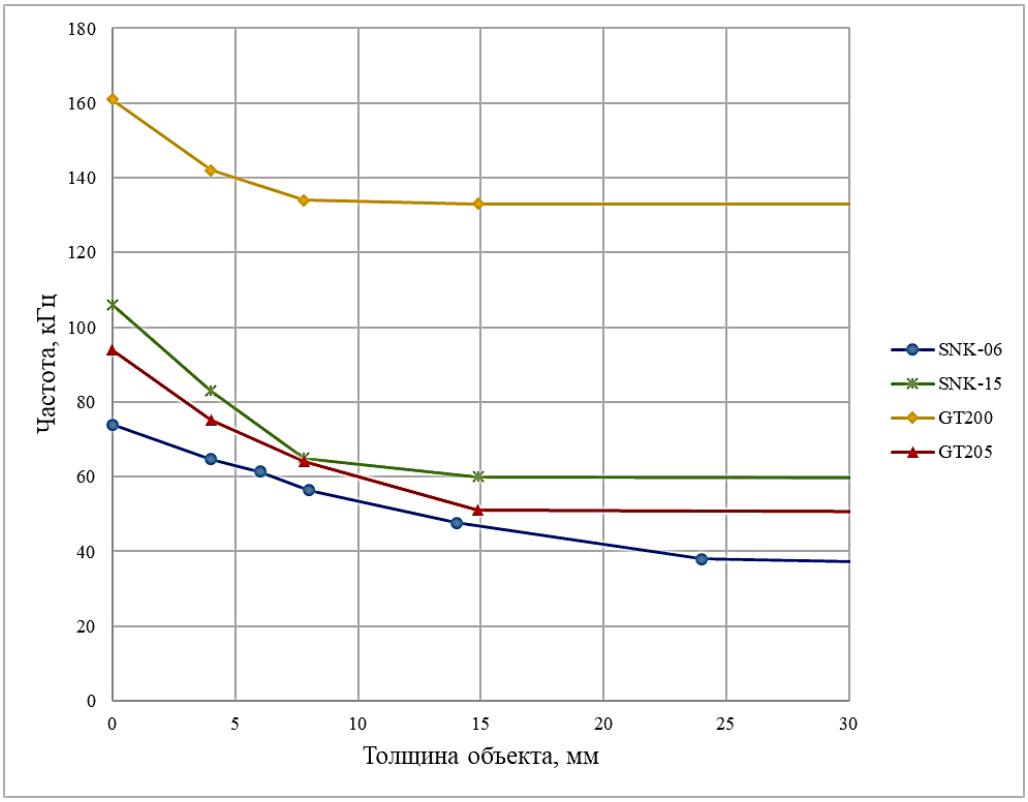


Рис. 1. Зависимость рабочей частоты ПАЭ от толщины объекта контроля

Уменьшение площади контакта ПАЭ с объектом контроля, напротив, приводит к увеличению рабочей частоты. Данный факт наблюдается при сравнении частотных характеристик преобразователя, установленного на плоскую и криволинейную поверхности объектов с одинаковой толщиной. Например, частота ПАЭ, установленного на трубопровод Ø57 мм, на 20% выше, чем частота ПАЭ, установленного на плоскую поверхность.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о существенном влиянии толщины объекта контроля и площади контакта на рабочую частоту ПАЭ. Данный факт необходимо учитывать при настройке параметров АЭ систем и оценивать при проверке работоспособности ПАЭ до проведения АЭ контроля.

1. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. / В.И. Иванов, В.А. Барат. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 368 с.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т.7. Кн.1. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
3. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. / И.А. Викторов. – М.: Издательство «Наука», 1966. – 169 с.

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ТРУБОПРОВОДАХ С ЖИДКОСТЬЮ ПРИ АЭ КОНТРОЛЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

Овчинников А.Л., Лапшин Б.М., Чекалин А.С.

ООО «Фонон», Томск, Россия
ovchinnikov@tpu.ru

Обычно при АЭ контроле герметичности трубопроводов величина скорости распространения сигналов АЭ полагается известной. Ее либо рассчитывают по известной формуле Жуковского, либо используют усредненное экспериментально измеренное значение. Как показывает практика, такой подход очень часто приводит к большим ошибкам в определении местоположения утечки, особенно в тех случаях, когда утечка расположена вблизи одного из датчиков. Обусловлено это рядом факторов. Во-первых, рассчитанная по формуле Жуковского скорость звука справедлива для больших по объему утечек. Во-вторых, в трубе может возбуждаться и распространяться нескольких типов волн, при этом эффективность регистрации того или иного типа волн зависит от способа и места установки датчика. В-третьих, скорость звука зависит от толщины стенки трубопровода и от его диаметра. Очевидным решением этой проблемы является измерение скорости звука в процессе контроля.

Одним из способов измерения скорости является проведение измерений при различных базовых расстояниях. На практике, например, при контроле теплотрасс, реализовать этот метод можно двумя способами. Для проведения второго измерения один из датчиков можно либо перенести в другую камеру, либо просто сместить на некоторое расстояние внутри одной камеры. Как правило, реализовать первый способ не удается, обусловлено это тем, что из-за ослабления звука в трубопроводе, сигнал в дальней камере не регистрируется вообще, либо регистрируются только его низкочастотные составляющие. При реализации второго способа из-за ограниченного объема камеры или шурфа, расстояние, на которое можно сместить датчик не превышает 1 – 2 метра. Теоретически при таких смещениях скорость звука по самым грубым оценках можно измерить с точностью до ± 10м/с. Такая ошибка при базе контроля 100м, будет приводить к ошибке локализации менее 1м, что вполне приемлемо. Для проверки этого утверждения был проведен ряд экспериментов, как на реальных трубопроводах, так и на экспериментальной установке. В результате испытаний было получено, что иногда метод дает совершенно не верные результаты.

В ходе экспериментов местоположение одного из датчиков не менялось, а местоположение второго последовательно изменялось на 1м. В результате был получен набор корреляционных функций, по которому было построено трех мерное распределение корреляционных максимумов в пространстве и во времени. На пространственно временном распределении было выделено четыре группы максимумов, через которые можно провести прямые линии. Наклон у этих линий различный, т.е. каждой из этих групп максимумов соответствует определенный тип волн. При этом не всегда максимумы одной группы имеют наибольшее значение для всех корреляционных функций. В этом и заключается ошибка при определении скорости. Оператор в двух измерениях выбирает два наибольших значения и по ним рассчитывает скорость, однако при этом нет ни какой уверенности, что два наибольших значения соответствуют одной и той же скорости. Чтобы избежать возникновения ошибок такого рода необходимо проведение не двух замеров, а трех или четырех. При этом для расчетов следует использовать не наибольшие максимумы, а максимумы лежащие на одной прямой.

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ТРЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ПО ТРУБОПРОВОДАМ СРЕДСТВ ОЧИСТКИ И ДИАГНОСТИКИ

Лапшин Б.М., Овчинников А.Л.

ООО «Фонон», Томск, Россия
fonon@bk.ru

Средства очистки и диагностики (СОД), движущиеся с потоком перекачиваемого продукта: скребки, поршни, механические разделители, профилемеры и дефектоскопы широко применяются при эксплуатации нефтегазопроводов для поддержания их внутренней полости в рабочем состоянии. При этом для решения технологических задач возникает необходимость в сопровождении СОД на участках трубопроводов от камеры запуска до камеры приема. Для этой цели используются сигнализаторы прохождения СОД, принцип действия которых основан на регистрации АЭ возникающей при трении манжет СОД о стенку трубы. В докладе рассмотрены экспериментальные результаты АЭ трения

На первом этапе экспериментов на лабораторной установке исследовались характеристики АЭ трения. Применялись образцы, изготовленные из материалов, применяемых на практике: полиуретана, полиэтилена высокого давления и маслобензостойкой резины. Использовался также образец в виде металлической щетки. Стенд позволял имитировать как сухое, так и мокрое трение образца о стенку трубы. Основные результаты этих исследований следующие: любое перемещение средств очистки и диагностики по трубопроводу вызывает возникновение сигналов АЭ; частотный спектр АЭ трения при движении по трубопроводу простирается от нуля до 500 кГц.

Для определения оптимальной частоты регистрации проводились экспериментальные исследования всех акустических шумов, которые могли иметь место на реальном работающем нефтепроводе. Эксперименты проводились на участке нефтепровода Александровское – Анжеро-Судженск. Во время проведения исследований по нефтепроводу пропускались манжетно-резиновый очистной скребок (СМР) и скребок переменного диаметра (СПД). Имитировались также различного рода шумы окружающего трубопровода. Прохождение очистных скребков по нефтепроводу сопровождались мощными широкополосными всплесками АЭ в диапазоне частот от 0 до 250 кГц, в то время как фоновый шум сосредоточен в низкочастотной области спектра. Эффективная ширина полосы частот помех достигала 50 кГц, при этом их мощность с повышением частоты снижается. По результатам проведенных исследований был выбран частотный спектр регистрации СОД по АЭ трения равным 150-180 кГц. В качестве критерия использовалось наилучшее отношение сигнал/шум.

По результатам испытаний был создан прототип прибора, который также испытывался на реальном нефтепроводе. Во время проведения испытаний по нефтепроводу были пропущены три очистных устройства СКР-3, СКР-2 и СКР-4. В результате было получено, что уровень сигналов АЭ трения в диапазоне частот 150-180 кГц достаточен для достоверной регистрации прохождения СОД. Акустические шумы, связанные с движением нефти по трубопроводу, и шумы, производимые в окружении трубопровода, никакого влияния не оказывают. Порог регистрации установлен оптимально не было зафиксировано пропусков и ложных срабатываний.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ШВОВ СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Казаков В.А., Карлов С.А., Сульженко В.А., Яковлев А.В.

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия,
V_Sulzhenko@ksrc.ru

Трубопроводные системы подводных лодок (ПЛ) после их окончательной сборки непосредственно на борту с помощью монтажных сварных швов должны подвергаться гидравлическим испытаниям на прочность давлением, равным 1,5 $P_{раб}$ [1]. Перед проведением гидравлических испытаний необходимо выполнить демонтаж различной арматуры (с последующим восстановлением) и отсоединение труб от баллонов (с последующим подсоединением), что приводит к увеличению трудоемкости и продолжительности выполняемых работ.

Кроме того, после испытаний необходимо провести качественную осушку трубопроводов, т.к. наличие в трубопроводах остатков влаги может привести к выходу из строя оборудования различных систем при эксплуатации ПЛ. Эта операция является еще более сложной и длительной.

Замена гидравлических испытаний на прочность давлением, равным 1,5 $P_{раб}$, на испытания сжатым воздухом давлением, равным 1,5 $P_{раб}$, по ряду организационных и технических причин, в том числе из-за отсутствия на заводах отрасли соответствующего компрессорного оборудования, оказалась невозможной. Поэтому была поставлена задача разработать способ достоверной оценки качества монтажных сварных соединений в процессе их пневматических испытаний при максимальном давлении, не превышающем величину рабочего.

В результате выполнения комплекса экспериментальных работ и натурных заводских испытаний специалистами ФГУП «Крыловский ГНЦ» было показано, что эта задача может быть решена с помощью метода акустико-эмиссионного контроля (АЭК). Разработанная методика АЭК монтажных сварных соединений воздушных и газовых трубопроводных систем ПЛ [2] была введена в отраслевой стандарт [1], в котором была регламентирована возможность замены гидравлических испытаний давлением 1,5 $P_{раб}$ на пневматические испытания давлением, равным 1,0 $P_{раб}$, при условии их сопровождения методом АЭ.

Практическая реализация упомянутой методики АЭК в последние годы успешно осуществляется специалистами ФГУП «Крыловский ГНЦ» при строительстве дизельных ПЛ на АО «Адмиралтейские верфи». За период с 2012 по 2019 гг. закончены работы по АЭ-контролю на 17 заказах проектов «Варшавянка» и «Лада», в настоящее время проводятся испытания еще на двух заказах.

В общей сложности за это время проконтролировано около 14 тыс. сварных швов. В результате применения АЭ-контроля почти в 350 швах выявлены источники АЭ класса опасности III, что соответствует наличию в данных сварных швах недопустимых, развивающихся дефектов. Кроме того, в одном из монтажных сварных швов трубопроводной системы на заказе зав. №01671 в процессе нагружения был зафиксирован АЭ-источник IV класса опасности, свидетельствующий о наличии недопустимого дефекта, имеющего катастрофическое развитие.

В настоящее время внедрение данной методологии проводится в АО «ЦС «Звездочка». С этой целью предварительно была выполнена опытно-штатная работа

на участке вновь изготовленного трубопровода воздушной магистрали заказа зав. №832, которая показала возможность применения имеющейся методики АЭК в конкретных цеховых условиях при модернизации атомной ПЛ.

Используемая методика АЭК распространяется на контроль качества сварных соединений трубопроводных систем воздуха высокого давления (ВВД) с рабочим давлением более 10,0 МПа. В виду высокой экономической эффективности применения методологии АЭ-контроля при сдаточных испытаниях трубопроводных систем, АО «НИПТБ «Онега» и АО «ЦС «Звездочка» обратились к ФГУП «Крыловский ГНЦ» с предложением по расширению методики для трубопроводов воздуха низкого давления (ВНД) с рабочим давлением до 1,0 МПа и воздуха среднего давления (ВСД) с рабочим давлением от 1,0 до 10,0 МПа.

С этой целью в АО «ЦС «Звездочка» была проведена экспериментальная работа по пневматическим испытаниям в сопровождении АЭ-контроля опытных образцов трубопроводов, сварные швы которых были выполнены как в полном соответствии с технологией сварки, так и с технологическими нарушениями для моделирования основных сварочных дефектов типа пор, непроваров и трещин.

По итогам проведенных испытаний установлено:

– напряжения, реализованные при нагружении опытных образцов в диапазоне давлений до 10,0 МПа, не позволили надежно выявить методом АЭ-контроля смоделированные объемные дефекты;

– при нагружении опытного образца, в сварных швах которого моделировались дефекты типа трещин, в диапазоне давлений от 8,0 до 10,0 МПа были зарегистрированы опасные источники АЭ, соответствующие критериям недопустимых, развивающихся дефектов.

Полученные результаты дали основание сделать следующие выводы:

1. Показана принципиальная возможность замены гидравлических испытаний на прочность давлением 1,5 $P_{раб}$ монтажных сварных соединений трубопроводов системы ВСД на испытания сжатым воздухом давлением 1,0 $P_{раб}$ при условии их сопровождения методом АЭ-контроля.

2. Применение метода АЭК позволит обеспечить безопасность проведения пневматических испытаний трубопроводных систем, а также выявить дефекты структуры материала сварных швов, склонные к активному развитию.

3. Комплексное использование радиографического контроля после изготовления монтажных сварных соединений для выявления объемных дефектов, а также метода АЭК в процессе пневматических испытаний с целью выявления развивающихся дефектов типа трещин позволит обеспечить эксплуатационную надежность трубопроводных систем ПЛ.

В конечном итоге, расширение применения методики АЭ-контроля для испытаний трубопроводных систем ВСД позволит дополнительно уменьшить трудоемкость и сроки строительства, ремонта и модернизации ПЛ на заводах отрасли.

Список литературы

1. ОСТВ5Р.5501–81 Системы корабельные и системы корабельных энергетических установок. Материалы и испытательные давления.
2. РД ИМЯН.219–2009 Монтажные сварные соединения. Трубопроводы воздушных и газовых систем изделий 21. Акустико-эмиссионный контроль. Методика.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В КОНСТРУКЦИОННЫХ КОМПОЗИТАХ

Зубова Е.М., Лобанов Д.С.

[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия,
cem.zubova@mail.ru

Композиционные материалы широко используются при изготовлении ответственных конструкций во всевозможных отраслях промышленности. Следовательно, растет необходимость в детальном изучении процессов образования дефектов и их локализации [1-2]. Задача определения местоположения дефектов является одной из основных и важных задач при мониторинге состояний конструкций. Для этого часто используют методы неразрушающего контроля, позволяющие непрерывно или в определенные моменты контролировать состояние объектов [3-6]. Один из таких методов – это метод акустической эмиссии (АЭ), с помощью которого можно обнаруживать не только источники повреждений в режиме реального времени, но и определять их местонахождение.

В данной работе поводилось экспериментальное исследование плоских образцов полосок углепластика на одноосное квазистатическое растяжение при комнатной температуре. Механические испытания проводились на универсальной электромеханической системе Instron 5989. Образцы нагружались с постоянной скоростью передвижения траверсы 1мм/мин. Для исследовательских целей использовались широкополосные пьезоэлектрические датчики акустической эмиссии AE144A (частотный диапазон 100-500 кГц) и предусилители AEP4 (коэффициент усиления 34 дБ). Датчики крепились на образцы с помощью высоковакуумной силиконовой смазки Wacker Silicon и резинок. Для решения задачи линейной локации сигналов АЭ использовалось два датчика АЭ). С помощью специальной программной функции были записаны диаграммы формы волны сигналов АЭ, извлечены значения частоты спектрального максимума (характеристика быстрого преобразования Фурье, частота, на которой располагается спектральный максимум) [7].

В результате получены значения общего числа зарегистрированных источников АЭ для всех образцов и число источников АЭ в различных диапазонах амплитуд. Построены графики распределения значений частот спектрального максимума сигналов АЭ по длине образца за все время проведения испытаний. Построены графики распределения зарегистрированных источников АЭ по всей длине образца. Полученные графики сопоставлялись с фотографиями разрушенных образцов. Показано хорошее совпадение между местоположением источников, полученных во время анализа сигналов АЭ с использованием алгоритмов линейной локации и реальными дефектами на образцах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-31-90148 и 19-41-590005.

Список литературы

1. Лобанов Д.С. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств полимерных композиционных материалов и панелей с заполнителем: дис. канд. техн. наук. -Пермь, 2015. -148с.
2. Anoshkin A.N., Vildeman V.E., Lobanov D.S., Chikhachev A.I. Evaluation of repair efficiency in structures made of fibrous polymer composite materials // Mechanics of Composite Materials — 2014 — Vol. 50 — No. 3 — pp. 311-316.
3. Zubova E.M., Strungar E.M., Lobanov D.S., Wildemann V.E. Experimental study of the damage accumulation in composite materials and ceramic coatings by using of acoustic emission technique // Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol.17. – p. 822–827.
4. Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., Спаскова Е.М., Чихачев А.И. Экспериментальное исследование влияния дефектов на прочность композитных панелей методами корреляции цифровых изображений и инфракрасной термографии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2015. — № 4. — С. 159-170.
5. Tretyakova T.V., Dushko A.N., Strungar E.M., Zubova E.M., Lobanov D.S. Comprehensive analysis of mechanical behavior and fracture processes of specimens of three-dimensional reinforced carbon fiber in tensile tests // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2019. - №1. – pp. 173-183.
6. Lobanov D. S., Strungar E. M., Zubova E. M., Wildemann V. E. Studying the Development of a Technological Defect in Complex Stressed Construction CFRP Using Digital Image Correlation and Acoustic Emission Methods // Russian Journal of Nondestructive Testing, –2019, –Vol. 55, –No. 9, – pp. 631–638.
7. Lobanov D. S., Zubova E.M. Research of temperature aging effects on mechanical behaviour and properties of composite material by tensile tests with used system of registration acoustic emission signal // Procedia Structural Integrity. – Vol. – 18. – 2019, pp. 347-352. DOI: https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.174.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ФГУП «ГХК»

Савельев В.Н.[1], Махмудов Х. Ф[1], Медведев В.Н.[2],Томилин Н.Г[2], Круглов С.Ю[2]

1Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,
Россия, Санкт- Петербург
[2]ФГУП «Горно-Химического Комбината» «Росатом» Россия,
г. Железногорск, Красноярский край,
h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Проведенные измерения скорости распространения упругой волны от удара шаром в слое бетона дали величину 3920 м/с. Оценка скорости волны в бетоне, произведенная с помощью расчета модуля упругости для плоской волны, составила величину 4343 м/с. По дисперсионным кривым для симметричной Лэмбовской моды S_1, и для симметричной нулевой моды S_0 было показано, что в случае действия источника упругих волн непосредственно в бе-

тонной обделке горной выработки, энергия ударного воздействия на горный массив преобразуется в распространяющиеся нормальные волны S_0 и S_1, обусловленные упругими свойствами бетона и толщиной обделки. Контролируемый массив горных пород сложен биотитовыми гнейсами. Измерения скорости упругих волн в массиве горных пород дали величину 5318 м/с. Было проведено измерение спектрального состава отклика массива горных пород на возбуждение его ударом шара, а также оценена энергии в упругой волне, формируемой ударом шара (0,3 Дж). Спектральная плотность возбуждения массива от удара шаром концентрируется в диапазоне 0,7 - 3,2 кГц.

-разработана методика измерения энергии АС в абсолютной шкале (Дж) и показана возможность ее применения для метрологического обеспечения системы АЭ мониторинга;

- разработана схема съемного датчика АЭ в комплекте с предварительным усилителем для установки в скважине диаметром 76 мм на закладной детали;

- оптимизирована методика определения координат источника АС для сред с переменным полем скоростей и предложен путь ее адаптации для условий подземных сооружений.

Список литературы

1. В.Н. Савельев, Х.Ф. Махмудов Исследование акустических свойств массива гетерогенных пород и бетонной обделки в натурных условиях. Журнал технической физики» Год 2020, вып 1,стр. 143-147.
2. В.С. Куксенко, Х.Ф. Махмудов. Экспериментальное и теоретическое изучение актов трещинообразования в гетерогенных материалах Геология и геофизика. 2017. Т. 58. №6. С. 915-923.
3. Х.Ф. Махмудов, В. Н. Савельев, Д .В Савельев, В. Н. Медведев, С. Ю. Круглов.. Проведение натурных исследований акустических свойств горного массива и бетонной обделки в подземных сооружениях ФГУП “горно-химического комбината” - предприятие госкорпорации “росатом” В книге (сборнике): сборник материалов: xxiii петербургские чтения по проблемам прочности,страницы: 136-137.
4. Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф. физические основы акустико-эмиссионного мониторинга. Актуальные научные исследования в современном мире. 2017. №10-4 (30). С. 145-152.

О КАЛИБРОВКЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Сазонов А.А.[1], Шелобков В.И.[1], Иванов В.И.[2]

[1]«ГИАП ДИСТ-центр», Москва, РФ
[2]НИИИН МНПО «Спектр», Москва, РФ
ivi444@mail.ru

Преобразователь акустической эмиссии (ПАЭ) является одним из основных элементов акустико-электронного тракта. Параметры ПАЭ определяют количество информации об источнике акустической эмиссии (АЭ) и принятия решения о состоянии диагностируемого объекта [1]. Собственные тепловые шумы ПАЭ ограничи-

вают предельную чувствительность аппаратуры АЭ. Частотные характеристики ПАЭ (АЧХ и ФЧХ) используются при выборе типа ПАЭ для контроля различных объектов с учетом условий контроля. Поэтому определение параметров ПАЭ при калибровке является одной из важнейших операций для оценки ПАЭ и возможности его применения в тех или иных условиях.

Существует много исследований параметров ПАЭ и методик их калибровки. Однако до сих пор не решен ряд вопросов, связанных с работой ПАЭ и описанием возможности их использования как при исследовании динамических процессов, так и при диагностировании промышленных объектов. В [1] предложено использовать в качестве основной характеристики ПАЭ – импульсную характеристику (ИХ). Однако до сих пор в качестве основной характеристики используют «одиночную» амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) без доказательства актуальности этого использования. Хотя АЧХ является «инвалидной», если одновременно не используется фазо-частотная характеристика (ФЧХ). Тем не менее в паспортах ПАЭ не приводятся импульсные характеристики и их параметры. Большинство фирм-производителей ПАЭ, дают в паспортах характеристики с использованием показателя В/Па(бар), что для ПАЭ - абсурдно.

В докладе приведен обзор ряда существующих методик по калибровке ПАЭ. Наиболее проработаны и обоснованы методики калибровки, представленные в стандартах [2, 3]. Достоинством стандарта [2] является оценка чувствительности ПАЭ измерением смещения поверхности объекта и напряжения на выходе ПАЭ. Для этого используют излом капилляра из стекла, генерирующего акустический импульс, эталонный ПАЭ, с известной чувствительностью и калибровочный блок большого размера. К достоинству стандарта ASTM E1106 можно отнести также указание на возможность измерения ФЧХ. Однако специфика измерения ФЧХ ограничивает его широкое применение этой характеристики.

Недостатком стандарта ASTM E1106 является использование совокупности продольных, поперечных и Рэлеевских волн. Различить воздействие поперечных и Рэлеевских волн не представляется возможным из-за близости скоростей их распространения. Кроме того, необходимо учитывать апертурный эффект. В стандарте [3] основное внимание уделено использованию ИХ для описания работы ПАЭ и приведены методики использования ряда схем калибровки ПАЭ.

Анализ большого числа методик и стандартов по калибровке ПАЭ показывает, что необходимы дополнительные исследования параметров ПАЭ и разработка ряда новых стандартов по калибровке ПАЭ.

Список литературы

1. Иванов В.И., Барат В.А., Акустико-эмиссионная диагностика: справ. М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 368 с.
2. ASTM E1106 - 12. Standard Test Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors.
3. РД 03-300-00. Требования к преобразователям акустической эмиссии, применяемым для контроля опасных производственных объектов.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБУСЛОВЛЕННОГО ДЕФОРМАЦИОННЫМИ И КОРРОЗИОННЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Деркачев И.С. [1], **Кустов А.И.** [1], **Мигель И.А.** [2]

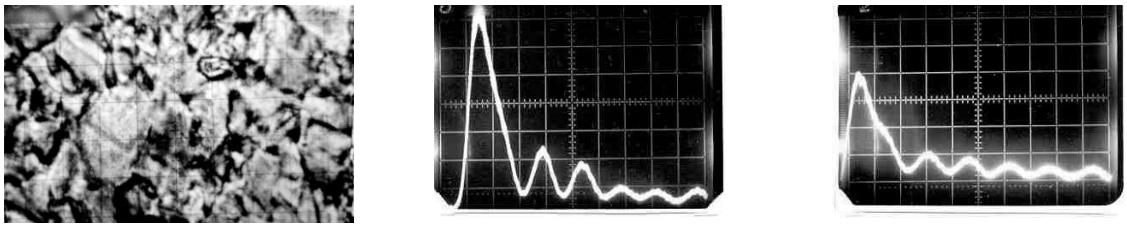
[1]*Воронежский государственный педагогический университет,*
[2]*Военный Учебно-Научный Центр ВВС Военно-Воздушной Академии им. профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина,*
Воронеж, Российская Федерация
akvor@yandex.ru

Металлические материалы играют ведущую роль в различных промышленных приложениях. Неизменно в процессе изготовления и эксплуатации изменяются их параметры состояния, значения которых можно оценить с высокой степенью надежности и объективности с помощью АМД-методов [1]. Актуальность данной проблемы обусловлена тем фактом, что материал разрушается по катастрофическому сценарию при накоплении определенных значений выделенных параметров. АМД-методы позволяют обнаружить и характеризовать предельное состояние материала, как с помощью акустической визуализации структуры, так и путем анализа формы характерных *V*(*Z*)-кривых.

Целью исследований было изучение изменений характеристик акустических волн (АВ), таких как $\Delta V/V\%$ и υ_R, где первая связана с коэффициентом затухания, а вторая – скорость поверхностных АВ. Известно, что четкость акустических изображений определяется соотношениями коэффициентов отражения и трансформации АВ. Поэтому, на снимках за счет акустического контраста различные по кристаллографической ориентации и степени деформации зерна проявляются как четко разделяющиеся объекты (рис.1*а*).

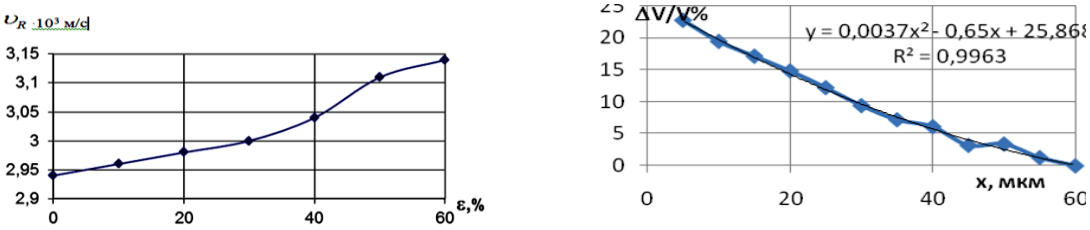
Акустическая характеризация образовавшихся при деформационных воздействиях областей в ходе дальнейших исследований проводилась с помощью метода *V(Z)*-кривых. Для каждого материала на основе этого количественного АМД-метода рассчитывали значения скорости υ_R поверхностных акустических волн (ПАВ) для участков, подвергшихся различным механическим воздействиям (рис.1 *б,в*). Эта характеристика является одним из параметров предельного состояния и чувствительна к структурным изменениям. Другим значимым параметром при характеризации предельных состояний является высота главного максимума *V(Z)*-кривых. Это характеристика металлических объектов информативна и позволила рассчитать и значения их упругих модулей *E* и *G*, и их плотности. На рис.2 представлена экспериментально наблюдаемая зависимость скорости ПАВ от степени деформации (для стали) и изменение коэффициента затухания АВ в никеле после деформации. Расчет значений коэффициента показывает, что слой воздействия составляет ~50 мкм. В процессе исследований была предложена и применена методика, позволяющая по форме *V(Z)*-кривых рассчитать значения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$. Полученные значения совпали с данными, представленными авторами ряда публикаций [2, 3]. При деформации объектов (из меди М1) наблюдали зависимости от времени величины суммарной деформации и величины коэффициента поглощения АВ в образцах (рис.3 *а* и *б*). Предложенные методы позволили определить координаты и оценть размеры зарождающихся неоднородностей в пространственно-ограниченных областях. При этом, сканировали режиме *V(Z)*-кривых поверхность образца при ее перемещении в

x-y-плоскости. На основе разработанной Ирвиным [4] механики разрушения, оценивали влияние трещин и подобных дефектов на степень предельности его состояния.



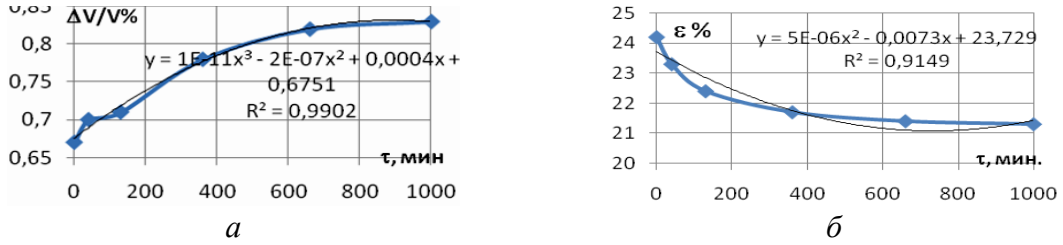
а *б* *в*

Рис.1. Акустомикроскопическая визуализация структуры стали со степенью деформации 50%, (Z = –14 мкм, масштаб 40 мкм/дел.) – *а*); трансформация (*б* и *в*) $V(Z)$-кривой стали 30ХГСМЛ после деформации 5% и 20% (υ_R = 3,18 ·10^3 м/с, ΔZ_N = 14,68 мкм, $(\Delta V/V\%)_{max}$ = 37%, масштаб по вертикали 1 дел.= 0,25 В, по горизонтали – 1 дел.= 12,2 мкм)



а *б*

Рис. 2. Зависимость υ_R от степени деформации (*а)*, для стали 30ХГСМЛ (υ_R = 3,18 ·10^3 м/с, ΔZ_N = 14,68 мкм. Изменение $(\Delta V/V\%)_{max}$ в никеле (Н0) после деформационного воздействия (*б)*



а *б*

Рис.3. Изменение коэффициента поглощения АВ Cu-проволоки от времени после деформации со скоростью 7,7 %/мин.) и зависимость суммарной деформации при разрыве от времени (Cu, ∅=1,1 мм, l =70 мм; закалка 380^{0}С до –50^{0}С).

Представленные результаты убедительно доказывают эффективность прогнозирования процесса разрушения металлических материалов с помощью акустических волн.

1. Kustov A. I., Miguel I. A. Analysis of the behavior of defective structures arising in solid materials, AMD-methods Fundamental problems of modern materials science., Vol. 13., No. 4., 2016. S. 490 - 496.
2. Physical quantities: reference book / A. P. Babichev, N.. Babushkina, etc.; ed. I. S. Grigoriev and E. Z. Meilikhov. - M.; Energoatomizdat, 1991. - 1232 p.
3. AddaY., J. Philibert La diffusion dans les solids. Paris: Press Universitaires de France, 1966, vol.2., p. 3. 87-95.
4. Ирвин, Д.Ж. Основы теории роста трещин и разрушения / Д.Ж Ирвин, П.Парис // Разрушение. Т.3. / под ред. Г. Либовиц. – М.: Мир, 1976. – С. 17–66.

СПОСОБЫ ДИАГНОСТИКИ СТАТИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ВЫЯВЛЕНИЕ В НИХ МИКРО- И НАНОТРЕЩИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Смородинова А.А. [1], Кустов А.И. [1], Мигель И.А. [2]

[1]Воронежский государственный педагогический университет,
[2]Военный Учебно-Научный Центр ВВС Военно-Воздушной Академии им. профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина,
Воронеж, Российская Федерация
akvor@yandex.ru

В промышленных и научных целях эксплуатируется огромное количество металлических объектов. Большинство их находится под действием статических нагрузок. Актуальной современной материаловедческой проблемой является проблема оценки стабильности свойств материалов этих объектов и диагностика их локального разрушения. Важно уметь выявлять области предельного состояния (ПС), с которых при минимальных внешних воздействиях может начаться катастрофическое разрушение. Поэтому, методы обнаружения и характеризации таких областей должны быть основаны на слабых, низкоэнергетических изменениях параметров материалов. Этим требованиям в полной мере соответствуют АМД-методы [1]. Они позволяют выявить и охарактеризовать предельное состояние материала как с помощью анализа формы характерных *V*(*Z*)-кривых [2] и с использованием метода акустической визуализации структуры.

Для металлических материалов АМД-методы обеспечивают получение подповерхностных изображений микроструктуры. При этом не требуется специальное химическое травление. Полученное в этом режиме акустическое изображение структуры одного из типов стали представлено на рис.1*а*. Размер зерна, определенный из акустического изображения позволяет рассчитать значение упругих модулей (см. 1, 2) и условного предела текучести (см. 3) материала [3]:

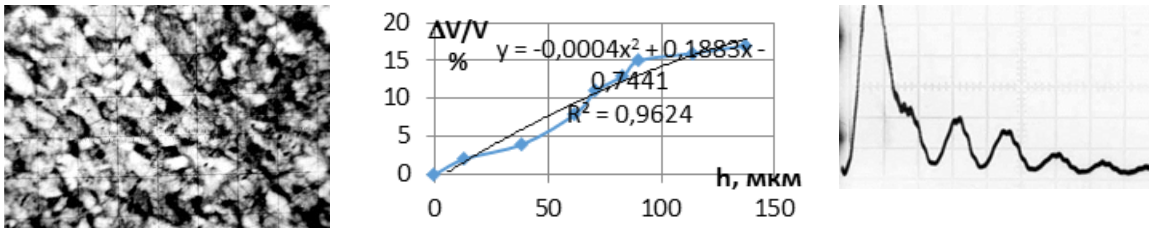
$$E = \upsilon_R^2 \cdot \frac{2\rho\cdot(1+\gamma)^3}{(0{,}87+1{,}12\gamma)^2};(1)\ G = \upsilon_R^2 \cdot \rho \cdot \left(\frac{1+\gamma}{0{,}87+1{,}12\gamma}\right)^2.(2)\ \sigma_{0,2} \cong \frac{G}{10^2 \cdot n \cdot \pi} \quad (3)$$

где ρ – плотность материала образца, υ_R скорость ПАВ в нем, γ – коэффициент Пуассона.

На рис.1*б* представлены результаты расчета свойств стали 15Х2НМФА с помощью метод *V*(*Z*)-кривых. Он демонстрирует зависимость коэффициента затухания (Δ*V*/*V*%) акустических волн (АВ) в стали от глубины зондирования (*h*). На следующем этапе рассчитывали величину скорости υ_R поверхностных акустических волн (ПАВ), используя метод *V*(*Z*)-кривых. Она, в сочетании с высотой главного максимума *V*(*Z*)-кривых – информативные акустические характеристики объекта (см. рис.1*в*). Именно они позволяют рассчитать и упругие модули *E* и *G*, и значения предела текучести $\sigma_{0,2}$. Эти же характеристики определяли с помощью экспериментальной зависимости σ–ε изучаемого материала. Участок упругой деформации позволяет рассчитать значения упругих модулей, а участок предельных напряжений предел прочности материала. Пример такого расчета для одного из сортов стали представлен на рис.2*а*.

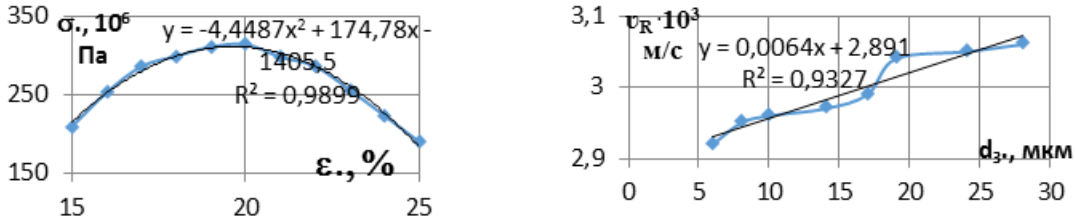
Затем, традиционными методами из экспериментально кривой σ - ε находили предел пропорциональности ($\sigma_{пц}$), условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$), предел прочно-

сти (σ_B). Вариант расчета σ_B с помощью функции «Поиск решения» *MS Excel* (ε., % = 19,64394, σ_B = 311,184 · 10^6 Па) представлен на рис.2*а*. Полученное значение в пределах погрешности совпадает со стандартным [4].



а *б* *в*

Рис. 1. *а* – акустическое изображение структуры стали 10Х12Н2ВМФ (масштаб: 20 мкм/дел., *Z* = – 17 мкм); *б* – зависимость величины затухания (*ΔV/V%)* АВ в стали 15Х2НМФА от глубины зондирования (*h*); *в* –- вид экспериментальной *V(Z)*-кривой в стали 33ХН3МА, (ΔZ_N = 13,22 мкм, и υ_R=2930 м/с), обеспечивающий оценку параметров ПС материалов



а *б*

Рис. 2. *а* – участок кривой σ-ε для одного из сортов стали; б – зависимость скорости ПАВ от размера зерна (ст. 38ХМЮА)

В ходе последующих экспериментов были разработаны и применены методики, позволяющие АМД-методами различать анизотропию упругих модулей (в 4-7%), а также выявлять локальные области ПС размером от 10 мкм. Их обнаружение проводилось как в режиме акустической визуализации, так и по изменению формы V(Z)-кривых.

Таким образом, представленные экспериментальные результаты подтверждают эффективность АМД-методов для диагностики статически нагруженных металлических объектов. Они позволяют надежно выявлять в таких материалах микро- и нанотрещины.

1. Weaver J.M.R., Ilett C., Somekh M.G., Briggs G.A.D. Acoustic microscopy of Solid Materials // Metallography . 1985 . V.17 . P. 3-34.
2. Кустов А.И., Мигель И.А. Определение параметров упрочнения или восстановления свойств поверхности материалов с помощью инновационных методов физического эксперимента – АМД-методов // Фунд. пробл. совр.материаловед., том 11, №4/2., 2014. – с. 592 -598.
3. Кустов А.И. Мигель И.А. Изменение акустических характеристик материалов как явление, сопровождающее их пластичность и разрушение // Вестник Тамбовского университета. Сер. Ест. и техн. науки. – Тамбов, 2016. – Т.21. – Вып.3. – 1464 с. (с. 1097-1101).
4. AddaY.,et. al. La diffusion dans les solids. Paris:Press Univers. de France, 1966, vol.2., p. 87-95.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Павленко И.А.[1,3], Носов В.В.[1,2]

Санкт-Петербургский горный университет[1]
Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого[2]
ООО «СПбЭК-Майнинг»[3]
nosovvv@list.ru, nosov_vv@pers.spmi.ru,
pavlenko_van@mail.ru

Определение критериев, связанных с оценкой ресурса, является актуальной задачей, определяющей возможность продления или вывода оборудования из эксплуатации. Подшипники качения диагностируют, не определяя параметров, характеризующих скорость развития дефектов и рисков эксплуатации. Возникающие дефекты образуются в структуре материала и выходят на поверхность после накопления усталостных повреждений, определяя стадию и скорость развития можно судить о риске эксплуатации такого оборудования.

В подшипниках качения при проведении АЭ диагностики чаще всего используют температурные и виброакустические критерии, которые не определяют опасность эксплуатации подшипников с обнаруженными дефектами, а только имеют возможность обнаружения ранних стадий образования поверхностных дефектов. Определение остаточного ресурса сводится к вычислению интегральных показателей или сравнение с диагностическим признаком, связь которых с ресурсом прослеживается слабо. В основе диагностики, определяющей опасность обнаруженных дефектов, должен лежать принцип информативного моделирования временных зависимостей параметров АЭ [1, 2]. В большинстве же современных подходов в работе с акустико-эмиссионными сигналами отсутствует методика, определяющая время до разрушения, риск и опасность обнаруженного дефекта [3,4].

Определение ресурса подшипника обеспечивается путем обработки данных регистрации во время статического нагружения наружного кольца подшипника, опираясь на микромеханику процесса накопления повреждений в структуре материала. Применяется принцип информативного моделирования, показывающий связь между сигналами и ресурсом подшипника. Генерация информации производится путем определения параметров многоуровневой модели, полученной в результате иерархически-логически согласованного информационного перехода от сигнала АЭ к ресурсу подшипника. Такой подход определения степени опасности дефектов позволяет, опираясь на оценку интенсивности разрушения представительных структурных элементов, определить прогностический этап накопления повреждений в структуре исследуемого материала и тем самым выйти на прогнозирование ресурса.

Определение опасности дефектов по обработке сигналов акустической эмиссии можно свести к определению информативного параметра АЭ и по его значению судить об остаточном ресурсе подшипника качения. Проведено сравнение по информативности концентрационно-кинетического, энергетического и амплитудного акустико-эмиссионных критериев с напряжениями возле искусственно созданных дефектов.

1. Носов В.В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов// Дефектоскопия, № 7, 2016, с. 52-67.

2. Носов В. В. RU 2617195 Способ оценки прочности элементов сварного корпуса подводного аппарата
3. Мазнев А.С., Федоров Д.В., Потапенко В.С. Акустико-эмиссионная диагностика для подшипниковых узлов. //Локомотив 2003, №11, с 28-31.
4. Потапенко В.С. Подшипник под контролем. //Промышленная безопасность 2004, №1, с 29.

АНАЛИЗ ТЕНЗОРА СЕЙСМИЧЕСКОГО МОМЕНТА ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Пантелеев И.А.

ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия,
pia@icmm.ru

Настоящая работа посвящена разработке и программно-аппаратной реализации комплекса алгоритмов, направленных на определение тензора сейсмического момента событий акустической эмиссии, зарегистрированных в лабораторных экспериментах по деформированию образцов хрупких материалов. Проведена модернизация и адаптация алгоритмов восстановления компонент тензора сейсмического момента, широко используемых в сейсмологии, к данным акустической эмиссии. Разработанный авторами комплекс алгоритмов включает в себя алгоритмы предварительной подготовки данных акустической эмиссии: алгоритм определения времени вступления P-волны, двустадийный метод уточнения решения пространственной задачи локации на основе USBM метода, процедуру абсолютной калибровки датчиков акустической эмиссии и последующей деконволюции волновых форм для определения абсолютной величины амплитуды P-волн; и алгоритмы непосредственной инверсии тензора сейсмического момента, включая 4-ступенчатую процедуру уточнения решения.

Апробация разработанного комплекса алгоритмов проведена на акустико-эмиссионных данных, полученных при трехточечном изгибе образцов мрамора месторождения Коелга. Последовательно решены задачи определения и уточнения механизмов событий акустической эмиссии. Установлено, что преобладающее большинство механизмов относится к трещинам сдвига с различной величиной дополнительной объемной составляющей. Анализ распределений угла погружения двух нодальных плоскостей для найденных решений показал наличие преимущественного направления погружения в районе 35–40 градусов. По направлению подвижки найденные механизмы источников акустической эмиссии являются сбросами и взбросами.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ХОДЕ ПРЕРЫВИСТОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Шибков А.А., Желтов М.А., Золотов А.Е., Денисов А.А., Гасанов М.Ф., Кочегаров С.С., Кольцов Р.Ю., Суркова Д.А.

Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Россия, Тамбов
shibkov@tsu.tmb.ru

Как известно, наиболее чувствительным методом исследования динамики дефектов кристаллических материалов на мезоскопическом и макроуровне является метод акустической эмиссии (АЭ). Исследование методом АЭ пластических неустойчивостей на макроскопическом уровне проводили, в основном, в условиях проявления эффекта Портевена-Ле Шателье (ПЛШ) – появления повторяющихся скачков напряжения при деформировании с заданной скоростью $\dot{\varepsilon}_0 = const$ [1-4]. Обнаружено, что каждый скачок напряжения сопровождается всплеском дискретной АЭ [2, 3], который по визуальным наблюдениям коррелирует с формированием деформационных полос ПЛШ.

В предыдущих работах авторов [6, 7] динамика деформационных полос исследовалась методом АЭ в низкочастотной области ~ 10 Гц – 10 кГц и синхронно видеосъемкой поверхности с временным разрешением 40-50 мкс и пространственным ~ 10 мм/пиксель в условиях прерывистой ползучести алюминий-магниевого сплава АМг6. Установлено, что основной вклад во всплеск АЭ дает образование завершенной полосы, а первый пик во всплеске АЭ с временем нарастания ~1 мс хорошо коррелирует со скачком скорости падения напряжения. Цель настоящей работы – исследовать, какую информацию о динамике индивидуальной полосы деформации несет высокочастотная, в полосе ~ 0.05 - 1 МГц, дискретная АЭ.

С помощью синхронной регистрации данных силового отклика, видеосъемки со скоростью 5000 кадр/с и акустического отклика в полосе частот от ~ 50 кГц до ~ 1 МГц в условиях прерывистой ползучести алюминий-магниевого сплава АМг6, установлено, что самая ранняя и наиболее быстрая стадия формирования полосы деформации, продолжительностью несколько миллисекунд, связанная с зарождением и ростом зародыша полосы, выходом ее на поверхность и последующим ускоренным расширением полосы, сопровождается генерированием всплеска АЭ длительностью ~ 3-10 мс. Сложная структура этого всплеска включает ~ 10^3 дискретных импульсов АЭ длительностью ~ 1-10 мкс различной амплитуды. Наиболее информативный характеристикой всплеска АЭ, вызванного формированием одиночной полосы деформации, является форма и амплитуда огибающей акустического всплеска, которые как установлено хорошо коррелируют с формой и амплитудой скорости роста скачка разгрузки системы машина-образец (Рис. 1). Выявлены степенные функции распределения амплитуд дискретных сигналов АЭ в структуре акустического всплеска при формировании полосы, а также монофрактальность временной структуры всплеска АЭ с фрактальной размерностью D = 1.69, рассчитанной с помощью R/S-анализа по методу Хёрста [5]. Полученные результаты свидетельствуют о коллективной самоорганизующейся динамике дислокационных лавин в структуре формирующейся полосы макролокализованной деформации.

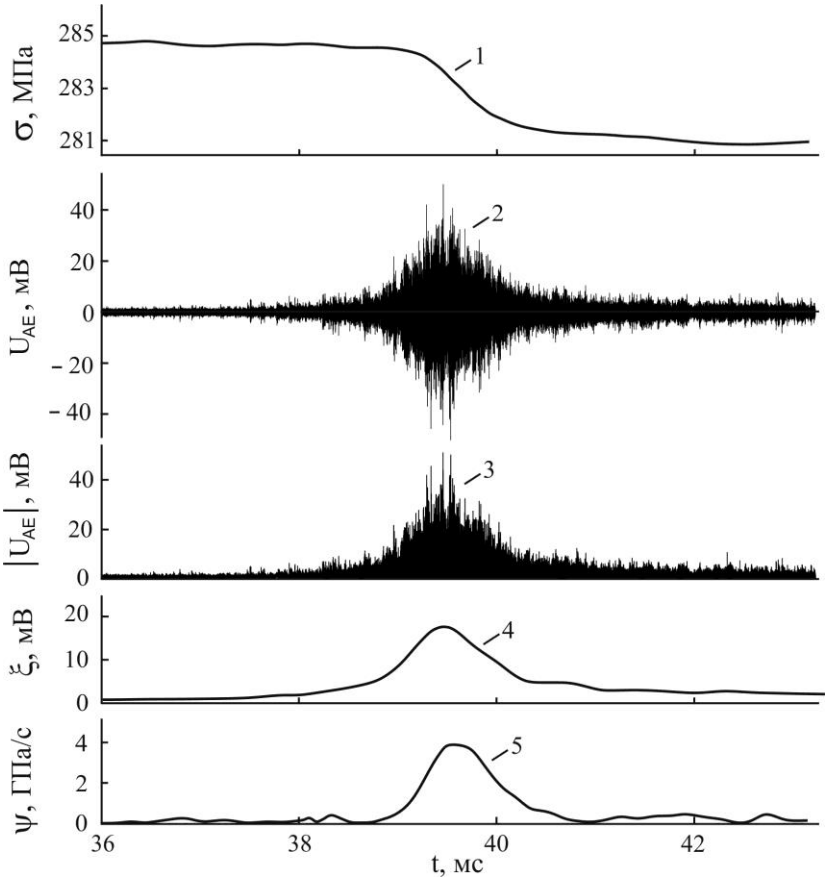


Рис. 1. Скачок разгрузки σ (1) и акустический сигнал U_{AE} (2), вызванный формированием индивидуальной полосы деформации, абсолютная величина сигнала АЭ $|U_{AE}(t)|$ (3), его огибающая ξ (4) и абсолютная скорость изменения напряжения ψ (5)

Полученные в [6, 7] и в настоящей работе результаты дают прямое экспериментальное доказательство дислокационной природы сигналов АЭ, сопровождающих прерывистую деформацию металлов и сплавов, основанное на установленной связи между всплеском сигнала АЭ и динамикой деформационных полос. Кроме того, в этих работах выявлено информационное содержание низкочастотной (в звуковом диапазоне) и высокочастотной (ультразвуковой) составляющей акустического сигнала, генерируемого в ходе формирования деформационных полос в алюминий-магниевом сплаве.

Работа выполнена при поддержке РНФ (Проект № 18-19-00304) и РФФИ (Проект № 19-08-00395 А).

1. Chmelik F., Klose F.B., Dierke H. et al. // Mater. Sci. Eng. A. 2007. V. 462. P. 53.
2. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. // ФММ. 1996. Т. 81. N 1. P. 156.
3. Криштал М.М., Хрусталев А.К., Разуваев А.А. и др. // ДРМ. 2008. № 1. С. 28.
4. Lebyodkin M.A., Shashkov I.V., Lebedkina T.A. // Phys. Rev. E 88, 042402 (2013).
5. Федер Е. Фракталы. − М.: Мир, 1991, 262 с.
6. Шибков А.А., Желтов М.А., Гасанов М.Ф. и др. // ФТТ. 2017. № 12. С. 2363.
7. Shibkov A.A., Zheltov M.A., Gasanov M.F. et al. // Mater. Sci. Eng. A. 772 (2020) 138777.

АКУСТИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Шибков А.А., Желтов М.А., Золотов А.Е., Денисов А.А., Гасанов М.Ф., Кочегаров С.С., Суркова Д.А.

Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Россия, Тамбов
shibkov@tsu.tmb.ru

Проведены эксперименты по исследованию динамики и статистики деформационных полос в условиях проявления прерывистой деформации Портевена – Ле Шателье (ПЛШ) алюминий-магниевого сплава АМг6 в водной среде (дистиллированной воде, 3%-м водном растворе NaCl и морской воде) комплексом in situ методов – акустической (АЭ) и электрохимической (ЭХЭ) эмиссии – синхронно с высокоскоростной видеосъемкой распространяющихся деформационных полос.

Показано, что, несмотря на более высокую чувствительность метода АЭ, интерпретация акустического сигнала представляет более сложную задачу по сравнению с таковой для сигналов ЭХЭ. Последние имеют колоколообразную форму без затухающих осцилляций, характерных для сигнала АЭ.

Показано, что сигналы электрохимической эмиссии – скачки электродного потенциала деформируемого сплава, – являются отображением сложной пространственно-временной структуры деформационных полос на одну степень свободы. Выявлен ”магистральный“ сет сигналов – совокупность сигналов ЭХЭ, отображающая структуру деформационных полос ПЛШ, остановившихся или проходящих через сечение образца, через которое пройдет магистральная трещина. Такая структура полос: а) спонтанно формируется в течение всей стадии прерывистой деформации; б) генерирует дискретные сигналы ЭХЭ с возрастающей амплитудой; в) включает в себя геометрически сопряженные полосы деформации, которые образуются для компенсации изгибающего момента, вызванного эволюцией отдельной полосы с избытком дислокаций одного механического знака. В ходе прерывистого течения после достижения деформации Консидере сопряженные полосы ПЛШ постепенно с каждым последующим скачком напряжения формируют крестообразную структуру локализованной деформации шейки, в центре которой зарождается магистральная трещина (рис. 1). Выявлен ”электрохимический предвестник“ разрушения сплава АМг6 в водной среде – серия сигналов ЭХЭ, отображающая дискретный характер формирования шейки. Форма фронта последнего сигнала ЭХЭ отражает кинетику подрастания трещины до момента разрыва образца. Установленные корреляции сигналов ЭХЭ с динамикой дислокационных полос не зависят от выбора водной среды. Вместе с тем, рост электропроводности водной среды в ряду «дистиллированная вода – 3%-ый раствор NaCl – морская вода» вызывает соответствующее уменьшение амплитуд сигналов ЭХЭ.

Сигнал ЭХЭ, таким образом, является полезным физическим инструментом непрерывного мониторинга деформационных полос и трещин в алюминиевом сплаве, деформируемом в водной среде [1]. Полученные результаты могут быть использованы для разработки технологии мониторинга зон локализации деформации и трещин в конструкциях или изделиях из алюминиевых сплавов, которые эксплуатируются в водных средах.

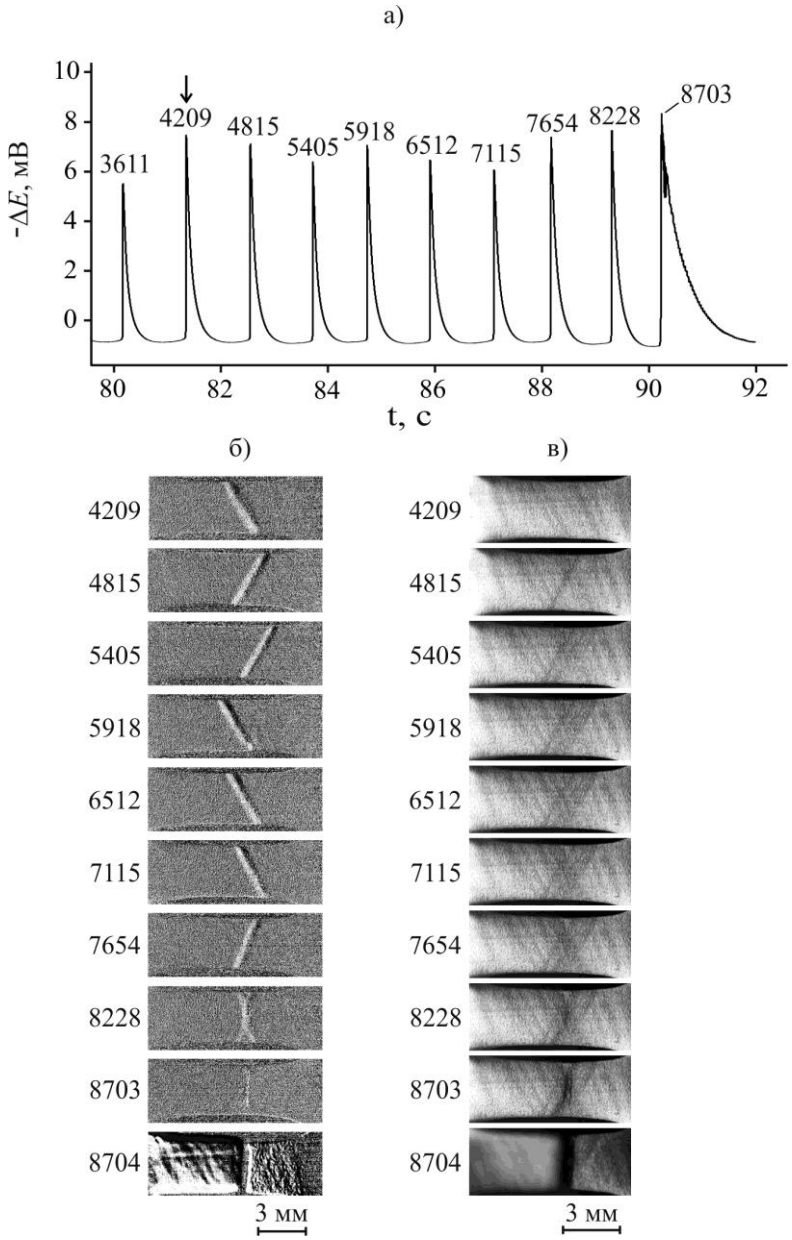


Рис. 1. Временные и видеоряды на стадии предразрушения: а – фрагмент сигнала ЭХЭ на стадии образования шейки; б и в – соответствующие этому фрагменту данные видеосъемки локализации деформационных полос вблизи магистрального сечения; б – обработанные компьютерной программой вычитания последовательных изображений; в – необработанные кадры видеосъемки. Числа – номера кадров видеосъемки со скоростью 500 кадр/с. Стрелкой отмечен момент достижения максимальной нагрузки. Скорость деформации $\dot{\varepsilon}_0 = 3\times10^{-3}$ с$^{-1}$. Среда – дистиллированная вода. T=300 К

Работа выполнена при поддержке РНФ (Проект № 18-19-00304) и РФФИ (Проект № 19-38-90145 Аспиранты).

1. Шибков А.А., Гасанов М.Ф., Золотов А.Е., Желтов М.А., Денисов А.А., Кольцов Р.Ю., Кочегаров С.С. // Журнал технической физики. 2020. № 1. 85-92.

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ИМИТАЦИИ КОРРОЗИИ В НАГРУЖЕННОЙ ПЛАСТИНЕ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА

Беляев В.С., Бычков В.Б., Судденок Ю.А., Тябликов А.В., Шорин В.Н.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»)
belyaev@vniiftri.ru

Метод акустической эмиссии (АЭ), внедренный за последние пятьдесят лет во многие области техники и отрасли промышленности, доказал свою эффективность в диагностике разного рода дефектов. В то же время для случаев микродеструкции материала, происходящей на ранних стадиях коррозии, вероятность обнаружения дефектов остается достаточно низкой. В появившихся в последнее десятилетие публикациях описан ряд успешных применений методов АЭ при диагностике коррозионных дефектов в магистральных трубопроводах (см., например, работы [1, 2]). Однако эффективность применения методов и аппаратуры АЭ в этой области во многом связана с тем, что в толстостенной (16 мм для трубы диаметром 1020 мм) оболочке коррозионный процесс может развиваться, без ущерба для перекачки продукта, достаточно долго и обнаруживается он уже на стадии появления каверны значительных размеров. Серьезное влияние оказывает здесь также имеющаяся и используемая возможность ступенчатого подъема внутреннего давления относительно нормального рабочего значения. Совсем иная ситуация наблюдается в таких областях, как авиация и космонавтика, где приходится иметь дело с оболочками (пластинами) толщиной 2-3 мм, и где коррозию необходимо обнаружить при весьма незначительных поражениях (с глубиной ниши до 2 мм и меньше). Отметим, что в таких тонких пластинах акустико-эмиссионный сигнал от возникшего дефекта распространяется в виде волны Лэмба.

В докладе излагаются результаты лабораторных экспериментов, целью которых была регистрация сигналов АЭ, возникающих в тонкой пластине-образце при имитации коррозии. Для имитации использовался традиционный для ускоренных коррозионных испытаний способ, основанный на травлении образца раствором соляной кислоты слабой концентрации. Образцами служили пластины алюминиевого сплава АМг6, длиной 660 мм, сечением 40х3 кв. мм, с зауженной средней частью шириной 20 мм. На концах образца были высверлены отверстия для его закрепления в растягивающем устройстве. Механическое напряжение, создаваемое растягивающим усилием в узкой части пластины, в процессе экспериментов поддерживалось в пределах 1…13 кгс/кв.мм, то есть материал находился в пределах упругих деформаций – предел текучести его составляет 17-19 кгс/кв.мм; значение напряжения контролировалось по показаниям тензодатчика. Преобразователь АЭ устанавливался на пластину вертикально, в узкой её части, и прижимался с силой от 0,22 до 5 Н. Пластины располагались горизонтально, на лабораторных штативах, через резиновые прокладки. Для травления просверливались лунки диаметром 2 мм и глубиной 0,5…2 мм в центральной области пластины. Лунки заполнялись 2-процентным раствором соляной кислоты с помощью дозатора так, чтобы объём раствора составлял 1,5…6 мкл. Два преобразователя (для возможности сопоставления) устанавливались симметрично относительно лунки на расстоянии 11…15 см от неё. Использовались датчики GT300 и ПАЭР2500.

Обработка сигналов АЭ производилась с помощью универсального цифрового осциллографа LeCroy, обеспечивающего, наряду с регистрацией сигналов, также вычисление спектра сигнала и счет регистрируемых импульсов. Осциллограф работал в режиме запуска по достижению сигналом некоторого уровня, превышающего уровень шумов, с таким расчетом, чтобы выбросы в шумах не приводили к запуску. Следующий запуск мог произойти через время не менее 1 мс. Фиксировалось количество запусков осциллографа в минуту. От времени превышения регистрировалась сигналограмма длительностью 1 мс. Для зарегистрированных сигналограмм делалось БПФ, которое усреднялось по 200 реализациям, и узкополосный (полоса 1 кГц) спектр представлялся в логарифмическом масштабе относительно порогового значения 1 мВт в диапазоне частот до 1 МГц. Измерялся в каждом случае также спектр фоновой помехи (до заполнения лунки) и разностный спектр, получаемый вычитанием уровней помехи из уровней сигнала. Измерения проводились как с образцами в нагруженном состоянии (при указанных выше напряжениях), так и с ненагруженными, а также при ступенчатом изменении нагрузки.

В докладе приводятся примеры полученных сигналограмм и спектров.

На этапе измерений с ненагруженным образцом коррозионный процесс, вызванный воздействием дозы в 5 мкл, продолжался до 60 минут; пик интенсивности АЭ по каналам обоих датчиков приходился на интервал времени от 15-й до 40-й минуты измерительного кадра. При этом датчиком GT300 принималось не более 30 импульсов АЭ в минуту, а максимальное количество принимаемых датчиком ПАЭР-2500 импульсов составило около 380.

Графики, отражающие динамику процесса АЭ после инжекции дозы кислоты, представлены в докладе.

Большой объем измерений был выполнен с нагруженным образцом. Под воздействием растягивающего усилия (оно доводилось до величины, создающей напряжение, равное 13 кгс/кв.мм) увеличивается длительность процесса АЭ. Растет активность АЭ. Число импульсов АЭ резко возрастает через ≈20 мин после ступенчатого подъема напряжения до указанного значения, доходя почти до 600 импульсов в минуту. Эти результаты, полученные при использовании датчика ПАЭР-2500, иллюстрируются в докладе таблицами и графиками.

Проведенные эксперименты, с имитацией коррозии в тонкой пластине 2-процентным раствором соляной кислоты, позволяют, по мнению авторов, рассчитывать на эффективное применение методов АЭ в диагностике коррозии на начальных этапах в пластинах и тонкостенных конструкциях. Это может оказаться полезным в создании и эксплуатации авиакосмических средств.

Список литературы

1. Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И. Диагностика технических устройств. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. Глава 3.
2. Созонов П.М., Кузьмин А.Н., Жуков А.В., Шагалова К.А., Гущин Д.А. Выявление и оценка степени опасности стресс-коррозионных дефектов объектов магистральных трубопроводов с применением метода акустической эмиссии на предприятиях ПАО "Газпром"//Журнал "Территория "НЕФТЕГАЗ", №12, декабрь 2015г.

ПРОЧНОСТЬ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ КАМЕР, КОЛЛЕКТОРОВ, АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА

Савельев В.Н.[1], Махмудов Х.Ф.[1]

[1]*Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН*
Россия, Санкт- Петербург
h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Исследованы аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа. Эти аппараты предназначены для охлаждения технологического газа. Анализ технической документации проводился с целью установления номенклатуры подлежащих контролю параметров технического состояния, выявления имевших место отказов и повреждений и участков элементов, дефектность которых может привести к отказу. Использованная методика акустической эмиссии (АЭ) показала наиболее полную и прямую информацию о развитии (степени опасности) дефектов в материале эксплуатируемых объектов. АЭ контроль может применяться в качестве определяющего для выработки критериев состояния различных сооружений и допуска к дальнейшей эксплуатации промышленных объектов (обеспечивая при этом необходимый уровень безопасности на время их работы), поскольку при АЭ контроле дефект может быть обнаружен на ранней стадии развития [1] При применении метода АЭ с целью разработки технологии контроля конкретных объектов решены сложные вопросы, связанные с явлением формирования упругих волн от развивающихся трещин и трансформации этих волн при распространении от трещин до датчиков [2]. Разрушение нагруженного тела является процессом сложным, чтобы исследовать этот процесс, его закономерности, характерные стадии, последовательность стадий, в развитии (степени опасности) дефектов и учитывая особенность материала и эксплуатации объекта АВО, применены различные методы [3]. Контроль производился приборами (толщиномер ультразвуковой БУЛАТ 1М, твердомер 54-359М, дефектоскоп ультразвуковой А1214 ЭКСПЕРТ, зав. №: 205125) , но заключение о состоянии объекта было дано только после того как примерно метод АЭ. Минимально допустимые значения толщин элементов выбраны согласно методики определения остаточного ресурса АВО газа, эксплуатируемых на компрессорных станциях РАО «Газпром» и расчета по СНиП 2.05.06-85. В нижнем кольцевом сварном шве АВО газа в одном (ст.№201) обнаружен дефект, других дефектов в металле сварных соединений обследованных аппаратов АВО (ст. №№ 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208), препятствующих их дальнейшей эксплуатации, не выявлено. Заключение о возможности дальнейшей эксплуатации аппарата, сделано по результатам обследования АВО газа методом АЭ.

1. Савельев В. Н., Махмудов Х. Ф. ЖТФ, 90, 143-148, 2020
2. Махмудов Х. Ф. Успехи современного естествознания, 10, 73-78, 2019
3. Makhmudov Kh. F., J. Phys.: Conf. Ser., v.1400, 7 ArtNo: #077057, 2019

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АУСТЕНИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ ТРИП-СТАЛИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Москва, Россия
pokrasin@gmail.com

В работе исследовано влияния режимов отпуска на кинетику фазовых превращений, дислокационную структуру, акустико-эмиссионные (АЭ) и механические свойства высокопрочной аустенитно – мартенситной стали с повышенным содержанием мартенсита деформации в приповерхностных слоях [1,2]. Проведено исследование влияние электролитно-плазменной полировки (ЭПП) на комплекс механических свойств тонколистовой аустенитно – мартенситной трип-стали ВНС9 – Ш. Материалом исследования была холоднокатаная лента толщиной 0,273 мм из аустенитно – мартенситной трип - стали ВНС9-Ш (23Х15Н5АМ3-Ш). Химический состав стали ВНС 9-Ш, % (мас.): 0,25 C; 14,5–16,0 Cr; 4,8–5,8 Ni; 2,7–3,2 Mo; Mn ≤1,0; Si ≤0,6; 0,03-0,07 N; S ≤0,01; P≤0,015; Fe-основа. Структура стали представляла собой смесь мартенсита деформации и нагартованного аустенита [3]. Количество мартенсита деформации в поверхностном слое ленты составляло 68,5% (рентгеновский метод) . Объемное содержание мартенсита в ленте, исходя из данных магнитных измерений было не более 30%. Рентгенофазовый анализ был проведен с использованием рентгеновского дифрактометра Ultima IV фирмы Rigaku (Япония) снабженного высокоскоростным детектором D/teX.

Определение механических свойств, исследованных серий из стальной ленты ВНС9 – Ш, при статическом растяжении проводилось на малошумной механической машине Instron 3382 со скоростью деформации V = 5 мм/мин, а испытания на усталость в условиях повторного растяжения с постоянным минимальным напряжением цикла σ_{min} = 100 МПа на сервогидравлической испытательной машине Instron 8801. Образцы для испытаний на статическое растяжение и усталость имели форму двойной лопатки с размером рабочей части 20х25 мм и радиусом перехода к более широкой части 50 мм.

а *б*

Рис.1. Акустико – эмиссионная диагностическая система СДС1008 (*а*) и схема крепления преобразователей АЭ (D1-D2) на образце в захватах испытательной машины Instron 3382 (*б*)

Исследование акустической эмиссии образцов трип – стали ВНС9-Ш проводилось с использованием АЭ диагностической системы СДС1008 [4], обеспечивающей регистрацию амплитудных, энергетических и спектральных

характеристик сигналов АЭ в частотном диапазоне 50–1000 кГц, а также линейных координат источников АЭ вдоль рабочей части образца. Программные средства АЭ системы обеспечивали локацию АЭ сигналов на короткой базе (50–100 мм) рабочих образцов и позволяли определять текущие координаты локальных областей зарождения пластической деформации, процессов сдвигообразования и фазовых превращений.

В работе показано, что электролитно – плазменная полировка градиентной трип-стали ВНС9 – Ш снижает количество мартенсита в поверхностном слое с 65 до 31%, однако уровень статических механических свойств при этом практически не изменяется; электролитно-плазменная полировка образцов приводит к повышению интенсивности образования мартенсита деформации в процессе статического растяжения по сравнению с исходным состоянием, а также к повышению предела усталости в условиях повторного растяжения (с 900 до 1000 МПа), но несколько снижает долговечность до разрушения. С использованием рентгенофазового анализа и метода акустической эмиссии показано, что в процессе циклического деформирования образцов из стали ВНС9 – Ш наблюдается добавочное образование мартенсита деформации, а уровень напряжений пределов усталости исходного материала и после проведения электролитно-плазменной полировки образцов определяется процессами микротекучести.

В работе с применением метода АЭ исследовано влияния температуры отпуска в интервале температур 450 – 900 ^{0}С на изменение механических свойств и фазовые превращения в тонколистовой аустенитно - мартенситной трип - стали ВНС9 – Ш с 100% содержанием мартенсита деформации в поверхностных слоях при интегральном содержании 80 – 85%. Показано, что при температуре отпуска свыше 450 ^{0}С наблюдается процесс обратного мартенситного превращения в аустенит и происходит резкое снижение прочностных характеристик. Изучена кинетика структурных изменений и фазовых превращений, происходящих в трип – стали после отпуска при различных температурах по данным АЭ контроля.

Работа выполнялась по государственному заданию № 075-00947-20-00 и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-08-00368а).

1. Терентьев В.Ф., Рощупкин В В., Пенкин А.Г., Пенкин М.А. Влияние содержания мартенсита на механическое поведение и акустико-эмиссионные характеристики тонколистовой трип-стали при статическом растяжении // Деформация и разрушение материалов. 2019. № 12. С. 36–41.
2. Пенкин А.Г., Терентьев В.Ф., Рощупкин В.В., Слизов А.К., Сиротинкин В.П. Анализ стадийности деформации трип-стали методом акустической эмиссии // Деформация и разрушение материалов. 2016. № 10. С. 35-41.
3. Терентьев, В. Ф., Слизов А.К., Просвирнин Д.В. и др. Влияние фазового состава поверхностного слоя на механические свойства тонколистовой трип-стали 23Х15Н5АМ3-Ш // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 7. С. 30–33.
4. Пенкин А.Г., Терентьев В.Ф., Маслов Л. И. Оценка остаточного ресурса работоспособности трубных сталей с использованием методов акустической эмиссии и кинетической твердости. М.: Интерконтакт Наука, 2005. 69 с.

ОСОБЕННОСТИ РАДИАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИКЕЛИДА ТИТАНА В ПРУТКАХ ПОСЛЕ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ

Черняева Е.В. [1*], **Чернявская Н.В.**[2], **Андреев В.А.** [3,4], **Вьюненко Ю.Н.** [5]

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*
lena@smel.math.spbu.ru
[2]*Донецкий Физико-технический институт, Донецк*
[3] *Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия*
[4] *ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ», Москва, Россия*
[5]*ООО "ОПТИМИКСТ ЛТД", Санкт-Петербург, Россия*

Проведено исследование калориметрических свойств, характеристик акустической эмиссии (АЭ) при индентировании, а также микротвердости сплава Ti–55,15 вес.%Ni в прутке диаметром 10 мм после теплой ротационной ковки [1]. Измерения проводили вдоль радиуса дискообразных образцов толщиной 2 мм.

Калориметрические измерения проводили на дифференциальном сканирующем калориметре Metler Toledo 833E. Для этого вдоль радиуса были вырезаны образцы объемом 2–6 мм^3. Результаты исследования приведены в работе [2]. На рис.1 приведены калориметрические данные, отражающие поглощение тепловой энергии при нагреве и выделение ее при охлаждении образца, вырезанного из приповерхностного слоя. Скорость изменения температуры во время опытов поддерживали равной 10 оС/мин.

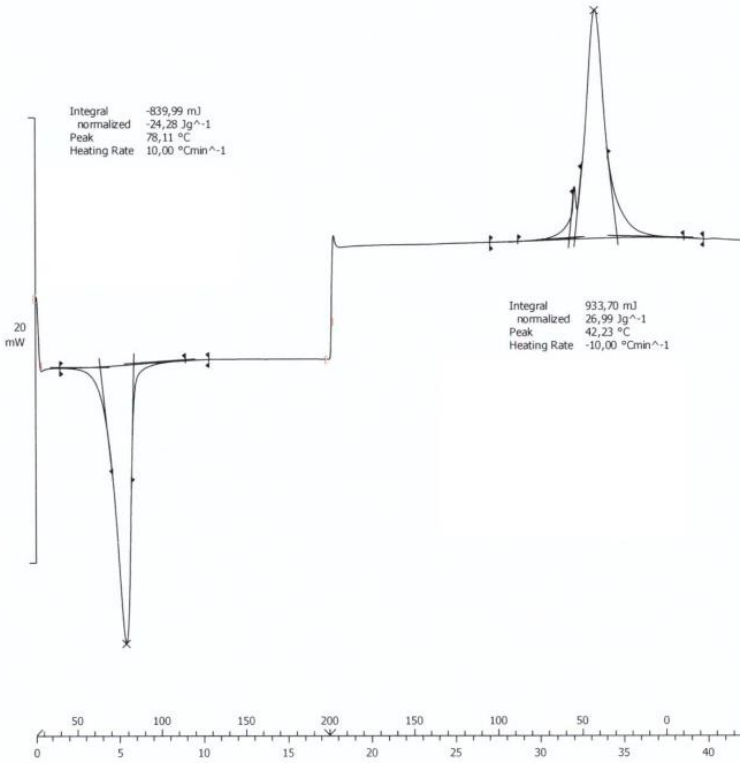


Рис. 1. Калориметрическая кривая для образца, вырезанного из приповерхностного слоя прутка TiNi

Величина удельной теплоты превращения оказалась практически одинаковой в любой зоне испытаний. В приповерхностной и промежуточной области температурные границы обратного превращения практически совпали. Лишь в центральной зоне температуры A_s и A_f оказались выше примерно на два градуса.

Распределение микротвердости вдоль радиуса образца никелида титана носит немонотонный характер (рис. 2).

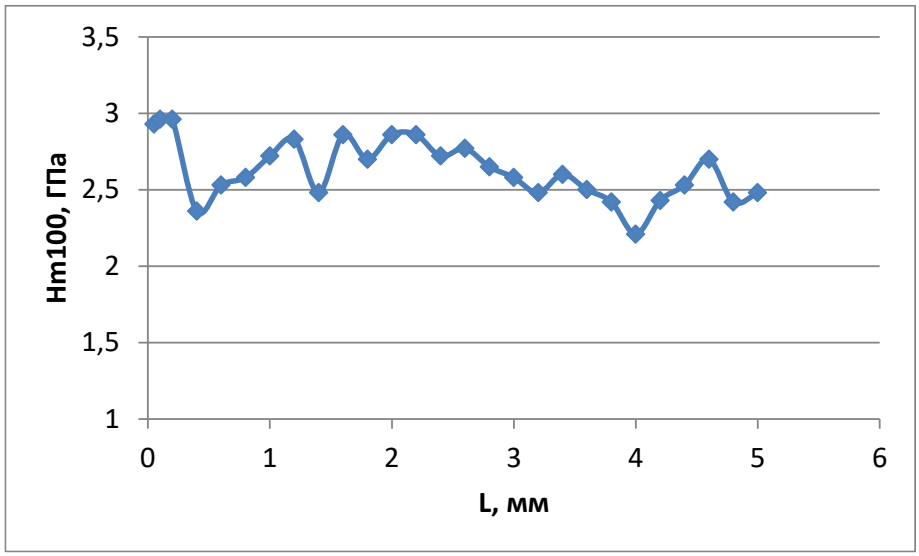


Рис.2. Распределение микротвердости $H_{\mu 100}$ вдоль диаметра (10 мм) образца от поверхности до центра. *L* – расстояние от внешнего края до места измерения

Наибольшая величина микротвердости зафиксирована у поверхности образца. На расстоянии 0,5 мм наблюдается снижение $H_{\mu 100}$ примерно на 14%, зона минимальных значений расположена примерно в 4 мм от поверхности, а в самом центре образца отмечен рост микротвердости порядка 17%.

Энергетические спектры сигналов АЭ сильно также сильно зависят от зоны индентирования. По мере удаления от центра образца происходит увеличение высокочастотной составляющей спектра [2].

Таким образом, было обнаружено различие в радиальных зависимостях механических и тепловых свойств в прутках никелида титана после ротационной ковки.

1. Андреев В.А., Юсупов В.С., Перкас М.М., Просвирнин В.В., Шелест А.Е., Прокошкин С.Д., Хмелевская И.Ю., Коротицкий А.В., Бондарева С.А., Карелин Р.Д. Механические и функциональные свойства промышленных полуфабрикатов из сплава тн-1, полученных теплой ротационной ковкой и РКУП//Деформация и разрушение материалов. 2017. №4. С.43-48
2. Черняева Е.В., Андреев В.А., Вьюненко Ю.Н. Радиальное распределение физических свойств в прутках из никелида титана после теплой ковки// Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки, 2018. - Т.23, № 122. – С. 310-313

ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

[1,2] Носов В.В., [1] Перетятко С.А.

[1]Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
[2]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
nosovvv@list.ru, sabperetyatko@gmail.com

Решение проблем повышения надежности, безотказности и эффективности влияет на результаты выполнения таких задач как постепенная замена основных, уже устаревших, фондов и сокращение затрат на ремонтно-восстановительные работы теплоэнергетического оборудования. Замена оборудования на предприятиях происходит медленными темпами. В данных условиях все внимание и силы направляются в сферу научных разработок, решения задач совершенствования методов и средств оценки теплоэнергетического оборудования. [1]

Разрушение или отказ в работе оборудования, вызванные теми или иными причинами, зачастую завершают функционирование любой технической системы Количественно оценить работоспособность можно с помощью следующих критериев: прочность, жесткость, износостойкость, стойкость к специальным воздействиям. Прочность является одним из основных критериев работоспособности для оборудования.

В большинстве случаев, причины повреждений, такие как снижение прочности и дальнейшее повреждение материала оборудования, диагностируется непосредственно после аварий. Контроль объектов теплоэнергетической отрасли должен обеспечивать информацией о возможном разрушении и являться средством предупреждения аварий. Приказом федерального агентства по техническому регулированию и метрологии РФ от 13.11.2008 №309-ст. утвержден и введен в действие новый стандарт ГОСТ Р 53006-2008 выделяют следующие наиболее перспективные экспресс-методы диагностики: метод акустической эмиссии (АЭ); метод магнитной памяти металла (МПМ); тепловой контроль. Из них наиболее перспективным выделяют метод акустической эмиссии.

Существующий информационно-кинетический подход, включающий в себя математическую модель микротрещенообразования, обладает уровнем точности для определения остаточного ресурса как нового, так и старого оборудования. [2]

Для оптимизации процессов контроля и универсального применения АЭ-диагностирования данный метод должен рассматриваться в качестве компонента комплекса сбора и обработки информации для описания связей между происходящими в металлах процессов, надежности и АЭ-диагностических показателей. В связи с этим, описание следует проводить с установления происходящих в объектах исследования процессов разрушения, определяющих прочность, анализа данных, полученных экспериментальным путем, формулированием критерия и показателей прочностной неоднородности. Согласно микромеханической модели, модель процессов накопления концентрации микротрещин в гетерогенных материалах:

$$C(t) = C_0 \int_{\mu}^{\mu+\Delta\omega} \psi(\omega) \left\{ 1 - exp\left[- \int_0^t \frac{d\bar{t}}{\theta(\omega(\bar{t}))} \right] \right\};$$

ψ(ω) – описывает разрушение при прочностной неоднородности, представляет собой функцию плотности распределения параметра ω по структурным элементам контролируемого объёма *V* материала (рис. 1).

Графическое распределение можно разбить на две части, где «колокол» - область малых, незначительно изменяющихся значений ω, принадлежи наиболее долговечностным структурным элементам, «хвост» - область распределения бо̀льших значений и значительное изменение значений ω, принадлежи наименее долговечностным структурным элементам.

Микромеханическая модель временных зависимостей параметров АЭ имеет вид:

$$\xi(t) = V \iiint_{\Delta t,f,U} \Phi(\Delta t, f, U) dU df d\Delta t \cdot C_0 \int_{\mu}^{\mu+\Delta\omega} \psi(\omega) \left\{1 - exp\left[-\int_0^t \frac{d\bar{t}}{\theta(\omega(\bar{t}))}\right]\right\} d\omega,$$

или

$$\xi(t) = k_{AE} C(t)$$

где ξ – первичный информационный параметр АЭ (число импульсов, суммарная АЭ, суммарная амплитуда АЭ); k_{AE} – акустикоэмиссионный коэффициент (АЭК, «звучащий объем» материала); $\Phi(\Delta t,f,U)$ – плотность вероятности распределения сигналов АЭ по интервалам Δt (паузам) между ними, амплитуде U и частоте f; V – контролируемый объем.

В настоящее время ведется активное применение подобных методов в области теплоэнергетического оборудования.

По результатам промышленных испытаний теплообменного аппарата Д.В. Иншаковым и К.А. Кузнецовым [3] был получен следующий график распределения трубок по степени дефектности (рис. 2):

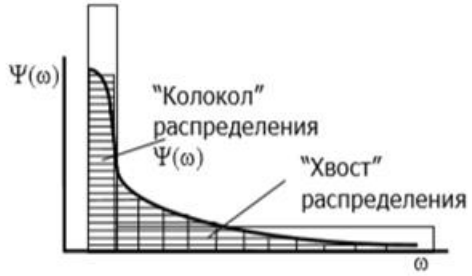


Рис. 1. Моделирование прочностной неоднородности материала

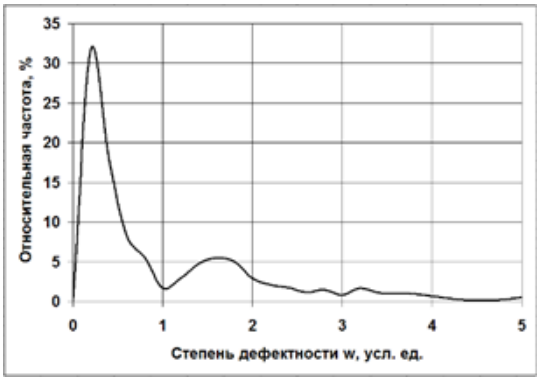


Рис. 2. График распределения трубок теплообменного аппарата по степени дефектности

Как видно при сравнении рисунков 1 и 2, полученное экспериментальным образом распределение относительной частоты по степени дефектности имеет схожий вид с теоретически выведенной зависимостью. Это говорит о том, что микромеханическую модель АЭ можно применять на практике как метод контроля с последующей оценкой остаточного ресурса.

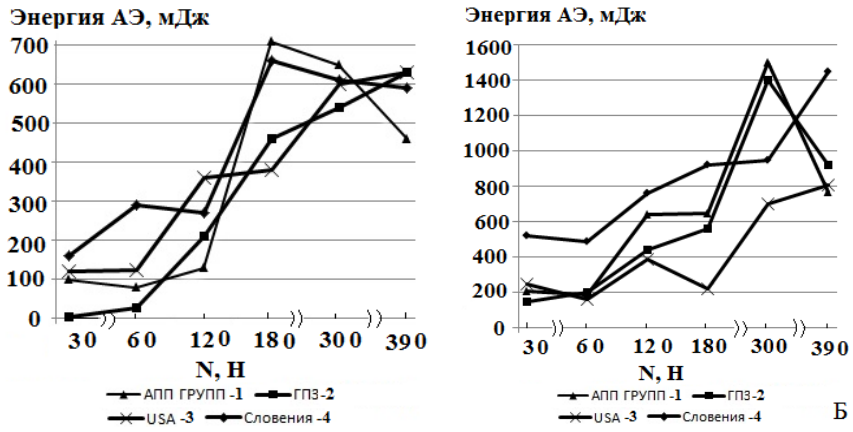
1. Белкин А.П., Степанов О.А. Диагностика теплоэнергетического оборудования: учебное пособие. — 3. — СПб. : Лань, 2018. — 240 с.
2. Носов В.В. Контроль прочности неоднородных материалов методом акустической эмиссии // Записки Горного института. — 2017. — № Т. 266. — С. 469-479.
3. Иншаков Д.В., Кузнецов К.А. Диагностика технического состояния теплообменных аппаратов методом акустической импульсной рефлектометрии на опасных производственных объектах // Наука и техника. — 2019. — № 12. — С. 24-29.

ДИАГНОСТИКА ОПОР КАЧЕНИЯ И СКОЛЬЖЕНИЯ. АВТОМАТИЗАЦИЯ И БИЛЛИНГОВАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТРАНСПОРТА

Короткевич С.В.[1], Короткевич М.С.[2]

[1] *РУП «Гомельэнерго», г. Гомель, РБ,* korotsv@tut.by
[2] *УО БГУИР, г. Минск, РБ,* korotkevichmariya@gmail.com

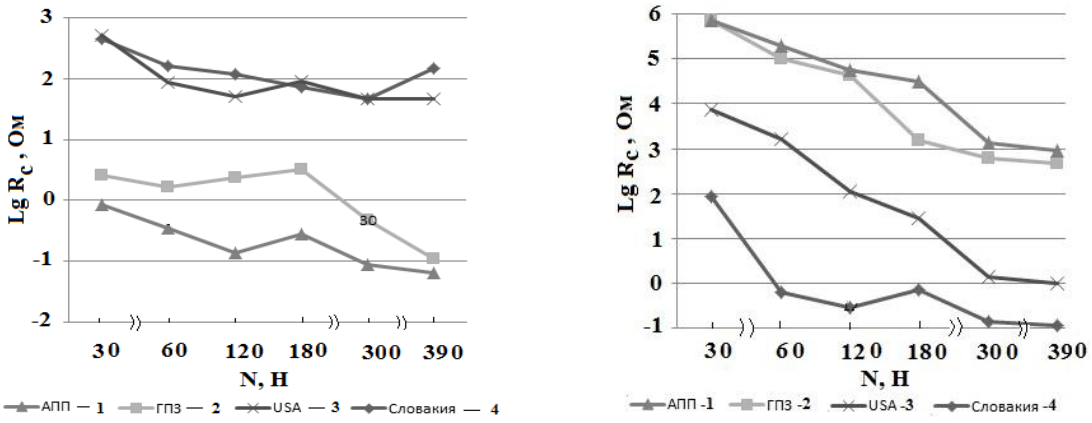
Разработан стенд для диагностики опор качения физическими методами: акустической эмиссии, электрофизического зондирования, температурным и трибометрическим [1]. Объектом исследования являлись подшипники качения различного производства: 1–АПП 6203RS (представленного в РФ торговой маркой «АПП групп»); 2 – 6-180203 C17 (представленного в РФ торговой маркой «ГПЗ»); 3 – 6202-2RS d16 C3 (Perfect industries, inc. Florida, США); 4 – ZVL 6302/16 (Словакия), а также эти же подшипники с искусственно созданным дефектом в виде трещины поперёк кольца. Для регистрации АЭ-сигнала использовались прямые пьезоэлектрические преобразователи. Расчет параметров измерительного канала преобразования, фильтрации, сбора и обработки полученной информации потребовал калибровки АЭ и анализа формы полученного сигнала, амплитудных и действующих значений на его выходе. Использование в измерительном канале широкополосного фильтра в диапазоне частот 100 кГц – 1,5 МГц сигнала АЭ позволило регистрировать кинетику формирования и эволюцию развития трещин при динамическом нагружении вращающегося подшипника качения. Анализ подшипников в состоянии заводской поставки показывает, что при увеличении нагрузки средний уровень сигнала АЭ увеличивается в 3–6 и более раз (рис. 1).



а *б*

Рис.1. Зависимость энергии сигнала АЭ от нагрузки: *а* – подшипники без дефектов; *б* – подшипники с искусственно созданными дефектами

Источник акустической сигнала появляется в металле при формировании и увеличении размеров дефектов (микротрещины, поры, полосы скольжения, несплошности материала), их взаимодействии и коагуляции. Появление дефекта снижает прочностные свойства опор качения и скольжения при их эксплуатации. Поздно констатировать появление самого факта разрушения необходимо предотвращать его появление в сопряжённых поверхностях металлов в статически или динамически нагруженных опорах. Одним из таких методов ранней диагностики является метод электрофизического зондирования, так как позволяет контролировать состояние граничного смазочного слоя и поверхностного слоя металла контактирующих тел непосредственно при их эксплуатации. На рис. 2 приведены зависимости контактного сопротивления от нагрузки для вышеописанных объектов исследования.



а *б*

Рис. 2. Зависимость контактного сопротивления от нагрузки:
а – подшипники без дефектов; *б* – подшипники с дефектами

Установлено, что при ступенчатом радиально-упорном нагружении вращающихся подшипников среднее значение контактного сопротивления у подшипников 3, 4 на один–два порядка выше по сравнению с подшипниками 1, 2 (рисунок 2). Значения контактного сопротивления определяются площадью фактического контакта сопряжённых тел, которая, в свою очередь, зависит от их твёрдости и шероховатости. Износостойкость азотированной стали в 1,5 – 4 раза выше износостойкости закаленных высокоуглеродистых сталей, что полностью подтверждается результатами ресурсных испытаний подшипников качения. Ресурс работы подшипника 6202-2RS d16 C3 в шесть раз выше по сравнению с подшипником ZVL 6302/16, что объясняется, как его конструкционными особенностями, так и азотированием поверхности подшипниковой стали. Разработан способ диагностики подшипников качения позволяющий осуществлять как входной контроль подшипников качения, так и непосредственно при их эксплуатации [2]. Автоматизация способа позволяет в режиме реального времени с использованием GSM модема или спутниковой системы ГЛОНАСС осуществлять мониторинг опор качения букс железнодорожного вагона, насосов различного функционального назначения, а также опор скольжения в двигателях автомобилей [3]. Разработанный алгоритм биллинговой системы мониторинга транспортного средства позволяет осуществлять непосредственное наблюдение за техническими параметрами объекта, что важно как для безопасности движения, так и для выполнения договорных гарантийных обязательств производителя средства передвижения.

1. Короткевич С.В. Диагностика опор качения и скольжения по состоянию поверхности раздела сопряжённых тел физическими методами // С.В. Короткевич, В.Г. Пинчук, В.В. Кравченко // LAP Lambert Academic Publishing. – Saarbrŭcken : LAP, 2016. – 266 с.
2. Способ диагностики подшипников качения; пат. 20175 Респ. Беларусь, МПК G 01 M 13/04 / С.В. Короткевич, В.В. Кравченко, О.В. Холодилов, А.В. Янчилик; заявитель УО Белорусский гос. ун-т транспорта // Официальн. бюл. / Нац. Центр интеллектуал. Собственности. – 2016. – № 3. – С. 94.
3. Способ оценки состояния смазывания опоры скольжения при граничном трении; пат. 22227, Респ. Беларусь, МПК G 01 N 3/56 / С.В. Короткевич, В.Г. Пинчук, В.В. Кравченко, Н.А. Алешкевич, С.О. Бобович; Официальн. бюл. / Нац. Центр интеллектуал. Собственности. – 2018. – № 5. – С. 92.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ Al МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Ярославкина Е.Е., Кузькин В.В., Зобнин П.Ю., Ярославкин А.Ю.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара, Россия
k0046979@yandex.ru

Акустико-эмиссионный метод контроля кристаллизации позволяет получать сведения о перестройках структуры металла. Преимущество данного метода состоит в непрерывном контроле технологического процесса изготовления слитков [2]. В [1] предложена системы, позволяющая прогнозировать макроструктуру металла во время его кристаллизации. Система не оказывает никого влияния на протекающие физические процессы.

Метод основан на регистрации сигнала акустической эмиссии на всем протяжении времени затвердевания расплава [7]. Такая технология применима как на заливке отдельных небольших образцов, так и на производстве машинами непрерывного литья алюминиевых слитков [8]. Измерительная система можно использовать на производстве не только алюминиевых изделий, но и отливки из других металлов и сплавов.

Сигналы АЭ измеряются непрерывно с момента начала процесса отливки столбов. При несоответствии рассчитаннных параметров АЭ сигнала заданными параметрам полученные заранеее для опытной отливки в технологию литья вносятся коррективы, в результате чего предприятие может избавиться от потерь на обработку бракованной продукции.

Эксперименты заключались в определении зависимости размера макро-зерна и параметров АЭ при присталлизации чистого Al и с добавлением модификатора ()

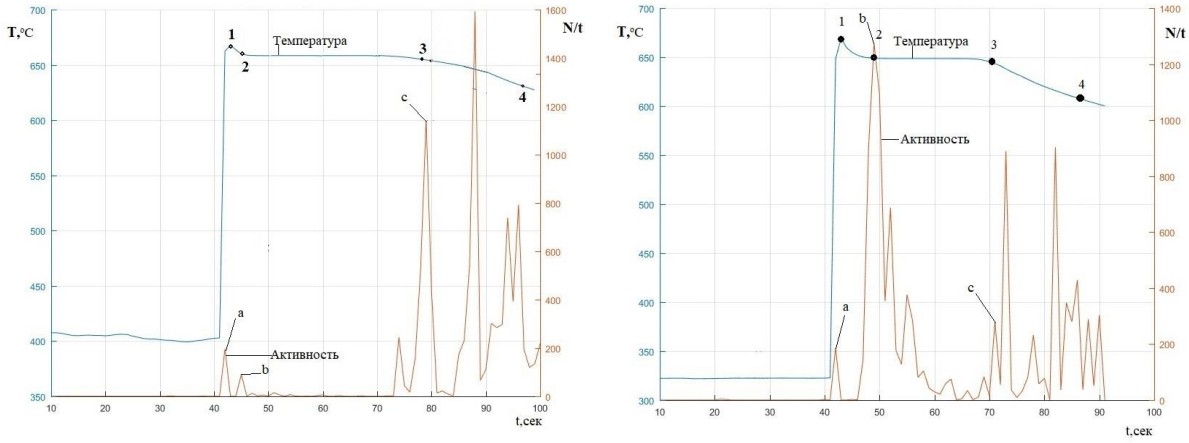
С помощью программного комплекса SIAMS 800 был произведен анализ структуры, результаты которого приведены в таблице 1.

Таблица 1 . Результаты анализа структуры

Модифицированный / не модифицированный	Количество зерен на 1 см^2, шт	Средний размер зерна, мм^2
Модифицированный	10	10
Не модифицированный	29	3,9

На рис. 1 представлены графики АЭ чистого и модифицированного металла.

Из рассматриваемой таблицы 1, можно сделать вывод, что с добавлением модификатора зерно уменьшилось примерно в 2,5 раза. Если соотнести данную разницу с разницей основных параметров АЭ, можно заметить, что активность сигнала АЭ модифицированного Al в момент начала кристаллизации примерно в 13 раз выше, в отличие от аналогичного момента не модифицированного Al. Отсюда можно сделать вывод, что изменение данного параметра в большей степени соответствует изменению среднего размера зерна. Чем больше разница активности сигнала АЭ у модифицированного Al и не модифицированного, тем меньше зерно получается в итоге (в соотношении 5:1).



а *б*

Рис.1. Активность АЭ во времени
а – алюминий марки А99 не модифицированный;
б – алюминий марки А99 модифицированный

Отрезок 1–2 соответствует снятию перегрева до точки, соответствующей началу затвердевания.

На отрезке 2–3, который называется стояние Солидуса, происходит объемное затвердевание порции расплава, которое завершается в точке 3.

На отрезке 3–4 происходит отвод избыточного тепла от полностью затвердевшего образца.

- Точка 1 соответствует пику «a» – удар расплава о волновод, который является дном графитового стакана, которым является волновод.
- Точка 2 соответствует пику «b» – начало зарождения зерна.
- Точка 3 соответствует пику «c» – окончание кристаллизации расплава.

Наблюдение за параметрами акустической эмиссии на протяжении всей стадии изготовления алюминиевых изделий с выведением данных в конечный отчет даст возможность изготовить акустические паспорта на изделие.

1. 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.
2. Иванов В.И. Сигналы акустической эмиссии: Модели и интерпретации // В мире неразрушающего контроля. 2013. №5. С. 17-20
3. Ярославкина Е.Е., Тюрин.Е.А., Зобнин П.Ю., Мельников Е.В., Ярославкин А.Ю., Бочкарев А.В. Акустико-эмиссионная система для исследования влияния модификатора AlTi5Bl на процесс кристаллизации алюминия // Проблемы управления и моделирования в сложных системах xxi Международная научная конференция, 2019 г.
4. Bochkarev A.V., Turin E.A., Zobnin P.U., Mel’nikov E.V., Yaroslavkin A.U. Spectral analysis of acoustic emission signals during the crystallization of aluminium with the aluminium-titan-boron ligature //Ear Fas Conference. IEEE Publish 2019

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОВЕРКИ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕИСКАТЕЛЕЙ

Мельников Е.В., Теплов Е.С., Тюрин Е.А., Зобнин П.Ю.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара, Россия
mev163@yandex.ru

Для своевременного обнаружения аварийной ситуации, связанной с истечением продукта из трубопроводов, используются различные методы контроля их состояний.

Наиболее массовыми системами локализации течей на данный момент являются несколько методов и устройств течеискания: расчетно-аналитический, геофонический, корреляционный.

Последний оптимально подходит для поиска мест утечек из трубопровода в условиях, при которых нет возможности получить доступ к визуальному осмотру всего участка трубопровода, однако имеет ряд определенных недостатков, вынуждающих производить тестирование данной системы на корректность предоставляемых данных.

В рамках исследований проводимых на кафедре «Информационно-измерительная техника» ФГБОУ СамГТУ определен необходимый набор параметров, которые должна формировать ИИС для тестирования корреляционных течеискателей:

- Способность генерировать сигналы различного характера, в частности с применением копии данных полученных ранее при исследовании корреляционными течеискателями аварийных сегментов трубопроводов.
- Наличие возможности создания в ИИС промежуточного звена в беспроводных каналах связи для отладки беспроводных каналов связи течеискателей.
- Функциональная реализация возможности получения прямого доступа к телеметрическим данным состояния датчиков и каналов связи, в том числе качества связи.

На основании данных требований разработана ИИС для поверки течеискателей.

Корреляционные течеискатели являются достаточно удобным средством проверки состояния трубопровода и поиска зон разгерметизации. При этом, необходимо учитывать ряд свойств течеискателей с корреляционным методом поиска.

1. Балабаев А.Н., Беляев Г.Е., Быков Ю.П., Савин С.М., Турчин А.В., Турчин В.И., Шумшуров А.В.Патент RU2326379C1 Устройство корреляционного анализа// Российский патент 2008 года по МПК G01N29/04 F17D5/06. // Опубликовано 08.10.2008
2. Быков Ю.П., Турчин В.И., Турчин А.В.Патент на полезную модель № 33231 Устройство для диагностики трубопроводов// Российский патент 2003 года по МПК G01N29/00. // Опубликовано 10.10.2003
3. Карасевич А.М., Сулимин В.Д., Лобанова Т.П., Бычков В.Б., Нагорнов К.М., Назимов С.С., Резвых А.И. Патент RU2181881C2 Способ контроля герметичности и определения координаты места течи в продуктопроводе // Российский патент 2002 года по МПК G01M3/24 F17D5/06 // Опубликовано 27.04.2002
4. Анисимов В.К., Детков А.Ю., Заварина Л.Е. Патент SU1283566A1 Способ определения координаты течи в трубопроводах // Советский патент 1987 года по МПК G01M3/24 // Опубликовано 15.01.1987.

5. Карасевич А.М., Сулимин В.Д., Лобанова Т.П., Бычков В.Б., Нагорнов К.М., Назимов С.С., Резвых А.И. Патент RU2181881C2 Способ контроля герметичности и определения координаты места течи в продуктопроводе // Российский патент 2002 года по МПК G01M3/24 F17D5/06 // Опубликовано 27.04.2002
6. Мельников Е.В., Теплов Е.С. Разработка способа компенсации вре-менной задержки сигнала по беспроводному каналу связи в корреляционных течеискателях// Сборник научных статей. Выпуск 1(17). Информационно-измерительные и управляющие системы // СамГТУ 2019.– с. 187-192.
7. Шаумян Г.А., Кузнецов М.М., Волчкевич Л.И. Автоматизация производственных процессов. М.: Высшая школа, 1967. 471 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДЕФЕКТОВ

Кутень М.М., Бобров А.Л.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»
г. Новосибирск, Россия
mariabychkova94@mail.ru,
beaver@stu.ru

Повышение безопасности на промышленных предприятиях является основополагающей задачей. Поэтому постоянный мониторинг опасных производственных объектов, таких как сосуды, резервуары, трубопроводы и др., является неотъемлемой частью предупреждающих мероприятий в аварийных ситуациях. Акустико-эмиссионный (АЭ) контроль является одним из способов, обеспечивающих непрерывную оценку состояния объекта даже при значительном удалении оператора от него, в режиме реального времени с помощью систем АЭ-мониторинга [1].

Как известно, обнаружению и регистрации подвергаются только развивающиеся дефекты. Метод АЭ контроля так же обеспечивает последующую классификацию дефектов по степени их опасности, что дает возможность планирования ремонтных мероприятий и не допускает возникновение аварийных ситуаций. Следует заметить, что в настоящее время нет существующей документации, регламентирующей организацию и порядок проведения АЭ контроля опасных производственных объектов. Следовательно, выбор и применение критериев оценки, по которым выносится заключение об объекте контроля, является актуальной задачей.

Критерии оценки, содержащие потоковые параметры акустической эмиссии, используются для нахождения дефекта и установления, в той или иной мере, степени его роста. Однако, определение точного местоположения и размеров дефекта или предсказание его развития, например, напрямую зависят от типа дефекта. Следует отметить, что даже незначительные локальные (усталостные трещины) или распределенные (коррозионные участки) дефекты могу быть ключевой причиной преждевременного разрушения конструкции. Более того, для различных типов дефектов характерна многостадийность этапов их развития, каждая из которых, в свою очередь, имеет разноплановую физическую природу.

Одним из параметров интегрально-динамического критерия является квадрат среднего радиуса источника АЭ [2]. В результате обработки локализованных АЭ сигналов от развивающейся трещины было выявлено, что чем большую площадь они

образуют, тем больше неопределенность координат источника, то есть наблюдается значительный разброс мест локации каждого акта АЭ относительно реального местоположения вершины трещины.

При исследовании амплитуды АЭ сигналов [3] от различных типов источников, а именно, усталостная трещина, вдавливание индентора в образец из стали, сосуд повышенного давления, пластическая деформация в области концентратора напряжений, распределение сигналов имело степенную зависимость. Необходимо отметить, что при разных коэффициентах интенсивности напряжений, например при росте усталостной трещины, наблюдалась стабильность в характере распределения. Из этого следует, что такие параметры АЭ сигнала как амплитуда и энергия в данном случае являются неинформативными при оценке степени развитости дефекта.

Как показывает анализ параметров степенной зависимости для разных образцов между множителем и показателем прослеживается определенная корреляция. Вероятно, данные параметры степенного распределения по амплитудам зависят от одинаковых параметров, формирующих АЭ волны.

Так же исследованию были подвержены экспериментальные данные, полученные со стальных контейнеров для жидкого хлора, предназначенных для хранения, использования в производственных целях и перевозки жидкого хлора железнодорожным, автомобильным и морским (водным) транспортом. Объект представляет собой сварную конструкцию, выполненную из стали 09Г2С (ГОСТ 5520-79), рабочее давление составляет 1,47 Мпа.

Анализ данных АЭ показал, что у всех исследуемых контейнеров наблюдается значительный разброс параметров акустических сигналов по амплитуде от разных типов источников (области коррозии, сварных соединений), отличающихся энергией сигналов.

Таким образом, выбор критерия оценки технического состояния объекта зависит от типа источника (например, усталостная трещина, коррозия, пластическая деформация). По полученным АЭ данным с объектов контроля, в том числе по характеру распределения частоты появления сигналов по амплитудам, первоначально необходимо определить тип источника, затем применить соответствующий критерий оценки, зависящий от акустико-эмиссионных и механических свойств материала.

Список литературы

1. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика / Справочник. М.: Изд. дом «Спектр», 2017. 368 с.
2. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
3. Chernov D.V., Matyunin V.M., Barat V.A., Marchenkov A.Y., Elizarov S.V. Investigation of Acoustic Emission in Low-Carbon Steels during Development of Fatigue Cracks // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. no. 9. P. 638-647.

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО МЕТОДУ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Носов В.В.

Санкт-Петербургский Горный университет
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
nosovvv@list.ru, Nosov_VV@pers.spmi.ru

Нормативные документы (НД) призваны оптимизировать технические решения и работу специалистов. В мировой практике существует два подхода для нормирования технических решений [1]:

1. Регламентация конечного результата при свободе выбора путей достижения такого результата;
2. Регламентация самого пути получения требуемого результата.

Таким образом, в центре внимания при разработке нормативных документов должен стоять результат применения метода акустической эмиссии (АЭ) её пользователями, которые основное его назначение видят в диагностировании и оценке ресурса объекта контроля. Однако данный принцип совершенствования методического обеспечения иногда подменяется рыночными интересами производителей аппаратуры АЭ, сводящими нормативные документы к обоснованию благоприятных условий разработки, изготовления и реализации акустико-эмиссионных приборов, информационно-измерительных систем и комплексов.

Например, рассмотрим противоречия сформулированного в п. 2.53 [2] определения «акустико-эмиссионный образ-характерный набор воспроизводимых признаков сигналов АЭ, относящийся к конкретному объекту, контролируемому определенной акустико-эмиссионной аппаратурой при регламентированных условиях контроля». Во-первых, это образ сигнала, отдалённый от проблемы АЭ оценки состояния объекта, его излучающего. Во-вторых, привязываться к АЭ аппаратуре и условиям контроля - значит делать этот образ неустойчивым к влиянию дестабилизирующих факторов, а значит не информативным для диагностирования, а набор признаков сигналов АЭ - не воспроизводимым. Модель (образ) должна быть информативной, тогда она становится базой для решения проблемы. Поэтому предлагается определение: «Акустико-эмиссионный образ-это модель объекта, излучающего сигналы АЭ, параметры которой связаны с параметрами сигналов АЭ, функциональными характеристиками, параметрами состояния или ресурсом объекта контроля, которые могут быть определены независимо от аппаратуры АЭ и конкретных условий АЭ испытаний». Следствием неверного понимания образа является смешивание определений контроля и диагностики, отдаляющее от понимания важности диагностических моделей и некорректное назначение единиц измерения контролируемых сигналов. В частности, примечание к п. 3.8. [3] «Амплитуду сигнала акустической эмиссии измеряют в вольтах» следует заменить на “Амплитуду сигнала акустической эмиссии измеряют в децибелах», как игнорирующее процедуру преобразования акустического сигнала в электрический (в вольтах измеряется только электрический сигнал, акустический сигнал-упругие механические колебания, измеряются в метрах-примечание автора).

1. http://www.construction-technology.ru/3/
2. ISO 12716-2001.
3. ГОСТ Р 8.965—2019 Акустико-эмиссионные приборы, информационно-измерительные системы и комплексы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Холодов С.С., Бигус Г.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия,
holodovs@mail.ru

Целью исследования являлась оценка возможности применения АЭ для определения момента зарождения микротрещин в углепластике и прогнозирования предела прочности углепластика при одноосном растяжении.

Исследования проводились на бездефектных образцах углепластика толщиной 1,7 мм, длиной 300 мм и шириной 25 мм. Образцы вырезались из плит с различной схемой армирования.

Образцы устанавливались в плоские захваты испытательной машины. Скорость нагружения составляла 1 мм/мин. Применялась АЭ система A-Line 32D (DDM). Использовались ПАЭ GT200, GT300, GT301. В качестве среды для обеспечения акустического контакта между образцом и ПАЭ использовался пластилин. Общий вид установки представлен на рисунке 1.

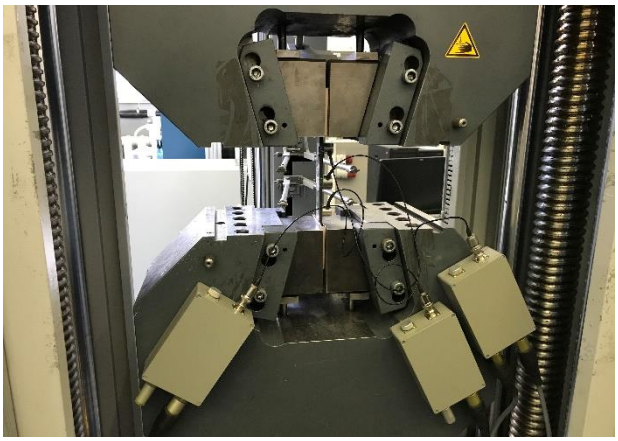


Рис. 1. Общий вид установки

Наибольшую информативность и качественные зависимости от времени, а как следствие от величины напряжения в образце, показали следующие параметры АЭ: амплитуда сигнала и активность.

Было установлено, что в момент зажатия образцов в захватах испытательной машины не регистрируются сигналы акустической эмиссии, что обусловлено большей прочностью углепластика. Однако, в момент начала нагружения образцов возникали деформационные процессы материала на микроуровне, что приводило к устойчивой регистрации сигналов АЭ на начальном уровне нагружения.

В ходе дальнейшего нагружения фиксировалось нелинейное изменение параметров акустической эмиссии с ярко выраженными переломами. Качественные зависимости параметров АЭ от времени воспроизводились для образцов с одной схемой армирования. Характер их разрушения был одинаков, однако установить функциональную зависимость параметров сигналов акустической эмиссии от напряжения не удалось.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ЦАПФ СУШИЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ БУМАГО- И КАРТОНОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН

Растегаев И.А.[1,2], Хрусталев А.К.[1,2], Севастьянов Д.В.[3], Плюснин А.Д.[3], Мелентьев С.В.[3], Данюк А.В.[2], Афанасьев М.А.[2], Мерсон Д.Л.[2]

[1] ООО «ЛАЭС», г. Тольятти,
llc_laes@mail.ru
[2] ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет»
[3] АО «Группа «ИЛИМ»

Типовая схема бумаго- и картоноделательной машины показана на рис. 1. Каждый сушильный цилиндр представляет собой вращающийся сосуд под давлением, дополнительно нагруженный динамическими силами от перекладки собственного веса, а также силами натяжения и веса сушильного сукна и продукта. Сушильные цилиндры включают следующие основные элементы: барабан (обечайка), торцевые крышки и две цапфы (лицевая и приводная), которые устанавливаются в подшипниковые узлы и являются наиболее нагруженными элементами сушильного цилиндра. При этом лицевая цапфа является только опорной, а приводная цапфа дополнительно передает крутящий момент и одновременно является трубопроводом подачи пара (+160 °С; 0,8 МПа) и отвода конденсата.

Рис. 1. Типовая схема бумаго- и картоноделательных машин

Причиной обрыва цапф сушильных цилиндров является возникновение и развитие в них усталостных трещин. Обрыв цапф сопровождается их падением с повреждением сушильного сукна и продукта (бумажного или картонного полотна). Однако основной ущерб составляет не стоимость замены сушильного цилиндра и полотна, а потери из-за снижения объема производства за время внепланового ремонта. В процессе работы сушильных цилиндров контролируется вибрация и нагрев подшипниковых узлов. Анализ вибрации и температуры предшествующих произошедшим аварийным случаям с обрывом цапф не выявил диагностических признаков по которым заблаговременно возможно было бы выявить критическую поврежденность цапф. Таким образом, возникла необходимость в применении новых методов для выявления поврежденности материала цапф. В качестве такого метода предложен метод акустической эмиссии (АЭ), важнейшим достоинством которого, является возможность обнаружения и классификации по степени опасности развивающихся (активных) дефектов, в том числе трещин.

Цапфы сушильных цилиндров изготавливаются точением из поковок вязких материалов, таких как сталь 20Л, 25Л или 45Л. В работах [1–4] показано, что разрушение вязких сталей в условиях циклического нагружения сопровождается АЭ преимущественно непрерывного вида. Согласно работам [3–4] наиболее высокоамплитудную АЭ следует ожидать от трения берегов трещин, особенно в случае знакопеременного симметричного цикла нагружения. Данный диагностический признак предлагается

использовать при АЭ диагностике поврежденности цапф следующим образом. Для обеспечения минимального затухания сигналов преобразователи АЭ устанавливаются непосредственно на цапфы сушильных цилиндров бумаго- или картоноделательных машин. При этом желательно использовать многоканальную АЭ аппаратуру, а диагностику проводить по сушильным группам связанных одним приводом. Нагружение цапф осуществляется собственным весом цилиндра путем вращения сушильной группы. Это необходимо для того, чтобы в каждой части сечения цапф инициировать напряжения растяжения и сжатия, тем самым провоцировать раскрытие и замыкание трещины со скольжением ее берегов возникающее при их смещении из-за изменения локальной жесткости (податливости) рабочего сечения. При этом АЭ от трения берегов проявляется даже без приращения длины (скачка) трещины и два раза за оборот (на этапе раскрытие и замыкание трещины), что повышает вероятность выявления дефекта АЭ методом. Для обеспечения возможности перепроверки и подтверждения факта наличия дефекта нагружение цапф проводится в несколько оборотов. Дефектность цапф оценивается в три этапа. Первый по амплитудно-энергетическим параметрам сигналов установленных при лабораторных испытаниях. Второй - сравнением подобия проявления АЭ в одинаковых циклах нагружения [5]. Третий – подтверждение дефекта ультразвуковым методом только цапф, имеющих признаки дефектности. На основании приведенных положений была разработана методика [6]. Оценка достоверности АЭ методики была проведена по [7] и представлена в таблице. Однако результаты предварительные, которые еще будут уточняться по мере набора статистики.

Метод контроля и оценка его результатов для всех объектов сравнения, $n_\Sigma = 29$ цапф		Эталонный метод контроля дефекта в цапфах – ультразвуковой	
		Число эталонно годных цапф	Число эталонно негодных цапф
АЭ контроль по МАЭК-СЦКДМ-001-2019	Число годных цапф	Дважды годные $n_Г = 13$	Недобраковка $n_\beta = 4$
	Число негодных цапф	Перебраковка $n_\alpha = 7$	Дважды негодные $n_Н = 5$
Вероятность принятия безошибочного решения (достоверность АЭ контроля): $Д_{АЭ} = (n_Г + n_Н) / n_\Sigma = 0,62$ Вероятность пропуска дефекта: $P_\beta = n_\beta / n_\Sigma = 0,14$ Вероятность перебраковки: $P_\alpha = n_\alpha / n_\Sigma = 0,24$			

Список литературы

1. Monitoring of Fracture of Welded Joints in Hazardous Facilities by Acoustic Emission under Static and Cyclic Loadings / I.A. Rastegaev, M.L. Linderov, D.L. Merson et al.// Indian Journal of Science and Technology, 2015, 8 (36), pp. 1-7
2. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
3. Некоторые особенности сигналов акустической эмиссии от трения берегов трещин / Дробот Ю.Б., Лазарев А.М. // Дефектоскопия, 1981 - №9 – С. 6-10
4. Дробот Ю.Б., Лазарев А.М. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом. – М.: Изд-во стандартов, 1987 – 128 с.
5. Патент RU 2684709. Способ акустико-эмиссионной диагностики динамического промышленного оборудования / Растегаев И.А. и др., 2018.
6. МАЭК-СЦКДМ-001-2019. Экспресс-методика оценки акустико-эмиссионной активности цапф сушильных цилиндров картоноделательных машин. – Тольятти: ООО «ЛАЭС», 2020. – 76 с.
7. Акустико-эмиссионная диагностика / В.И. Иванов, В.А. Барат – М: Спектр, 2017. – 362 с.

СПОСОБ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОСТЕКЛЕНИЯ ФОНАРЯ ГЕРМЕТИЗИРОВАННОЙ КАБИНЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА НА ОСНОВЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Попов А.В., Комлев А.Б., Волошина В.Ю., Самуйлов А.О.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
ООО «Синтез технологий», г. Воронеж, Россия
avpnil@rambler.ru

В настоящее время нередки случаи разрушения и срыва фонаря кабины воздушных судов по причине разгерметизации и трещинообразования.

Существуют различные подходы к диагностике состояния остекления фонаря кабины воздушного судна начиная от простейших визуальных осмотров деталей до широкого применения современных комплексов неразрушающего контроля в условиях авиаремонтных предприятий [1].

Недостатком известного способа диагностирования состояния остекления фонаря кабины воздушного судна является отсутствие аппаратной реализации и низкая вероятность обнаружения и прогнозирования динамики развития дефектов на ранних стадиях [2].

Техническим результатом применения разработанного способа диагностирования остекления фонаря герметизированной кабины воздушного судна на основе метода акустической эмиссии является:

1. Повышение вероятности обнаружения дефектов остекления фонаря кабины воздушного судна в области заделки;

2. Возможность прогнозирования динамики развития дефектов на ранних стадиях.

Возможно создание системы оценки прочности и определения местоположения дефектов остекления фонаря кабины воздушного судна путем разработки методического обеспечения на основе метода акустической эмиссии (АЭ). Данный метод позволяет оценивать акустические сигналы, возникающие при образовании и развитии дефектов в материале силовых элементов при воздействии на них нагрузки равной или превышающей эксплуатационную.

При проведении диагностирования остекления фонаря кабины воздушного судна в условиях технико-эксплуатационной части создается избыточное давление в кабине воздушного судна, равное или превышающее эксплуатационное. При этом, в остеклении и местах крепления остекления с каркасом кабины воздушного судна (клеевые соединения), при возникновении дефектов (трещин, расслоений) датчиками регистрируются импульсы АЭ [3,4].

Для повышения оперативности и эффективности АЭ контроля разработан теоретико-вероятностный подход к оценке параметров, характеризующих поток АЭ сигналов. Проведены обобщение результатов исследования связи информативных параметров АЭ и закономерностей процессов накопления повреждений в силовых элементах конструкций, статистический анализ информативных параметров АЭ процессов [5-9].

Разработан способ оценки процессов накопления повреждений в остеклении фонаря и местах крепления остекления к каркасу кабины воздушного судна, основанный на оценке изменения распределений информативных параметров потока АЭ на

фиксированных интервалах времени в процессе приложения нагрузки к силовым элементам конструкций [5-10].

Применение разработанного способа: повышает вероятность обнаружения дефектов остекления фонаря кабины в области заделки, позволяет прогнозировать динамику развития дефектов остекления на ранних стадиях, повысить надёжность воздушного судна и безопасность его эксплуатации.

Список литературы

1. «Восстановление боевой авиационной техники», издание ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского, 1989 г., С. 263-266.
2. Методические рекомендации по эксплуатации и восстановлению деталей остекления из органического стекла воздушных судов государственной авиации РФ в условиях заводского и войскового ремонта, Выпуск ГИ ВВС, Москва 2015 г., 16 с.
3. ПБ 03-593–03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. М.: Гостехнадзор России, 2003. 102 с.
4. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. /под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7: в 2 кн. Кн. 1. Метод акустической эмиссии / В. И. Иванов, И. Э. Власов. Кн. 2 Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова 2-е изд., дораб. М.: Машиностроение, 2006. 829 с.
5. Расщепляев Ю. С., Попов А. В. Метод инвариантов в задаче исследования потоков акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2000. № 10. С. 79 – 82.
6. Пат. 2233444 РФ. Способ оценки процессов разрушения конструкций при акустико-эмиссионном контроле Попов А.В. Бюл. 2004. № 21. 5 с.
7. Расщепляев Ю. С., Попов А. В. Обобщение метода инвариантов для оценки изменения характеристик акустической эмиссии при контроле прочности конструкций // Контроль. Диагностика. 2006. № 5. С. 28 – 30.
8. Попов А. В., Кондранин Е. А. Метод контроля прочности силовых элементов конструкций на основе оценки численно-временных характеристик АЭ-процессов // Контроль. Диагностика. 2008. № 7. С. 45 – 47.
9. Попов А. В., Жумай В. Э. Определение прочностных характеристик конструкций на основе амплитудных инвариантов акустико-эмиссионных процессов// Контроль. Диагностика. 2008. № 10. С. 29 – 32
10. Попов А. В., Тесля Д. Н., Комлев А. Б. Система оценки прочности конструкций авиационной и ракетно-космической техники на основе метода акустической эмиссии// Контроль. Диагностика. 2018 №8 (242) С. 34 – 35.

СИСТЕМА ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ИНВАРИАНТОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Попов А.В., Волошина В.Ю., Комлев А.Б., Самуйлов А.О.

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора
Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,
ООО «Синтез технологий», г. Воронеж, Россия
avpnil@rambler.ru

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

Разработан способ оценки процессов накопления повреждений в силовых элементах конструкций, основанный на оценке изменения статистических распределений информативных параметров АЭ в процессе деформирования силовых элементов конструкций при помощи инвариантов АЭ [3-7].

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

Для испытаний силовых элементов конструкций, имеющих сварные и паяные соединения разработаны многоканальные АЭ аппаратно-программные комплексы на основе инвариантов акустико-эмиссионных процессов, методики экспериментальных исследований, методика моделирования напряжённо-деформированного состояния, и проведены экспериментальные исследования по изучению связи статистических закономерностей АЭ процессов с процессами разрушения.

Разработанный АЭ аппаратно-программный комплекс (АПК) позволяет: осуществлять регистрацию, обработку и анализ сигналов акустической эмиссии по восьми каналам с частотой до 800 кГц; осуществлять многоканальную регистрацию, обработку и анализ значений нагрузки и деформаций; осуществлять видеонаблюдение и запись процесса испытаний и показаний аналоговых приборов при помощи видеокамер.

Разработанный АПК награжден Золотой медалью Всемирной организации интеллектуальной собственности Организации Объединённых Наций на Международной выставке «Expopriority-2013».

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

Разработанная программная реализация методики имеет следующие основные функциональные режимы: настройки; проверки функционирования; ввода ограничений и исходных данных; наблюдения за изменением нагрузок и деформаций; осциллограмм импульсов АЭ; комплекса информативных параметров АЭ и их «свёртки» по каналам регистрации; определения местоположения дефектов; оценки опасности дефектов и возможности дальнейшей эксплуатации конструкции; хранения результатов.

В соответствии со степенью опасности дефектов на экран монитора ПЭВМ выдается сообщение о порядке дальнейших действий операторов, степени эксплуатационной пригодности конструкции.

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

Список литературы

1. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. (*ПБ 03-593-03*). Гостехнадзор России, 2003. 102с.
2. Расщепляев Ю.С., Попов А.В. Метод инвариантов в задаче исследования потоков акустической эмиссии // Дефектоскопия, 2000. - №10. - С. 79-82.
3. Попов А.В. Способ оценки процессов разрушения конструкций при акустико-эмиссионном контроле: пат. 2233444 Российская Федерация. 2004. Бюл. № 21. 5с.
4. Расщепляев Ю.С., Попов А.В. Обобщение метода инвариантов для оценки изменения характеристик акустической эмиссии при контроле прочности конструкций // Контроль. Диагностика, 2006. - №5. - С. 28-30.
5. Попов А.В., Кондранин Е.А. Метод контроля прочности силовых элементов конструкций на основе оценки численно-временных характеристик АЭ процессов // Контроль. Диагностика, 2008. - № 7. - С.45-47.
6. Попов А.В., Жумай В.Э. Определение прочностных характеристик конструкций на основе амплитудных инвариантов акустико-эмиссиионных процессов // Контроль. Диагностика, 2008. - № 10. - С.29-32.
7. Попов А. В., Тесля Д. Н., Комлев А. Б. Система оценки прочности конструкций авиационной и ракетно-космической техники на основе метода акустической эмиссии// Контроль. Диагностика. 2018 №8 (242) С. 34 – 35.

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ

Пичков С.Н., Шишулин Д.Н., Панов В.А., Захаров Д.А.

АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Россия,
okbm@okbm.nnov.ru

Оценка ресурса сложных потенциально опасных инженерных объектов атомного и химического машиностроения на стадии проектирования, оценка выработанного, прогноз остаточного ресурса в процессе эксплуатации этих объектов, продление безопасного срока их службы после отработки этими объектами нормативного срока – являются важнейшими и актуальными задачами современного машиностроения. Процессы исчерпания ресурса являются многостадийными, сильно нелинейными, взаимосвязанными и сильно зависящими от конкретных условий изготовления и эксплуатации индивидуального объекта.

Важная роль при решении данных задач принадлежит методам неразрушающего контроля, таким как, акустико-эмиссионный и ультразвуковой контроль. Покажем это на примере эксплуатационного контроля крупногабаритного сосуда давления со сварным соединением крышки с корпусом.

Мониторинг технического состояния сварного соединения крышки с корпусом сосуда в течение 20 лет осуществлялся с использованием системы АЭК в процессе периодических гидроиспытаний. В результате эксплуатационного диагностического контроля технического состояния сварного соединения крышки с корпусом методом УЗК с использованием ручного дефектоскопа USN-52R был обнаружен один протяженный отражатель длиной 180 мм в основном металле сварного соединения.

Для определения реальных размеров несплошностей и их расположения был проведен автоматизированный УЗК системой «Авгур». Контроль участков сварного соединения системой «Авгур» позволил уточнить параметры отражателей, полученных при ручном УЗК. Были обнаружены четыре несплошности длиной от 18 до 48 мм и высотой от 2 до 5 мм.

С целью проверки обнаруженных несплошностей на акустическую активность, которая могла бы свидетельствовать о развитии дефектов при увеличении давления, был проведен акустико-эмиссионный контроль сварного соединения системой DiSP в процессе гидроиспытаний сосуда давлением от 0 до 219 кгс/см^2.

На рис. 1 показана локационная карта плоскостной антенны, которая контролировала участок поверхности вокруг выявленных несплошностей. Полученные индикации не соответствуют месту расположения обнаруженных методом УЗК отражателей.

В результате проведенных гидроиспытаний сосуда источников акустической эмиссии, соответствующих развивающимся дефектам в материале контролируемого объекта, не обнаружено.

После нагружения сосуда давлением гидроиспытаний 219 кгс/см^2 был проведен повторный автоматический УЗК сварного соединения крышки с корпусом с использованием системы «Авгур». В области измерений наблюдались четыре несплошности, обнаруженные при первом контроле. С точностью до погрешности измерений размеры несплошностей не изменились.

Рис. 1. Локационная карта

С целью решения вопроса о дальнейшей эксплуатации сосуда были привлечены методы механики разрушения. Для оценки долговечности сварного соединения крышки с корпусом сосуда, в предположении наличия обнаруженных УЗК несплошностей, проведен расчет темпов развития несплошностей (поперечная трещина длиной в окружном направлении $2C_0 = 48$ мм, глубиной $a_0 = 5$ мм) при помощи программы ELAP. Скорость роста глубины и длины трещины ($\frac{da}{dN}$, $\frac{dC}{dN}$) определялась по кинетической диаграмме усталостного разрушения:

$$\frac{dl}{dN} = g_n(\Delta K, R) \quad (1)$$

где g_n – некоторая функция свойств материала в заданной среде.

Средний участок диаграммы усталостного разрушения аппроксимируется следующим уравнением:

$$\frac{dl}{dN} = C\Delta K^n \quad (2)$$

где $C, n, \Delta K$ – экспериментально определенные характеристики материала.

Из всех эксплуатационных режимов работы сосуда основной вклад в накопление усталостных повреждений в зоне, примыкающей к разгружающей выточке, вносит режим гидроиспытаний давлением 26 МПа.

Согласно расчетам циклической прочности сварного соединения крышки с корпусом сосуда зарождение усталостной трещины при эксплуатационных нагружениях, соответствующих модели эксплуатации, не только в основном материале корпуса, но и в материале наплавки в районе разгружающей выточки исключено.

Мониторинг состояния сварного соединения методами неразрушающего контроля (АЭК и УЗК) подтвердили данное заключение.

ЭМПИРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Барат В.А.[1,2], Елизаров С.В.[1], Иванов В.И.[3]

[1] *ООО «Интерюнис-ИТ»*, baratva@interunis-it.ru
[2] *ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»*,
[3] *ЗАО НИИИН МНПО «Спектр», Москва, Россия*

В рамках данной работы предлагается эмпирический метод оценки вероятности обнаружения дефектов при проведении акустико-эмиссионного контроля, который рассматривается на примере обнаружения усталостных трещин в сталях перлитного класса. Вероятность оценивается на основании определенного выбранного критерия обнаружения дефекта с учетом характеристик источника акустической эмиссии и параметров акустического тракта.

Для оценки вероятности обнаружения дефектов необходимо учитывать количественные значения параметров импульсов, излученным источником АЭ. При определении вероятности принципиальное значение имеет эмиссивность источника АЭ – количество импульсов, излученных при нагружении, и параметры распределения амплитуд импульсов АЭ.

Эмиссивность источника АЭ оценивается на основании модели Палмера-Хилда [1]. В результате экспериментальных исследований было установлено, что мультипликативный коэффициент модели D может быть интерпретирован, как случайный параметр, соответствующий нормальному закону распределения. По известному закону распределения вероятности параметра D, на основании модели Палмера-Хилда, можно оценить вероятность, того, что при нагружении объекта с усталостной трещиной будет зарегистрировано определенное количество импульсов акустической эмиссии. Для примера на рис.1 показана плотность распределения N_Σ для стали 09Г2С при различных значениях максимального значения механического напряжения в цикле нагружения [2].

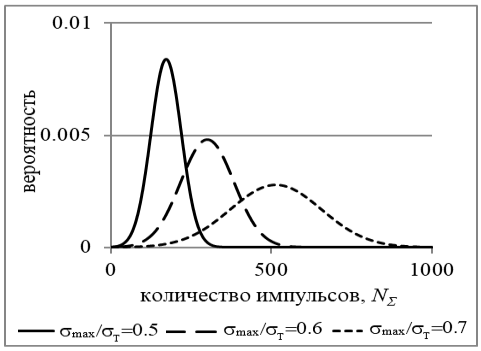


Рис.1. Функция плотности вероятности N_Σ для стали 09Г2С

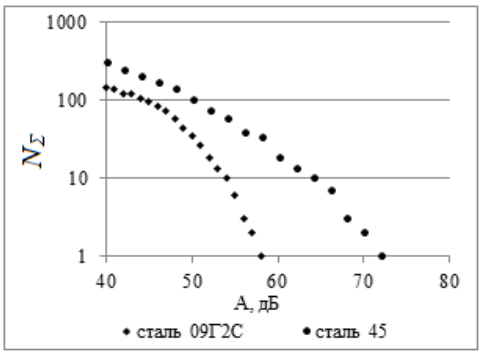


Рис.2. Эмпирическое распределение амплитуд импульсов АЭ

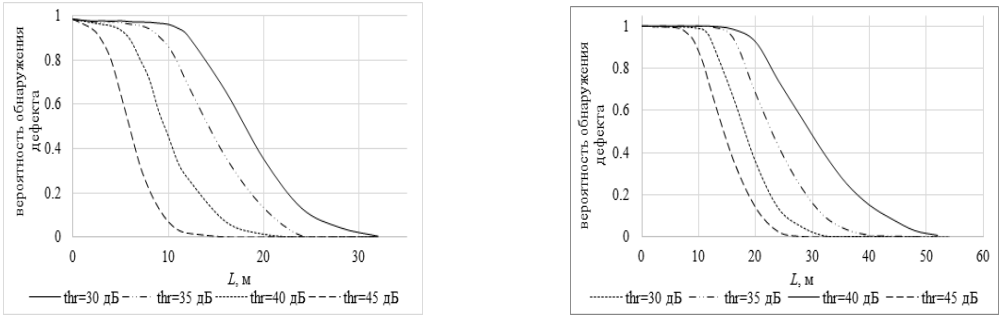
В результате статистического анализа было установлено, что эмпирические распределения амплитуд достоверно соответствуют закону распределения Вейбулла. Параметры масштаба k и формы λ распределения Вейбулла, в свою очередь, являются случайными величинами, соответствующими нормальному закону распределения. Эмпирическое распределение амплитуд импульсов акустической эмиссии для сталей 09Г2С и 45 показано на рис.2. На основании совместного анализа распределения параметра N_Σ (рис.1) с учетом эмпирического распределения амплитуд импульсов АЭ (рис.2) можно определить вероятность события, при котором источник АЭ излучит определенное количество импульсов с амплитудой выше определенного значения.

При расчете вероятности обнаружения дефекта необходимо учитывать не только ослабление сигнала, но и изменение его формы, вследствие дисперсионного распространения, так как форма переднего фронта сигнала влияет на точность определения времени прихода, и соответственно, на точность локации и достоверность обнаружения источников АЭ. Модель акустического тракта может быть представлена в эмпирической, аналитической, полуаналитической и численной форме. В рамках данной работы рассматривается аналитическая модель акустического тракта, основанная на применении модального анализа [3].

В качестве критерия обнаружения дефекта рассматривается условие формирования на плоскости локации компактного кластера, определенного размера и плотности. Вероятность ложного обнаружения дефекта рассчитывается, как вероятность события, при котором регистрация помехи приводит к образованию на плоскости локации «ложного» кластера. На основании допустимой вероятности ложного обнаружения дефекта может быть рассчитан порог амплитудной дискриминации.

Расчет вероятности обнаружения дефекта заключается в определении вероятности выполнения критерия обнаружения, который проводится для определенных условий промышленного контроля на основании эмпирической модели, включающей параметры источника АЭ и акустического тракта. Значение плотности кластера, соответствующее обнаружению дефекта, уточняется путем минимизации полной вероятности ошибки [4].

В качестве примера, на рис.3 показаны POD диаграммы, представляющие собой зависимость вероятности обнаружения дефекта от расстояния между ПАЭ L. Зависимости, приведенные на рис.3, соответствуют различным значениям порога дискриминации, для стали 09Г2С (рис.3*а*) и стали 45 (рис.3*б*).



а *б*

Рис.3. Вероятность ошибки II рода при обнаружении усталостной трещины а) для стали 09Г2С, б) для стали 45

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-31-51001.

Список литературы

1. Palmer I.G., Heald P.T. The Application of Acoustic Emission Measurement to Fracture Mechanics // Materials Science and Engineering. 1973. V. 11. pp. 181-184
2. Barat, V.; Marchenkov, A.; Elizarov, S. Estimation of Fatigue Crack AE Emissivity Based on the Palmer–Heald Model // Applied Science, 9, no 22: 4851, 2019.
3. Barat V., Terentyev D., Bardakov V., Elizarov S. "Analytical Modeling of Acoustic Emission Signals in Thin-Walled Objects." // Applied Science, 10, no. 1: 279, 2020
4. Барат В.А., Чернов Д.В., Елизаров С.В. Оценка достоверности выявления усталостных дефектов методом АЭ при беспороговой регистрации данных. В сборнике: Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2018). сборник материалов. Ответственные редакторы Д.Л. Мерсон, А.Ю. Виноградов. 2018. С. 22-23.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЭ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ

Ханухов Х.М., Четвертухин Н.В., Алипов А.В.

ООО «НПК Изотермик», Москва, Россия
isotermik@yandex.ru

Хранение промышленных газов (ПГ) является важной частью технологической цепочки – добыча – переработка – потребление. ПГ хранятся в жидком состоянии под давлением или низких температурах. Наиболее эффективным способом хранения является изотермический при температуре кипения хранимого продукта и давлении, близком к атмосферному.

В настоящее время в мировой и отечественной практике изотермического резервуаростроения наиболее надежной и безопасной конструкцией принята конструкция наземного теплоизолированного изотермического резервуара (ИР) полного сдерживания с двумя цельнометаллическими оболочками и подвесной газопроницаемой крышей (объемом до 60 000 м^3) или комбинированная конструкция – с внутренней металлической оболочкой с подвесной крышей и преднапряженной железобетонной оболочкой [1,2,3].

ИР являются опасными производственными объектами (ОПО) I класса опасности, требующими повышенных мер обеспечения безопасной эксплуатации. В настоящее время в зарубежных проектах безопасная эксплуатация успешно обеспечивается наличием технологических приборов и оборудования, контролирующих давление, температуру, уровень продукта, наличие паров продукта в межстенном пространстве. Безопасность гарантируется в течение 25-30 лет эксплуатации. В отечественной практике безопасность в нормативные сроки эксплуатации обеспечивается периодическими обследованиями и диагностированием технического состояния с освобождением и без освобождения от продукта. Это объясняется радом причин, в том числе более низким качеством изготовления и монтажа, а также уровнем эксплуатации. Т.о. отечественная система обеспечения эксплуатационной безопасности осуществляет комплексный мониторинг технического состояния (КМТС) [4]. В этой системе, наряду с другими видами технологического и неразрушающего контроля, важную роль играет акустико-эмиссионный контроль [4, 5]. В связи с этим необходимо четко определить роль и место АЭ контроля в обеспечении безопасной эксплуатации наиболее надежного ИР - цельнометаллического двухстенного полного сдерживания с подвесной крышей.

На основании оценки риска [3] рекомендуется:

- размещение датчиков АЭ мониторинга на стенке ИР, ответственной за разрушение от повышения давления; в данном случае – на наружной стенке;

- контроль только узких зон сопряжения стенки с днищем и крышей небольшим числом датчиков, равномерно расположенных по периметру на расстоянии 0,5-1 м от днища и от крыши;

- акустико – эмиссионные датчики в дополнении к штатным приборам контроля давления указывают на опасное состояние металла (растущие трещины или возникновение зон пластичной деформации); т.к. отрыв крыши от стенки возможен при внутреннем давлении не ниже 30 кПа, повышение давления до этого значения за счет наличия межстенного пространства займет довольно продолжительное время, что дает больше времени на проведение защитных мероприятий;

- в связи с локализацией развития пластических деформаций на линии стыка крыши (днища) и стенки при повышении давления достаточно зонной локации, что обеспечивается одним слоем АЭ датчиков по высоте, что исключает их установку на наружной крыше и на днище в межстенном пространстве.

Таким образом, АЭ контроль, является важной, но не заменяющей все остальные виды контроля составляющей. В связи с этим, в период эксплуатации, ограниченном проектным временем, рекомендуются 2 способа применения АЭ контроля:

- на новом ИР, оснащенном системой АЭ мониторинга, рекомендуется эксплуатация по фактическому техническому состоянию с регулярным частичным освидетельствованием без остановки эксплуатации; по истечении срока проектной эксплуатации (25-30 лет) необходима остановка для полного технического освидетельствования и частичного восстановления остаточного ресурса с последующим режимом эксплуатации по заключению независимой экспертной организации;

- в случае оснащения ИР системой АЭ контроля в процессе эксплуатации переход к режиму эксплуатации по фактическому техническому состоянию возможен после проведения полного технического освидетельствования и заключения независимой экспертной организацией.

Таким образом, гл.IX п.149 [5] необходимо изложить в вышеприведенной редакции, тем самым исключив неправомерное расширение области применимости метода АЭ контроля в мониторинге технического состояния эксплуатируемых ИР.

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. Методика комплексного мониторинга технического состояния изотермических резервуаров сжиженных газов. СТО-03-001-11.
5. Руководство по безопасности «Обследование технического состояния изотермических резервуаров сжиженных газов». Пр.24.12.2018 №636.

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ АЭ-ДИАГНОСТИКИ

Карлов С.А.

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г. Санкт-Петербург, Россия
aepro1988@gmail.com

В последнее время при разработке программного обеспечения в различных областях знаний (компьютерном зрении, распознавании речи и аудиозаписей, обработке естественных языков, робототехнике и др.) все активнее применяется глубокое обучение (*Deep Learning* ≡ *DL*), которое показало свою эффективность [1]. Учитывая это, видится огромный потенциал использования современных алгоритмов *DL* для решения широкого спектра задач метода акустической эмиссии.

В частности, в методологии АЭ контроля (АЭК) качества процесса сварки, используемой специалистами ФГУП «Крыловский государственный научный центр», применяется анализ графиков распределения регистрируемых событий АЭ не только по координате, но и по времени [2]. Это позволяет наглядно отслеживать акустическую картину при остывании локального района сварного шва, когда влияние сигналов помех минимально, а дефект способен активно развиваться под действием термических напряжений. При этом качество сварного соединения оценивается оператором АЭК по определённому набору критериальных признаков путём анализа графиков, формируемых на экране монитора при регистрации информации в реальном времени выполнения сварочных проходов.

Подобный способ обработки данных всегда будет иметь отчасти субъективный характер. Поэтому для решения задачи выделения различных операций, сопровождающих процесс выполнения сварки (собственно сварочный проход, зачистка поверхности сварного шва от шлака и др.), была предпринята попытка их семантической сегментации (попиксельной классификации) с помощью алгоритма *DL*. В качестве базовой архитектуры был использован декодер *Panoptic FPN* [3] с энкодером *EfficientNet-B0* [4].

Разработка современных архитектур *DL* для задач компьютерного зрения производится на трёхканальных *RGB*-изображениях, поэтому для представления АЭ информации на графиках координатно-временного распределения в качестве входных параметров были выбраны три критерия:

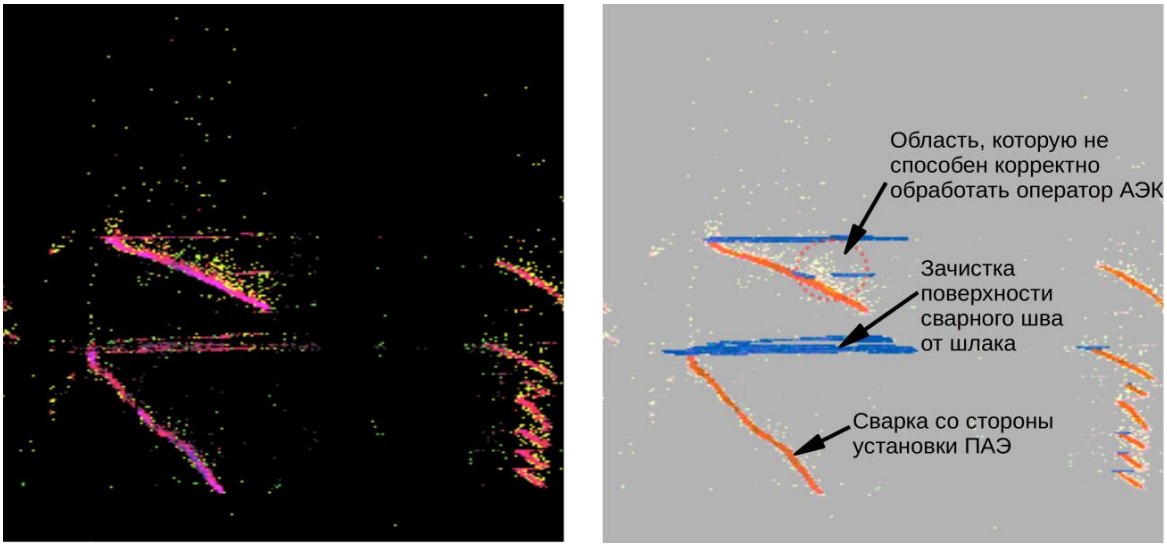
1) обобщённая степень опасности событий АЭ [5] – этот параметр характеризует степень приближения наиболее информативных параметров импульса АЭ к сигналу от недопустимого, развивающегося дефекта;

2) параметр распределения высокочастотности событий АЭ – этот критерий основывается на особенностях волноводного распространения сигналов АЭ в толстолистовых конструкциях;

3) число событий АЭ – этот параметр характеризует район сварного шва, где в данный момент выполняется сварка.

Для обучения были взяты пять изображений, разметка которых производилась в два этапа. На первом этапе были обучены 8 моделей с различными начальными условиями инициализации архитектуры и аугментации (расширения) данных. После этого были отобраны четыре модели с большей обобщающей способностью, с помощью которых была произведена дополнительная псевдомаркировка 69 изображений. Затем было выполнено дообучение выбранных моделей на ранее размеченных и псевдомаркированных изображениях.

В качестве примера, на рис. 1а показано *RGB*-изображение событий АЭ на графике координатно-временного распределения, а на рис. 1б – это же распределение после обработки моделью *DL*.



а *б*

Рис. 1. Пример обработки АЭ информации алгоритмом *DL*

Результаты проведенных работ показали, что применение модели глубокого обучения позволяет разделять операции, сопровождающие процесс выполнения сварки, а также уверенно определять район его проведения (с наружной или внутренней стороны крупногабаритной конструкции). Тем самым алгоритм глубокого обучения дает возможность оператору АЭК выполнить более достоверную обработку и последующий анализ АЭ информации, регистрируемой в процессе сварки.

Для внедрения данного алгоритма *DL* в имеющееся программное обеспечение необходимо выполнить обучение моделей на большем наборе данных, что имеет определяющее значение для точности работы алгоритма.

Список литературы

1. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение // пер. с англ. А.А. Слинкина. – 2-е изд., испр. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 652 с.
2. Карлов С.А., Сульженко В.А., Яковлев А.В. Акустико-эмиссионный контроль качества сварных швов объектов морской техники // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Специальный выпуск 1. С.130-136.
3. Kirillov A., Girshick R., He K., Dollar P. Panoptic Feature Pyramid Networks // CoRR, abs/1901.02446v2, 2019.
4. Tan M., Le Q.V. EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks // CoRR, abs/1905.11946v3, 2019.
5. Гуменюк В.А., Сульженко В.А., Яковлев А.В. Система классификации степени опасности источников акустической эмиссии и критерий экспресс-оценки состояния объектов на основе нечеткой логики // Контроль. Диагностика. 2003. №1. С.49-53, 57.

ИЗУЧЕНИЕ ВОДОРОДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В СОВМЕСТНОМ АНАЛИЗЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Чуканов А.Н.[1], Яковенко А.А.[2], Цой Е.В.[1], Терёшин В.А[1]., Моденов М.Ю.[1]

[1]*Тульский государственный университет им. Л.Н. Толстого, Тула, Россия,*
alexchukanov@yandex.ru
[2]*ООО «Металлург-Туламаш», Тула, Россия,*

Исследовали деградацию, деструкцию и эволюцию дефектов водородной повреждаемости [1-3] в сталях 20 и Ст3 при насыщении их водородом в 0,1 норм. растворе H_2SO_4 с NH_2CNSH_2 при электролитической катодной поляризации и последующем деформировании. Интенсивность варьировали плотностью тока (j = 60…160 А/м^2) и длительность насыщения ($\tau_В$ = 0…30 ч.). Контролировали АЭ (Vallen AMSY-5) (кумулятивные кривые импульсов N_Σ и энергии E_Σ) и проводили УЗ дефектоскопию (УЗД). Параллельно фиксировали температурные зависимости внутреннего трения (ТЗВТ) и модуля упругости первого рода (МУ). На ТЗВТ регистрировали эффекты несовершенной упругости (ЭНУ): водородный Снука-Кестера ($СК_Н$), деструкционный (Д), Снука (Сн) [4,5].

Опираясь на работы Хуана-Фантоцци, Каннели-Вердини, компонентами водородного максимума СКн считали пики диффузионной активности атомарного водорода (СКн(а)) и переориентации его молекул в поле дислокации (СКн(м)). Составляющие Д максимума (пики $Д_S$ и Де) отражали уровень локализованных напряжений в зонах их концентрации (водородных коллекторах). При сопоставлении зависимостей АЭ, ВТ и УЗД выявили три области (I, II, III) с характерным изменением параметров.

Рост фона ВТ, высот водородных максимумов $СК_Н$ и Д областях I, II и III после насыщения 0…15 ч. связывали с диффузией атомарного водорода в объем образца, окклюзией, и интенсивной молизацией в коллекторах. После 10-15 ч. наводороживания подвижность водорода снижалась. Количество молизовавшегося водорода после 20 ч. стабилизировалось. Увеличение длительности насыщения свыше 15 ч. вело к резкому снижению высоты Д максимума. Напряжения в локализованных зонах релаксировали с образованием ювенильных поверхностей. Эти изменения трактовали как подготовку (область I), зарождение (II) и развитие (III) водородной повреждаемости. Заключительным его этапом было образование в области III микротрещин в водородных коллекторах. Металлографические исследования фиксировали эволюцию ансамбля микротрещин, соответствовавшую описанным процессам [6]. При достижении давления в коллекторах, достаточного для раскрытия трещин, последние растут, количество их уменьшается. Величину этого напряжения определяли, по результатам АЭ. Наводороженные образцы сжимали в диапазоне 40-260 МПа со скоростью 2,3 МПа/мин. На кумулятивных кривых количества импульсов N_Σ и энергии E_Σ АЭ фиксировали два диапазона с различной интенсивностью изменения (А и Б). Эти же диапазоны наблюдали на зависимостях длительности сигнала АЭ от времени. Наиболее ярко изменение параметров АЭ демонстрировала зависимость, полученная после наводороживания в течение 5 ч. Перелом на кривых $E_\Sigma(\sigma)$ и $N_\Sigma(\sigma)$ наблюдали при напряжениях ~110-130 МПа. Они близки к расчетным (по Гриффитсу-Оровану), что подтвердило охрупчивающее действие водорода. Начальный размер активной микротрещины способной к развитию был определен равным 1,5-2 мкм.

Резкое снижение интенсивности АЭ в диапазоне Б свидетельствовал о смене механизма деформации и повреждаемости. Линейная аппроксимация диапазонов А и Б для напряжений 0-130 МПа и 130-260 МПа позволила определить скорость изменения N_Σ и E_Σ. Вид их зависимостей от длительности наводороживания свидетельствовал о двух одновременно развивающихся процессах: микропластической деформации и деструкции. О первом говорит резкий рост N_Σ и E_Σ до напряжения 110-130 МПа, а также увеличение объемных микроискажений (фон ВТ). О вторых судили по снижению указанных

зависимостей после нагрузки 130 МПа и немонотонному изменению локализованных микронапряжений ($Д_S$). Максимум параметров АЭ фиксировали в диапазоне 0-130 МПа. Его наблюдали после 5ч наводороживания. Данные УДЗ подтверждали наличие двух «дополнительных» диапазонов повреждаемости в области I.

Выводы

Совместный анализ АЭ, ВТ и УЗД в ходе водородного воздействия выявил два «основных» диапазона: 0…10÷15 ч. и 10÷15…30 ч. с превалирующим развитием деградационных и деструктивных процессов, соответственно. А также два «дополнительных» диапазона синергетического развития этих процессов (0…5 ч. и 5…10 ч.). Внутри областей I и III развиваются процессы повреждаемости двух масштабных уровней. При нагружении наводороженных образцов, движущиеся в объеме дислокации испытывают растущее сопротивление активных водородных центров (ловушек). Плотность таких центров повышается. Для дальнейшего движения дислокаций и продолжения АЭ необходимо увеличивать приложенные напряжения. После 5 часов насыщения торможение дислокаций водородными центрами достигает максимума. Дальнейшее увеличение длительности насыщения (10÷15 ч) стимулирует реализацию эффекта водородной локализации пластичности. Водород понижает поверхностную энергию металла и его сопротивление разрушению, сосредотачиваясь в зонах растягивающих напряжений коллекторов. При нагружении наводороженных образцов, движущиеся в объеме дислокации испытывают растущее сопротивление активных водородных центров (ловушек). Для дальнейшего движения дислокаций и продолжения АЭ необходимо увеличивать приложенные напряжения.

Список литературы

1. Чуканов А.Н., Терешин В.А., Цой Е.В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в металлических средах на основе концепции силовых линий // Чебышёвский сборник. - 2020. - Т. 21. - Вып. 4 (76). - С. 376 - 389.
2. Чуканов А.Н., Терешин В.А. и др. Эволюция зон пластичности в окрестности пор в сталях в условиях стресс-коррозии // Заготовительные производства в машиностроении.- 2020. - Т. 18. - №3.- С. 130-136.
3. Sergeyev N.N., Tereshin V.A., Chukanov A.N., Yakovenko and others. Formation of Plastic Zones near Spherical Cavity in Hardened Low-Carbon Steels under Conditions of Hydrogen Stress Corrosion // Inorganic Materials: Applied Research, 2018, Vol. 9, No. 4, pp. 663–669.
4. Чуканов А.Н. и др. История создания метода оценки повреждённости сталей на базе механической спектроскопии // Чебышевский сборник. - 2019. - Т. 20. - № 3 (71). - С. 514-532.
5. Чуканов А.Н., Цой Е.В., Моденов М.Ю. Автоматизированный аппаратно-программный комплекс дефектоскопии металлических и неметаллических изделий //«Интеллектуальные информационные системы»: Сб. научн. ст. 8 МНПК «ИИС-2020», (18.12.2020). г. Курск: ЮЗГУ, 2020. - С. 254 - 256.
6. Чуканов А.Н., Моденов М.Ю., Цой Е.В. Микропроцессорное управление работой мультиволнового комплекса микроструктурного анализа твёрдотельных и биологических объектов// там же - С. 251 - 253.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СТАНДАРТНОГО АЛГОРИТМА ЛИНЕЙНОЙ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ

[1] Махутов Н.А., [1]Васильев И.Е., [1]Чернов Д.В., [2]Мищенко И.В.

[1]Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия,
chernovdv@inbox.ru
[2]ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены результаты погрешности линейной локации источника акустической эмиссии (АЭ) в зависимости от его положения относительно приемных преобразователей и амплитуды регистрируемых импульсов. Предложена методика повышения точности локации АЭ событий с использованием поправочных коэффициентов, учитывающих их положение относительно приемных преобразователей и уровень амплитуды регистрируемых импульсов.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, линейная локация, относительная погрешность

Введение

Одним из главных достоинств метода АЭ является определение местоположения развивающихся дефектов в процессе мониторинга состояния изделия. Стандартная методика расчета координат источников акустических сигналов [1] основана на применении двух параметров: 1) разности времен прихода (РВП) импульсов АЭ на преобразователи антенной решетки (Δt); 2) скорости распространения акустических сигналов в стенке контролируемого объекта (V_g). Для повышения точности стандартного алгоритма линейной локации предлагается использовать аналитические зависимости между погрешностью измерения РВП сигнала на преобразователи антенной решетки и амплитудой источников АЭ. Предлагаемая методика позволяет снизить количество тестовых испытаний и обеспечить требуемую точность координатной локации АЭ событий [2].

Методика проведения испытаний и обсуждение результатов

Для решения поставленной задачи проведена серия лабораторных исследований, включающих в себя построение линейной локации источников акустических сигналов с различной амплитудой. В качестве источника излучения импульсов АЭ использовался имитатор Су-Нильсена и электронный имитатор производства компании «Интерюнис» с широкополосным преобразователем *SE-1000* фирмы «Dunegan». Антенна линейной локации состояла из двух резонансных преобразователей *VD-150* производства «Vallen», расположенных на расстоянии 900 мм друг относительно друга. Измерительные преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) подключались к четырехканальной системе сбора и обработки АЭ данных *«AMSY-4»* компании «Vallen». В ходе проводимых экспериментов ПАЭ №1 и ПАЭ №2 неподвижно закреплялись на поверхности стальной пластины (рисунок 1), а источник излучения электронного имитатора на шагах проводимых измерений перемещался между ними, генерируя импульсы АЭ с амплитудой от 55 до 80 дБ. Для возбуждения акустических сигналов амплитудой 100 дБ применялся имитатор Су-Нильсена. Расчетное значение скорости распространения импульса АЭ составила V_g = 4800 м/с. Необходимо отметить, что расчет параметра V_g осуществлялся по стандартной методике ПБ 03-593-03.

Рис. 1. Схема проведения экспериментальных исследований

Применение электронного имитатора позволяет возбудить на поверхности пластины широкополосные сигналы, максимальная амплитуда которых зависит от напряжения на входе подключенного преобразователя. Таким образом, амплитуда генерируемых сигналов может меняться в широком диапазоне, при этом их спектральные характеристики остаются неизменными. Результаты обработки АЭ данных представлены на графиках рисунка 2.

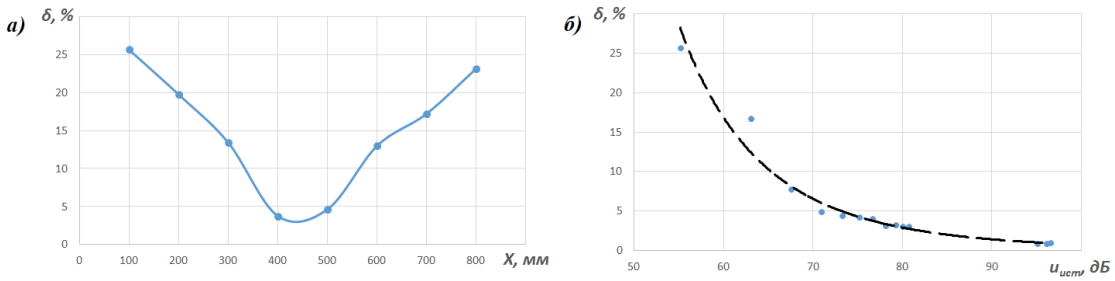


Рис. 2. Изменение относительной погрешности линейной локации в зависимости от (*а*) местоположения источника АЭ и (*б*) амплитуды источника АЭ

Из графика 2*а* видно, что относительная погрешность (δ) возрастает по мере удаления источника АЭ от центра области локации, достигая максимальных значений δ=24-26 % вблизи приемных преобразователей. Причем её уровень, как следует из графика 2*б*, существенно зависит от амплитуды импульса АЭ ($u_{ист}$). Параметр $u_{ист}$ рассчитывался исходя из значений коэффициента затухания импульса АЭ и расстояния между источником и приемным преобразователем (X).

Заключение

Проведенные исследования показали, что точность локации АЭ событий зависит от положения источника относительно ПАЭ и уровня амплитуды регистрируемых импульсов. Для источников низкоамплитудных сигналов АЭ, расположенных вблизи преобразователей антенной решетки, уровень относительной погрешности достигал 26 %. С целью повышения достоверности координатной локации таких событий необходимо использовать поправочные коэффициенты, значение которых определяют исходя из уровня амплитуды регистрируемых импульсов и их удаленности от ПАЭ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-19-00769.

Список литературы

1. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика / М.: «Спектр». 2017. 368с.
2. Eaton, M. J., Pullin, R., Holford, K. M. Acoustic emission source location in composite materials using Delta T Mapping // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.– 2012, 43(6), p. 856–863.

СВЯЗЬ СИЛОВОГО И АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ ДЕФЕКТА. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРШИНЕ ТРЕЩИНЫ

Параев С.А., Лебедев Д.В.

АО «НИИхиммаш», Москва, Россия

Приведены результаты применения силового и акустико-эмиссионного критерия для определения концентрации напряжений (ККН) в зоне дефекта. Описана методика экспериментального определения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в вершине трещины с помощью указанных критериев.

Силовой критерий определения ККН основан на теории нелинейной и линейной механики разрушения [1].

Акустико-эмиссионный критерий основан на известном явлении акустической эмиссии: при упруго-пластическом переходе для металлических материалов в районе напряжения предела текучести $\sigma_т$ наблюдается максимум активности сигналов АЭ [5]. Указанная закономерность АЭ была использована для экспериментального определения величины ККН с помощью метода АЭ ($ККН_{АЭ}$). Для этого фиксировали напряжения σ_1 и σ_2, соответствующие максимумам интенсивности АЭ для гладкого, бездефектного образца (σ_1) и для дефектного образца (σ_2), и определяли критерий $ККН_{АЭ}$ как отношение напряжений $ККН_{АЭ} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$.

В настоящей работе исследовали возможность применения связь силового и акустико-эмиссионного критериев определения (ККН) в зоне дефекта. В качестве искусственных модельных дефектов применяли надрезы и отверстия разной остроты и различного диаметра. Расчетное поле напряжений в зоне дефектов моделировали с помощью пакета программ «КОМПАС».

Исследования проводили сталях разных марок типа: ст.35, 40Х13,12Х18Н10Т, 12Х2МФА, 15Х2НИФА, имеющих различные характеристики прочности и пластичности. Испытывали на растяжение плоские образцы с рабочей частью и образцы на вязкость для испытаний на вязкость разрушения типа ВР и ДКБ [2].

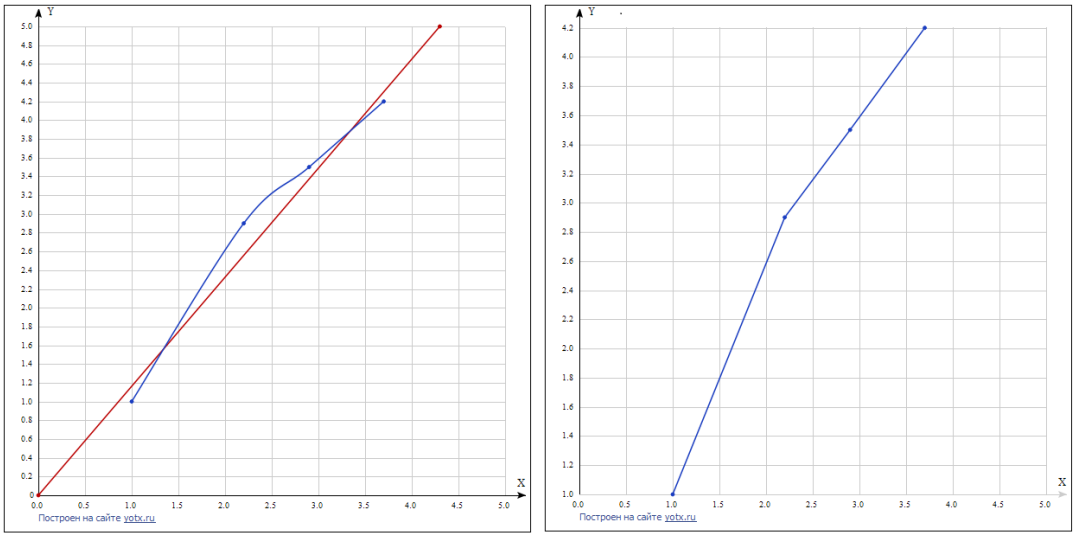
Для калибровки методики измерения $ККН_{АЭ}$ были проведены испытания со сквозными отверстиями диаметром от 1 мм до 5 мм в центре рабочей части образца. Экспериментальные значения $ККН_{АЭ}$ сравнивали с расчетными значениями коэффициента концентрации напряжений ($ККН_{расч}$), полученными в рамках теории упругости [3] и моделирования с помощью пакета программ «КОМПАС».

Установлено, что зависимость $ККН_{расч}$ - $ККН_{АЭ}$ (см. рис.1) может быть экстраполирована прямой вида: $ККН_{расч}=1{,}16\ ККН_{АЭ}$ с абсолютной погрешностью $\Delta\ ККН_{АЭ} = \pm\ 3$.

На основе полученных данных были определены зависимости $ККН_{АЭ}$ от типа дефекта и механических свойств материала образца, см. табл.1.

Как видно из таблицы 1, для более пластичной и менее прочной стали марки 12Х18Н10Т величина $ККН_{экс}$ в разы меньше, чем для более прочной стали 12Х2МФА.

Значения $ККН_{экс}$ для надреза и трещины для стали 12Х18Н10Т остаются практически одинаковыми, в то время как для стали 12Х2МФА они отличаются между собой почти в два раза.



а *б*

Рис.1. *а* – Корреляция силового и акустико-эмиссионного критерия на образцах. Зависимость между коэффициентом концентрации напряжений $ККН_{расч}$ – $ККН_{АЭ}$ показана синим цветом, экстраполяция прямой показана красным цветом.
б – Корреляция между ККН, рассчитанные по теории упругости (ось Y) и определенные методом АЭ (ось X)

Таблица1

Способ определения $ККН_{экс}$	Тип концентратора напряжений (дефекта)	Материал образца и его механические свойства	
		12Х18Н10Т, $\sigma_{1т}$ (МПа) = 260МПа, ε = 47 %	12Х2МФА, $\sigma_{1т}$ (МПа) = 580 МПа, ε = 15 %
Как отношение напряжений: $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$	надрез	2,6	11,1
	трещина	2,7	20,0

В таблице 2 приведены ККН в вершине надреза и трещины для сталей 12Х18Н10Т и 12Х2МФА, рассчитанные по данной методике. Коэффициент корреляции теоретических и экспериментальных значений ККН в вершине надреза и усталостной трещины, составляет 0,95.

Таблица 2

Способ расчета ККН	Тип ККН	Материал	
		12Х18Н10Т, $\sigma_{1т}$ (МПа) = 260МПа, ε = 47 %	12Х2МФА, $\sigma_{1т}$ (МПа) = 580 МПа, ε = 15 %
По напряжениям максимумов АЭ: $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$	надрез	2,6	11,1
	трещина	2,7	20,0
По интенсивности максимумов АЭ: $\frac{N_1}{N_2}$	надрез	0,6	1,2
	трещина	0,7	3,5

Таким образом, представленные результаты исследований показывают возможность определения коэффициента концентрации напряжений с помощью акустической эмиссии в сталях с разными механическими свойствами и типом дефектов.

Полученные данные могут быть в дальнейшем применены для экспериментального определения действующих значений коэффициента интенсивности напряжений - фундаментальной характеристики трещиностойкости материалов.

Список литературы

1. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Часть 1. Критерии прочности и ресурса, Новосибирск: Наука, 2005. — 494 с.
2. Иванова В.С., Маслов Л.И., Параев С.А, Исследование корреляции между акустической эмиссией, микроструктурой и механическими свойствами сталей после их термообработки па различных режимах М.: Сб. «Вопросы атомной науки и техники», 1980,вып. 1(7), с. 48-54.

О ПРИМЕНЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМ КОНТРОЛЕ. САМООБУЧАЮЩИЕСЯ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ТИПА LVQ

Параев С.А.[1], Бутусов О.Б.[2]

[1]*АО «НИИхиммаш», Москва, Россия*
sa23032008@ya.ru
[2]*МАМИ, Москва, Россия*

В настоящей работе приведены результаты разработки и применения математической модели и программ нейронной сети [1,2] с целью повышения достоверности и точности полученных результатов акустико-эмиссионного (АЭ) контроля.

Математические модели и программы были разработаны на кафедре прикладной математики МАМИ. В компьютерной модели использовались встроенные функции системы MATLAB 7.

Квантизация вектора обучения (learning vector quantization - LVQ) – прием обучения с учителем, который использует информацию о классе для улучшения качества областей решений классификатора.

Классификация источников АЭ по степени опасности проведена по 4-м классам: пассивный, активный, критически-активный, катастрофически-активный [3]. Программа апробирована на экспериментальных данных, полученных на объектах и моделях с источниками АЭ разного класса (рис.1). АЭ контроль проводился в условиях наличии эксплуатационных шумов различного уровня.

Для обработки использовался многомерный массив данных. Массив данных рассчитывался с помощью программы обработки исходных данных и включал в себя такие параметры акустической эмиссии, как координаты источников АЭ, время прихода импульсов, энергия импульса, величина максимальной амплитуды, длительность переднего фронта, скорость нарастания, длительность импульса.

Очистка от шума с помощью вейвлет-анализа включала следующие стадии обработки.

1. Сигнал раскладывается по базису функций. Разложение проводится при помощи вейвлета Добеши, для построения воспользуемся уравнением растяжения и вейвлет- уравнением
2. Выбор порогового значения шума для каждого уровня разложения. Функции подбираются так, что каждый уровень характеризует функцию в большем временном масштабе и меньшем частотном.

3. Пороговая фильтрация коэффициентов детализации.
4. Реконструкция сигнала.

Программа работала в режиме планарной и линейной локации.

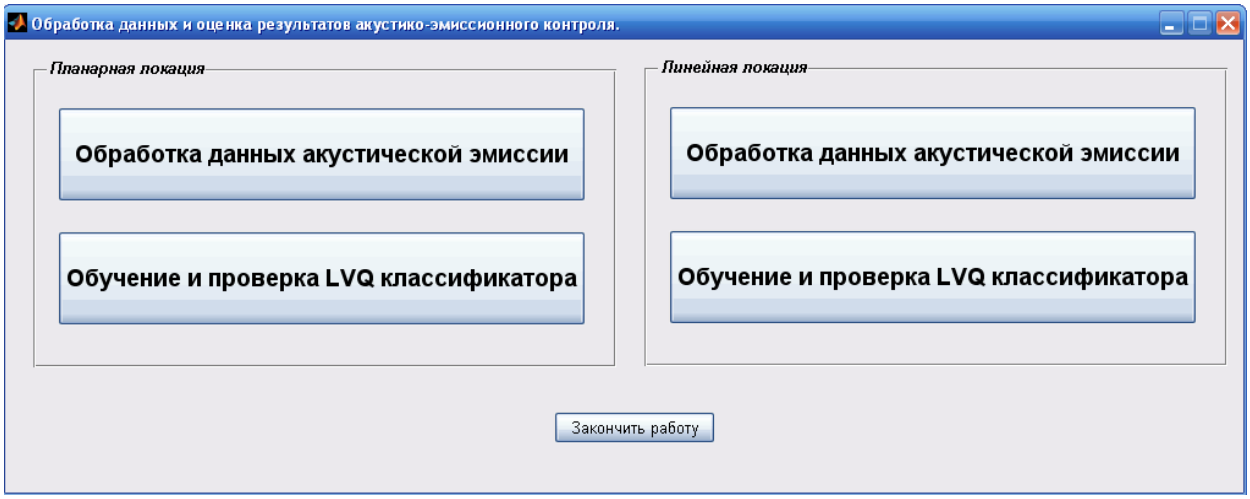


Рис.1. Рабочий интерфейс программы

В качестве расчетной модели использовали классификацию источников АЭ по 4-м классам опасности по интегральному критерию [3]

	$J_k < 1$	$J_k > 1$	$J_k >> 1$
$F << 1$	I	II	III
$F = 1$	II	II	III
$F > 1$	III	III	IV

$$F = \frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\frac{N_{k+1}}{N_k}, J_k = \frac{A_K}{W\sum_{k+1}^{K}A_k}, \quad \frac{N_{k+1}}{N_k} = \begin{cases} 1, при\ N_k = 0\ и\ N_{k+1} > 0 \\ 0, при\ N_k > 0\ и\ N_{k+1} = 0 \end{cases}$$

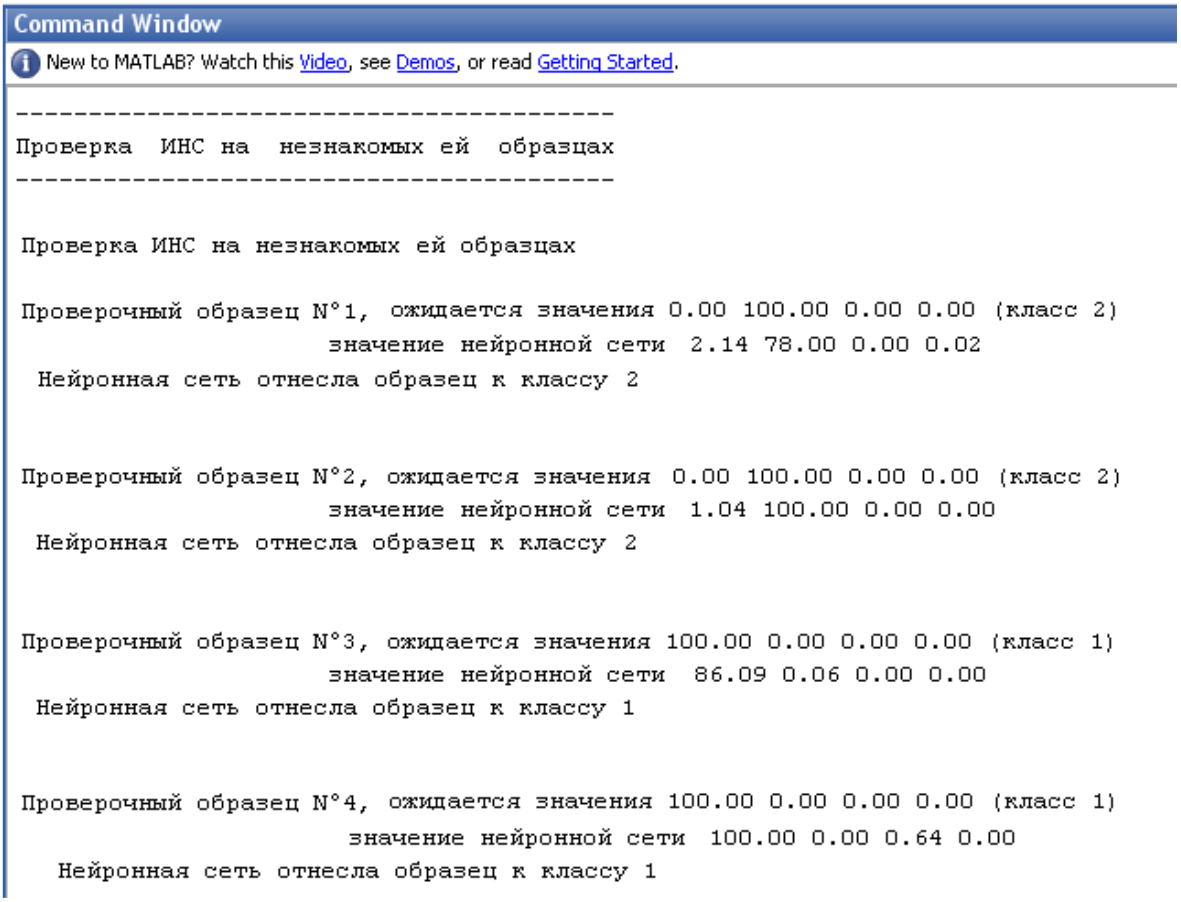
где N_k - число событий в k-ом интервале оценки параметров;

N_{k+1} -число событий в $k+1$-ом интервале оценки параметров;

k - номер интервала оценки параметров.

Результаты теста работы нейронной сети для планарной схемы локации источников АЭ показаны в таблице.

Можно видеть, что нейронные сети векторного квантования даже на ограниченной базе данных (не более 10-20 источников АЭ), позволяют классифицировать источники акустической эмиссии по всем классам опасности с достоверностью не хуже 75%.



Таким образом, показано, что нейронные сети векторного квантования, использующие обучение с учителем (LVQ-сети), позволяют классифицировать источники акустической эмиссии по всем 4-м классам опасности. Нейронная сеть LVQ, обученная на ограниченном множестве данных, способна обобщать полученную информацию и показывать хорошие результаты классификации на новых данных, не использовавшихся в процессе обучения.

Список литературы

1. Медведев В.С., Потемкин В.Г. “Нейронные сети. MATLAB 6”.- М: Диалог-МИФИ, 2002.
2. Ф. Уоссерман. “Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика”. М.: Мир, 1992.
3. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. Москва, 2003.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ

Параев С.А.[1], Бутусов О.Б.[2]

[1]*АО «НИИхиммаш», Москва, Россия*
sa23032008@ya.ru
[2]*МАМИ, Москва, Россия*

Вейвлет-анализ широко применяется в разных отраслях техники, где требуется повышенная точность и надежность обработки данных [1-3]. К вейвлетам относятся локализованные функции, которые конструируются из одного материнского вейвлета (или по любой другой независимой переменной) путем операций сдвига по аргументу и масштабного изменения.

В настоящей работе разработаны программы вейвлет-анализа сигналов акустической эмиссии, в т.ч. для очистки сигнала от шума, реконструкции исходного сигнала, уточнения координат и других характеристик источника АЭ. Проведена тестовая обработка данных по составленным программам. На рис.1. показано окно программы.

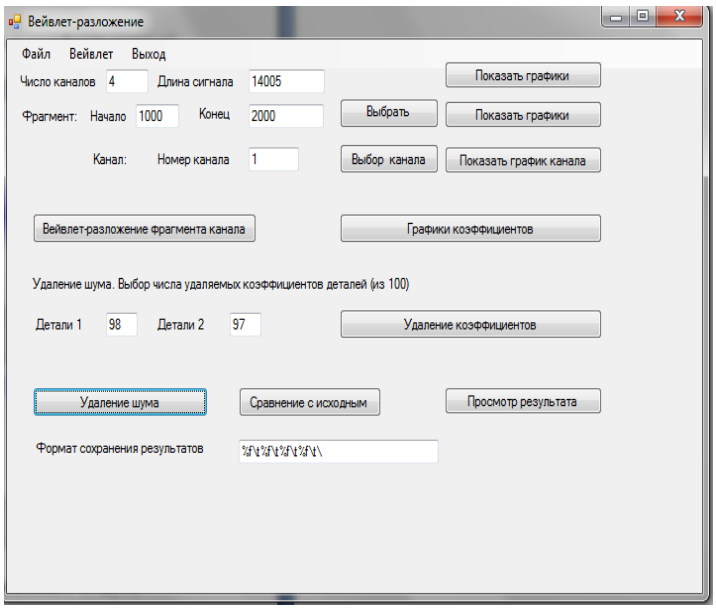


Рис. 1. Диалоговое окно программы вейвлет-анализа

Очистка от шума с помощью вейлет-анализа включала следующие этапы.

1. Декомпозиция. Сигнал раскладывается по базису функций. Разложение проводится при помощи вейвлета Добеши.
2. Пороговая обработка детализирующих коэффициентов. Выбор порогового значения шума для каждого уровня разложения. Функции подбираются так, что каждый уровень характеризует функцию в большем временном масштабе и меньшем частотном.
3. Пороговая фильтрация коэффициентов детализации.
4. Реконструкция сигнала.

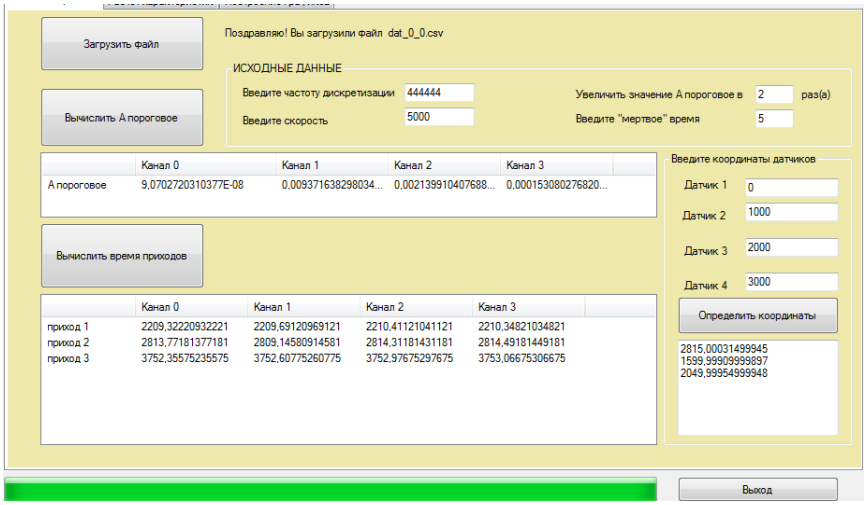


Рис.2. Окно программы с определение координат в режиме реального времени

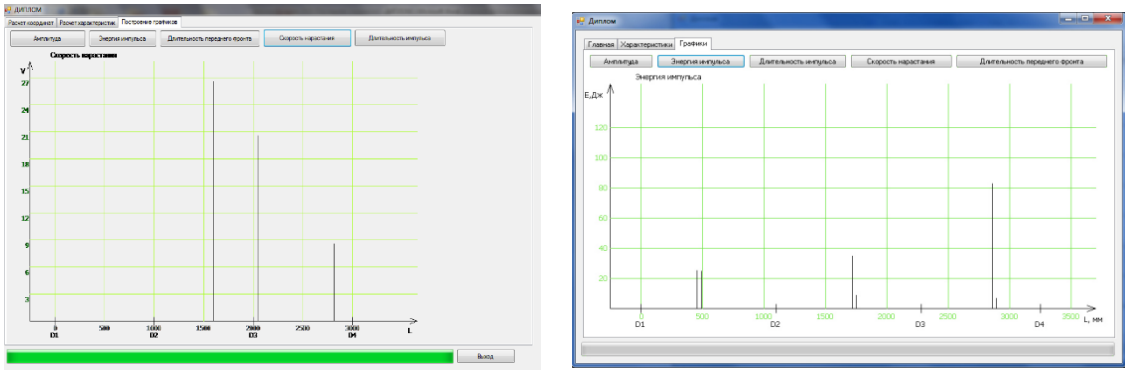


Рис.3. Уточненные графики энергии и длительности импульса, скорости нарастания, длительности переднего фронта, построенные с помощью разработанной программы вейвлет-анализа

Выводы:

1. Разработаны вейвлет-программы обработки сигналов и проведено их тестирование
2. Показано, что вейвлет-анализ позволяет уточнить характеристики источников АЭ (время прихода, длительность, энергия, координаты, и др.) и таким образом повысить достоверность результатов акустико-эмиссионного контроля.
3. Применение вейвлет - анализа позволяет эффективно очищать источники АЭ от шума и даже при наличии шумов будет сохраняться информация о слабых источниках АЭ, что важно для контроля объектов с низким уровнем акустико-эмиссионной активности.

Список литературы

1. Добеши, И. «Десять лекций по вейвлетам». Москва, РХД, 2001.
2. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: Основы теории и примеры применения. – Успехи физических наук, 1996, т.166, № 11
3. Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ АНАЛИЗЕ КИНЕТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ

Брянский А.А., Башков О.В.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
г. Комсомольск-на-Амуре, Россия,
bryansky.aa@yandex.ru

Комплексная структура полимерных композиционных материалов (ПКМ) обеспечивает возможность задания механических свойств и их ориентирования в зависимости от используемых материалов и технологического процесса. Неоднородная структура ПКМ приводит к образованию повреждений в условиях приложения внешней нагрузки.

Одним из методов исследования процессов образования повреждений в материалах является метод акустической эмиссии (АЭ), который нашёл в настоящее время широкое применение [1]. Регистрируемые в ходе механических испытаний сигналы АЭ содержат информацию о природе образующихся повреждений и характеристиках среды. В случае ПКМ, зачастую неизвестна связь между значениями расчётных параметров сигналов АЭ с конкретными типами повреждений. Однако, использование алгоритмов кластеризации, таких как k-средних и самоорганизующейся карты (SOM), позволят изначально получить группы событий и только потом дать им характеристику.

Объектом исследования являлся образец стеклопластика, изготовленного из связующего DION 9300 FR и 46 слоёв стеклоткани Т11-ГВС9. Механическое испытание проводилось методом статического растяжения со скоростью 2 мм/мин. Регистрация АЭ проводилась на программно-аппаратном комплексе, разработанном в ЦКП «Новые материалы и технологии» КнАГУ [2].

Кластеризация данных АЭ была реализована в виде двух стадий с применением алгоритмов SOM на первой стадии (рис. 1), и k-средних на второй стадии. Для зарегистрированных сигналов АЭ рассчитывались спектры Фурье, из которых брался информативный диапазон 25-450 кГц, и производилась нормализация. Обработанные спектры использовались для кластеризации алгоритмом SOM с количеством выходных кластеров равным 100 штук. На второй стадии кластеризации выполнялось снижение разрешения спектров центроидов, полученных на первой стадии, с использованием алгоритма k-средних с выходным количеством кластеров 25 штук. Анализ каждого кластера проводился по их интенсивности накопления. Пороговым значением интенсивности регистрации сигналов АЭ, характеризующим активное образование повреждений, было принято значение равное 1 сигнал/с.

Рис. 1. Схема двухстадийной кластеризации сигналов АЭ

В результате обработки данных АЭ по схеме, приведенной на рис. 1, были получены кластеры, характеризующие типы повреждений в образце ПКМ в течение его механического испытания. Центроиды полученных кластеров представлены на рис. 2. Кластеры С1, С3, С5 и С7 характеризуют комбинированные разрушения

стекловолокон и различных масштабов повреждений матрицы. Кластер С2 характеризует смешанные повреждения различных типов, кластер С4 – разрушение стекловолокон, кластер С6 – микроповреждения матрицы и кластер С8 – комбинированное разрушение волокон и образование критических повреждений матрицы. На рис. 3 представлены периоды накопления каждого кластеры при превышении интенсивности 0,9 сигналов/с.

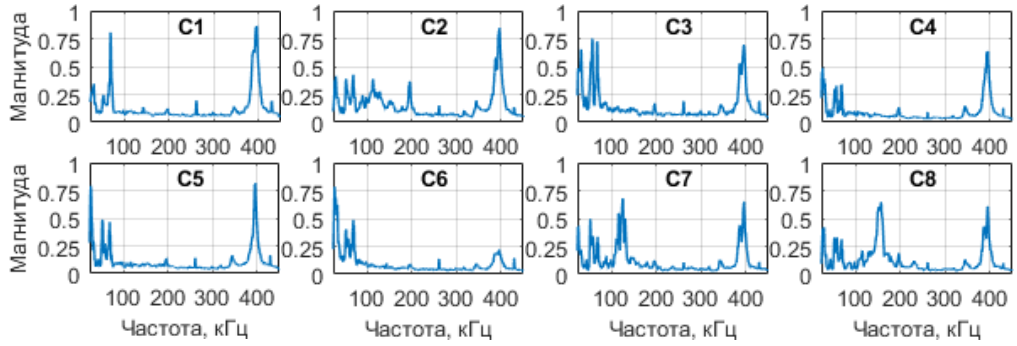


Рис. 2. Центроиды выходных кластеров

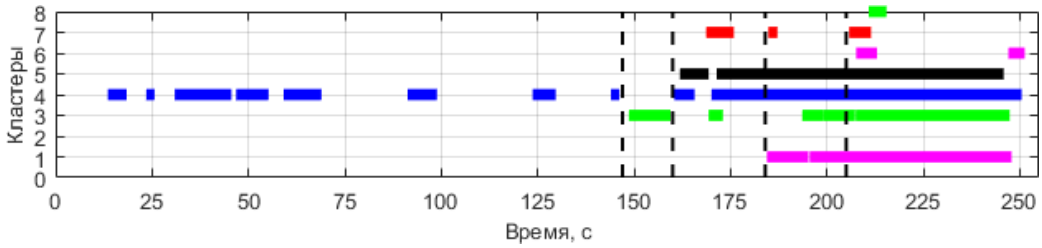


Рис. 3. Периоды превышения порога интенсивности накопления кластеров

Процесс накопления повреждений в образце ПКМ в ходе механического испытания растяжением можно описать следующим образом:

1) образование повреждений волокон с микроповреждениями матрицы;

2) увеличение доли микроповреждений матрицы;

3) комбинированные разрушение волокон и образование микроповреждений матрицы, увеличение масштаба микроповреждений матрицы;

4) рост количества комбинированных повреждений волокон и матрицы;

5) образование критических повреждений матрицы, активное накопление повреждений до разрыва образца.

По результатам проведенного исследования сделан вывод, что применение двухстадийной кластеризации позволяет совместить преимущества двух алгоритмов, а дополнительное применение статистического анализа улучшает качество анализа данных об испытаниях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90318/19

Список литературы

1. Gutkin R. et al. On acoustic emission for failure investigation in CFRP: Pattern recognition and peak frequency analyses //Mechanical systems and signal processing. – 2011. – Т. 25. – №. 4. – С. 1393-1407
2. Bashkov O. V. et al. Damage evaluation criteria based on acoustic emission parameters for polymer composite materials //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2018. – Т. 2051. – №. 1. – С. 020027.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Кхун Х.Х., Башков О. В.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
г. Комсомольск-на-Амуре, Россия
khonhanhtooaung@gmail.com

Исследование процесса накопления повреждений в конструкционных материалах является одной из важных задач при определении структурного состояния материалов и остаточного ресурса конструкций. Одним из решений данных задач является разработка методик интегральной оценки поврежденности, позволяющих получать качественную и количественную информацию о структурном изменении состояния конструкции в реальном времени развития деформации или разрушения [1, 2].

Для проведения исследований были изготовлены образцы из алюминиевого сплава 1163 для исследования на изгиб. На каждом из образцов в процессе испытания на усталость была выращена магистральная трещина, не превышающая половины сечения. Образцы с помощью специальной струбцины прижимались к поверхности пластины из сплава Д16. Преобразователь акустической эмиссии устанавливался на различном расстоянии до места крепления образца. При приложении к образцу усилия с заданной величиной изгиба, сигнал АЭ формировался за счет единичного подрастания трещины. Нагружение производилось последовательно несколько раз с одновременной регистрацией генерируемых сигналов АЭ. Нагружение осуществлялось всегда с одинаковой скоростью.

Для разработки методики идентификации развивающихся повреждений выполнялся анализ вейвлет-декомпозиций зарегистрированных сигналов АЭ для компонент шести уровней разложения [3]. Было отмечено различие между последовательно зарегистрированными сигналами АЭ для компоненты четвертого уровня разложения. Был предложен критерий оценки свойств материала в локальном месте развития дефекта, являющегося источником АЭ [4]. Новым параметром АЭ, характеризующим свойства материала как источника АЭ, является отношение энергий E_1/E_2 Фурье спектра вейвлет-декомпозиции четвертого уровня разложения, рассчитанных для диапазонов частот: 200-300 кГц (энергия E_1) и 300-400 кГц (энергия E_2).

На рис. 1 приведен график, определяющий взаимосвязь между расчетным параметром E_1/E_2 для зарегистрированных сигналов АЭ, и микротвердостью материала, измеренной вдоль трещины, продвигающейся вглубь образца. По мере продвижения магистральной трещины вглубь материала микротвердость снижается. Подобная тенденция к снижению наблюдается и для параметра E_1/E_2.

Объясняются полученные зависимости тем, что упрочненный в процессе накопления усталостных повреждений материал характеризуется повышенной твердостью в устье усталостной трещины. По мере удаления от устья трещины твердость материала снижается, что подтверждается выполненными замерами. При создании однократных нагрузок, превышающих предел текучести материала, выращенная усталостная трещина продвигается вглубь материала, удаляясь от зоны упрочнения. Характеристики сигналов АЭ, регистрируемых из зон с различными свойствами, меняются. Предложенный параметр АЭ в виде отношения E_1/E_2 обладает высокой чувствительностью к идентификации свойств среды с развивающимися дефектами типа трещин.

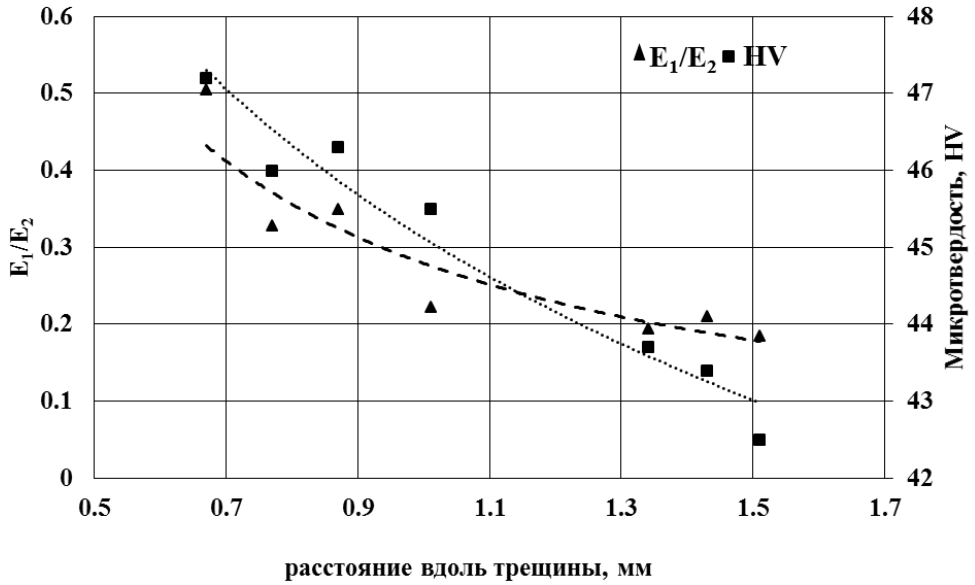


Рис. 1. Зависимость отношения E_1/E_2 и микротвердости от расстояния вдоль трещины в образце 1163, измеренного от первоначального расположения ее устья

Для использования предложенного параметра (E_1/E_2) на практике необходимо построить совокупность графиков зависимости параметра АЭ в виде отношения E_1/E_2 и параметра, определяющего свойство материала, например, микротвердости, полученных при испытаниях на различных расстояниях между источником и приемником АЭ. Новый критерий позволяет косвенно установить свойства структуры в области развивающегося дефекта. Ранее данная задача решалась только на основе данных о затухании энергии ультразвуковой волны в материале при невозможности установления типа и свойств развивающегося источника.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №.19-38-90318/19.

Список литературы

1. Бурков, М.В. Применение ультразвуковой методики с использованием волн Лэмба для обнаружения малозаметных ударных повреждений углепластиков / М. В. Бурков, П. С. Любутин, А.В. Бяков. // Дефектоскопия. – 2019. – № 2. – С. 3–15.
2. Scholey, J.J. Quantitative experimental measurements of matrix cracking and delamination using acoustic emission / J.J. Scholey, P. D. Wilcox, M. R. Wisnom, M.I. Friswell. // Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. – 2010. – № 41, – P. 612–623.
3. Башков, О.В. Исследования волн акустической эмиссии при возбуждении на поверхности и внутри алюминиевой пластины / О.В. Башков, Х.Х.А. Кхун // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. Т. 1. № 1 (41). С. 106-112.
4. Пат. 2737235 РФ. Способ идентификации источников акустической эмиссии / О. В. Башков, Кхун Хан Хту Аунг, И. О. Башков, А. А. Брянский. – 2020115070; заявл. 26.03.2020; опубл. 26.11.2020, Бюл. № 33. – 14 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА АДАПТИВНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ

Башков О.В., Ромашко Р.В., Башков И.О., Кхун Х.Х., Зайков В.И., Бао Ф.

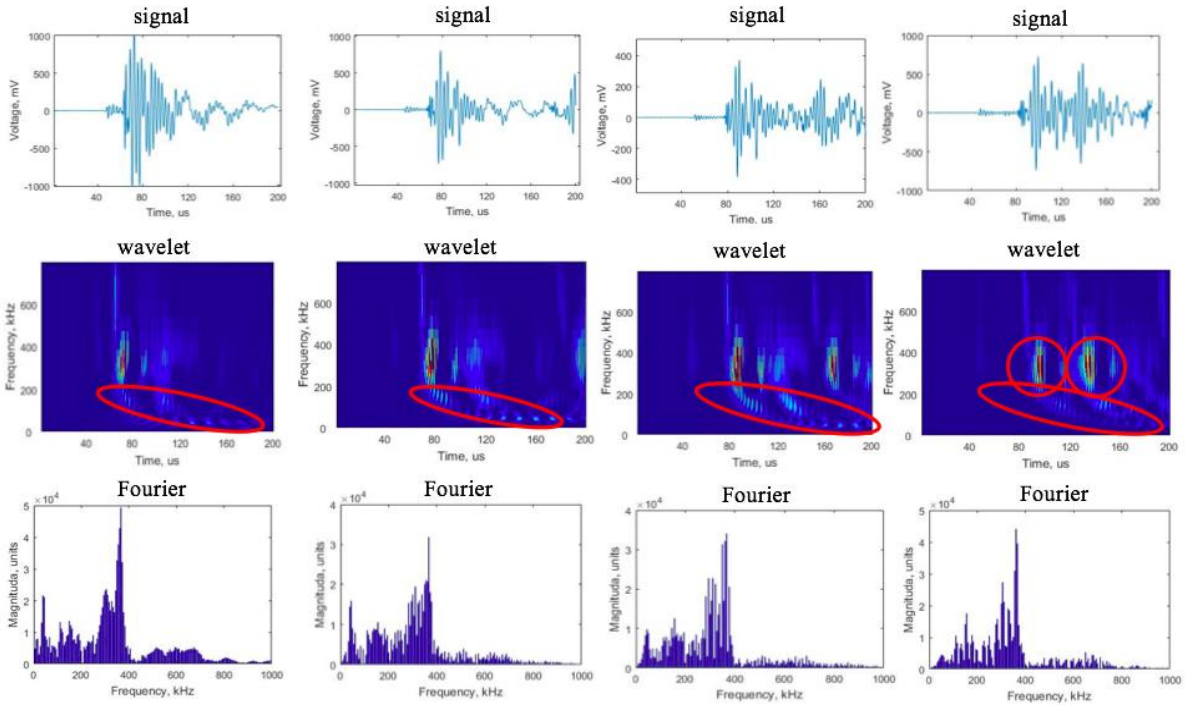
Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
г. Комсомольск-на-Амуре, Россия
bashkov@knastu.ru

Одним из эффективных методов неразрушающего контроля является метод акустической эмиссии. Был разработан принципиально новый тип датчиков акустической эмиссии. Датчик представляет собой распределенный волоконно-оптический датчик, построенный по схеме адаптивного интерферометра, основанного на использовании перезаписываемых динамических голограмм в фоторефрактивных кристаллах. Были проведены исследования на двух типах адаптивных интерферометров, функционирующих на фоторефрактивных кристаллах: теллуриде кадмия (CdTe) и силикате висмута ($Bi_{12}SiO_2$). Исследования показали возможность регистрации волн акустической эмиссии в металлических и полимерных композиционных материалах [1, 2].

В результате исследований интерферометра на CdTe с частотой отсечки 0,5 кГц установлено, что частота достаточна для подавления температурных флуктуаций и механических колебаний в оптических волокнах с целью их использования для акустической эмиссии (АЭ) [3,4].

В данной работе были проведены исследования волн АЭ, регистрируемых от различных источников возбуждения. Возбуждение осуществлялось искусственными источниками АЭ путем излома грифеля карандаша диаметром 0.5 мм. Имитация различных типов дефектов задавалась изменением твердости грифеля. В исследованиях использовались грифели твердостью HB, H и 2H, помещаемые в имитатор Су-Нильсена. Твердость грифеля в данном случае является функцией скорости развития трещины. Грифель выступал над краем имитатора всегда на одинаковом расстоянии 2.5 мм. Это обеспечивало повторяемость эксперимента.

Был выполнен сравнительный анализ волн, регистрируемых пьезоэлектрическими и волоконно-оптическими датчиками на дюралюминиевой пластине. Сигналы возбуждались на алюминиевой пластине размером 500 мм х 600 мм х 2 мм на различном расстоянии от датчиков. При регистрации сигналов АЭ пьезоэлектрическими датчиками, широкополосный датчик АЭ типа GT301 устанавливался в центре пластины, а источник возбуждался на расстояниях 100 мм, 150 мм, 200 мм и 250 мм. По численным значениям параметров сигналов, Фурье спектру и картине вейвлет спектрограммы можно определить ряд ключевых параметров, характеризующих АЭ волну и ее источник (рис. 1). Изменение расстояния до источника АЭ приводит к трансформации сигнала, его амплитуды и вейвлет спектра, определяя форму групповой волны в пластине. Фурье спектр меняется незначительно. На вейвлет спектрограмме можно наблюдать моды групповой волны, выделенные эллипсами. При анализе работ установлено, что когда волна АЭ генерируется монополем (излом грифеля) на верхней поверхности пластины, антисимметричная волна моды A0 имеет наибольшую интенсивность в сравнении с симметричной модой S0. На осциллограммах сигналов, а лучше всего на вейвлет спектрограмме можно видеть сигнал, отраженный от края пластины сигнал при удалении источника на расстояние 200 мм и 250 мм (отмечено кружками на рис. 1).



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Результаты обработки сигналов, зарегистрированных пьезоэлектрическими датчиками на разных расстояниях между датчиком и источником:
а) 100 мм; *б*) 150 мм; *в*) 200 мм; *г*) 250 мм

Исследования сигналов АЭ, зарегистрированных волоконно-оптическими датчиками на основе голографического интерферометра с кристаллом теллурида кадмия, показали их стабильность и повторяемость. Анализ показал возможность выделения компоненты сигнала с наибольшей интенсивностью в регистрируемом частотном диапазоне. Были установлены зависимости магнитуды выделенной частотной компоненты от расстояния и твердости разрушаемого имитатора Су-Нильсена. Этот субъективный фактор выделения частотной компоненты требует еще проведения дополнительных исследований, основанных на анализе распределения амплитуды и энергии волн по длине волоконно-оптического датчика по отношению к месту регистрации сигнала АЭ.

Для практического использования волоконно-оптических датчиков акустической эмиссии на объектах требуется проработка методов локации источников акустической эмиссии на протяженных объектах, где применение датчиков наиболее актуально.

Список литературы

1. Meltz G., Morey W. W., Glenn W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // V. 14. No 15. 1989. P. 823-825. DOI: 10.1364/OL.14.000823.
2. O.V. Bashkov, R.V. Romashko, H. Khon, M.N. Bezruk, V.I. Zaikov, I.O. Bashkov, Registration of acoustic emission waves in anisotropic composite plates by fiber-optic sensors. // Proc. SPIE 11024, Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics, 2017.
3. Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Yu.N. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 031101.
4. Бростилова Т.Ю., Бростилов С.А., Мурашкина Т.И. Волоконно-оптический датчик деформации// Надежность и качество сложных систем. № 1. 2013. С. 93-99.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ОКСИДНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Башков О.В., Бао Ф.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
г. Комсомольск-на-Амуре, Россия
bashkov@knastu.ru

Оксидные покрытия, наносимые методом микродугового оксидирования, используются для защиты поверхности от износа, воздействия высоких температур, в качестве диэлектрических покрытий, а также в качестве твердой пористой основы для нанесения других видов функциональных покрытий. Высокая адгезия и неоднородность покрытий, наносимых микродуговым оксидированием, затрудняют использование стандартных способов определения их качества. Традиционные методы для оценки МДО не позволяют объективно анализировать происхождение дефектов при рзрушении для определения текущего накопления повреждений [1, 2]. Метод акустической эмиссии (АЭ) – один из методов пассивной диагностики структурных изменений, возникающих в материалах при внешнем воздействии.

Микродуговое оксидирование выполнялось на образцах алюминиевого сплава Al-10Fe-7Mn-1Si, изготовленных для механического испытания растяжением. Образцы изготавливались из листового материала толщиной 3 мм по форме двойной лопатки с размером рабочей части 3 мм × 3 мм × 20 мм. Амплитуда импульсов напряжения оксидирования составляла 400 В. Образцы подвергались микродуговому воздействию в течение 10, 20, 30 и 40 минут в растворе электролита. Преобразователь АЭ устанавливался на гладкую широкую поверхность образца вне его рабочей части. Регистрация АЭ выполнялась на программно-аппаратном комплексе AE-Pro2.0 [3] в течение всего периода испытания. Скорость деформации составляла 1 мм/мин.

Для оценки особенности повреждений покрытий МДО с различными времени микродугового воздействия в ходе разрушения выполнялся набор параметрического анализа, включая медианную частоту, амплитуду, энергию и активность зарегистрированных сигналов АЭ [4].

На рис. 1 приведена диаграмма деформации с графиками накопления сигналов АЭ во времени, зарегистрированными для образцов с различным временем микродугового воздействия. Можно видеть увеличение суммарного накопления сигналов АЭ по мере увеличения времени оксидирования, начиная со стадии начала пластической деформации (II). Наиболее активный рост числа сигналов АЭ для образцов со временем оксидирования 30 и 40 мин наблюдается на стадии локализации деформации (IV), сопровождающейся образованием шейки.

Объясняются представленные зависимости тем, что на стадии II происходит растрескивание покрытия при несовместимости деформации пластичной подложки и твердого покрытия. Снижение энергии сигналов АЭ на стадии IV связано с преимущественной пластической деформацией на вновь образованных после растрескивания поверхностях в связи с повышением скорости локальной деформации в устьях трещин.

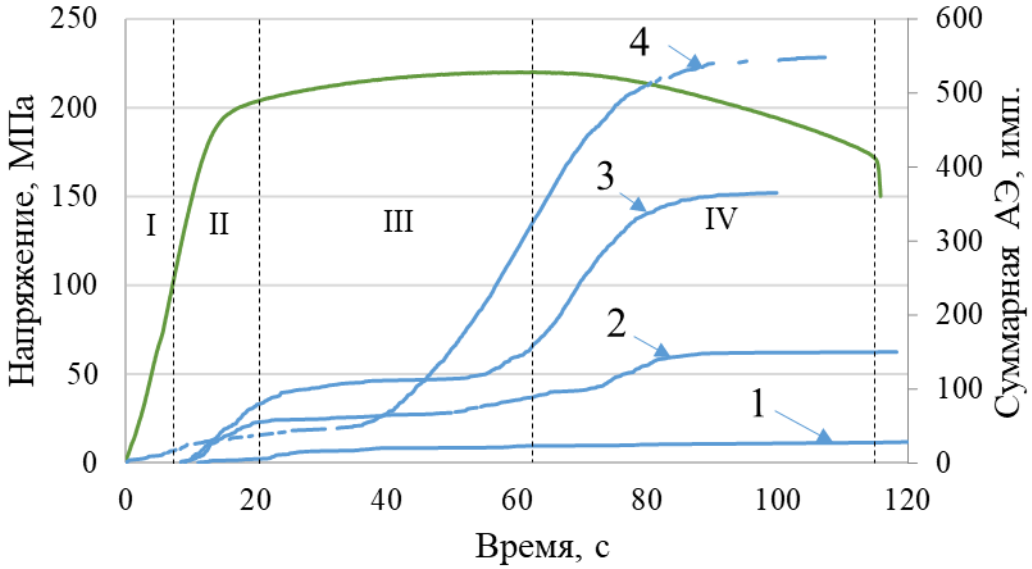


Рис.1. Диаграмма деформации с графиками накопления сигналов АЭ во времени, зарегистрированными для образцов с различным временем микродугового воздействия: 1 – 10 мин; 2 – 20 мин; 3 – 30 мин; 4 – 40 мин.

На основе анализа таких параметров, как суммарная АЭ, амплитуда, энергия, медианная частота сигналов АЭ, можно выявлять совокупности параметров АЭ и их численных значений, характеризующих разрушение оксидного покрытия и подложки. Закономерности изменения регистрируемых параметров АЭ, можно использовать для описания особенностей повреждения различных стадий деформации и растяжения алюминиевых сплавов с оксидными покрытиями, наносимыми методом МДО.

Список литературы

1. Беспалова Ж. И., Паненко И. Н., Дубовсков В. В., Козаченко П. Н., Кудрявцев Ю. Д. (2012), “Исследование процесса формирования оптически черных оксидно-керамических покрытий на поверхности алюминиевого сплава 1160”, Известия вузов. Естественные науки., No.5, pp. 63-66.
2. МихеевА.Е., ТрушкинаТ.В., ГирнА.В., РаводинаД.В., ИвасевС.С. (2013), “Химические процессы при микродуговом оксидировании”, Вестник СибГАУ, No. 2(48), pp.212-215.
3. Bashkov O., Li X., Bao F., Kim V.A., Zhou C. Acoustic emission that occurs during the destruction of coatings applied by microarc oxidation on an aluminum alloy// Materials Today: Proceedings 19. 2019. P. 2522–2525
4. Башков, О.В. Исследование влияния электрических режимов микродугового оксидирования на морфологию оксидного покрытия на алюминиевом сплаве 1163 / О.В. Башков, Ф. Бао// Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. 2020. Ч. 1.С. 14-18.

A-LINE. ВЫПОЛНЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ. ПРАКТИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО

Комаров А.Г.

АО «ВНИКТИнефтехимоборудование», г. Волгоград, Россия
alexeykom@mail.ru

Разработанный совместно со специалистами «ИНТЕРЮНИС-ИТ» методический документ «A-Line. Выполнение акустико-эмиссионного контроля. Практическое руководство» может быть использован для обоснованного выбора при планировании приобретения подходящей АЭ системы, при выполнении практического акустико-эмиссионного контроля оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств, при обучении специалистов, в качестве справочного пособия по АЭ приборам семейства A-Line производства компании ИНТЕРЮНИС-ИТ.

Руководство включает более 350 страниц, более 250 иллюстраций и состоит из следующих разделов и приложений:

1. Общие положения
2. Порядок применения и подготовка АЭК
3. Аппаратное обеспечение АЭ систем семейства A-Line
4. Программное обеспечение систем A-Line
5. Подготовка объекта контроля
6. Подготовка нагружения объекта АЭК
7. Подготовка АЭ системы к проведению АЭК
8. Порядок проведения АЭК
9. Оценка результатов АЭ контроля в ходе испытаний
10. Постобработка и оценка результатов АЭК
11. Оформление результатов АЭК
12. Требования к организациям, специалистам, проводящим АЭК и аппаратуре АЭК
13. Обеспечение безопасности при выполнении АЭК

Приложение 1 Список литературы
Приложение 2 Дополнительное ПО для анализа/оценки результатов АЭК
Приложение 3 Рабочий протокол АЭК
Приложение 4 Пример Программы работ
Приложение 5 Пример Технологии АЭК
Приложение 6 Схема расположения ПАЭ
Приложение 7 Программа нагружения
Приложение 8 Заключение по результатам АЭК
Приложение 9 Протокол АЭК
Приложение 10 Журналы проверки ПАЭ и предусилителей/модулей

Руководство разработано на основе ПБ 03-593-03 «Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов» с использованием лучших практик, технологий и подходов к проведению АЭК, отечественных и зарубежных нормативных документов, на основе практического опыта АЭК, применения различных аппаратных средств и программных продуктов.

Настоящий доклад представляет Руководство, его содержание, особенности изложения, возможное использование.

Список литературы

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением», утвержденные приказом Ростехнадзора от 15.20.2020 № 563.
2. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов.
3. ГОСТ Р ИСО 12716-2009. Контроль неразрушающий. Акустическая эмиссия. Словарь.
4. ГОСТ Р 52727-2007. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.
5. ГОСТ Р 55045-2012. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Термины, определения и обозначения
6. EN 14584 Non-destructive testing - Acoustic emission - Examination of metallic pressure equipment during proof testing – Planar location of AE sources.
7. «A-Line». Руководство пользователя. ИНТЕРЮНИС-ИТ. 2018.
8. Неразрушающий контроль. Справочник: в 7т. Том 7. Книга 1. Метод акустической эмиссии. Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2005.

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО И АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ЗАПРАВОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ

Астанков А.М.[1], Ковалевич А.С.[2], Степанова К.А.[2]

[1] *Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»,* astankovy@yandex.ru
[2] *Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия*

Заправочное оборудование стартовых комплексов представляет собой совокупность территориально распределенных технически сложных агрегатов и систем, соединенных между собой герметичными магистралями. Наиболее критичными, с точки зрения эксплуатации, являются насосные агрегаты, работающие в условиях воздействия неблагоприятных факторов. К таким факторам относятся: агрессивные высокотоксичные компоненты ракетного топлива, знакопеременные нагрузки, тепловые градиенты и ацикличные режимы работы.

Исходя из высокой степени риска создания аварийной ситуации при выходе из строя насосных агрегатов, информация о текущем техническом состоянии данного вида оборудования выходит на первый план. Для обеспечения оценки технического состояния, в настоящий момент, используется система планово-предупредительных ремонтов, что не обеспечивает достоверность информации о текущем состоянии агрегатов в межрегламентный период [1].

Для обеспечения повышения достоверности информации о текущем техническом состоянии применяются многоканальные системы вибродиагностики. Подобные системы хорошо зарекомендовали себя на различных насосных агрегатах непрерывного и многоциклового функционирования в ходе постоянного мониторинга технического состояния [2]. Однако, ввиду особенностей функционирования заправочного оборудования стартовых комплексов, результаты применения вибродиагностических методов контроля являются недостаточно информативными.

С целью повышения информативности результатов контроля технического состояния насосных агрегатов заправочного оборудования стартовых комплексов, было предложено использовать акустико-эмиссионный метод контроля в совокупности с вибрационным методом. Для установления корреляционных зависимостей между вводимыми функциональными отклонениями (перекос подшипникового узла, несоосность, дисбаланс и т.д.) регистрируемыми параметрами акустико-эмиссионного контроля была разработана экспериментальная установка (рис.1) с соответствующей схемой расстановки преобразователей акустической эмиссии.

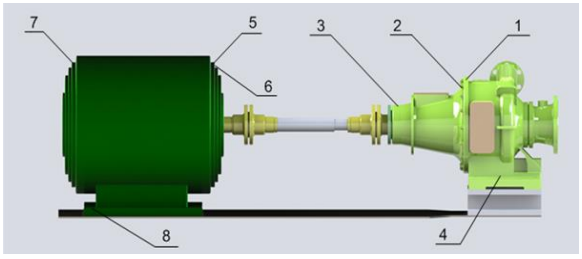
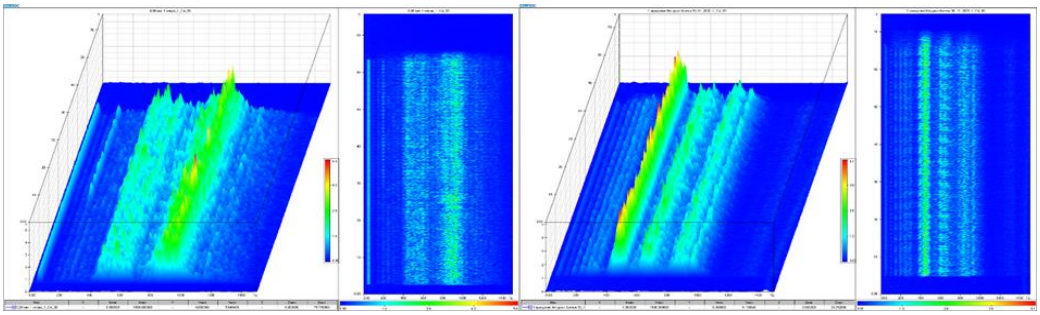


Рис. 1. Экспериментальная установка и схема расстановки преобразователей АЭ

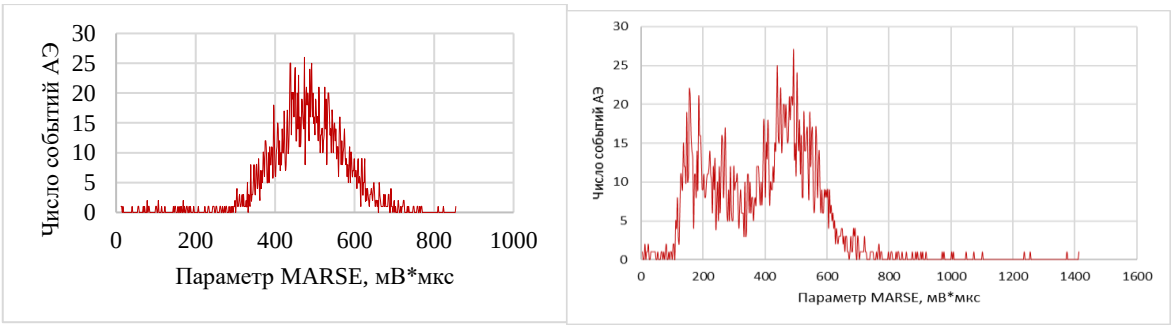
Регистрация акустико-эмиссионных сигналов и параметров вибрации осуществлялись на всем протяжении эксперимента при различных уровнях дефектности элементов стенда. Характерное изменение спектра и амплитудного уровня сигналов при вибрационном контроле за счет введения дефекта типа несоосность вала приведено на рис. 2.



а *б*

Рис. 2. Характерное изменение спектра и амплитудного уровня сигналов при вибрационном контроле: *а*) без дефекта; *б*) дефект типа несоосность вала

Изменение параметров акустико-эмиссионных сигналов наблюдалось на более ранней стадии диагностики при искусственном введении дефектов по сравнению с вибрационным методом. Изменение энергетических характеристик сигналов акустической эмиссии по параметру MARSE [3] при введении дефекта типа несоосность вала представлена на рис. 3.



а *б*

Рис. 3. Изменение энергетических характеристик сигналов акустической эмиссии: *а)* без дефекта; *б*) дефект типа несоосность вала

Результаты эксперимента показали перспективность применения метода акустической эмиссии на ранней стадии развития дефектов характерных для насосных агрегатов, функционирующих в неблагоприятных условиях эксплуатации. Комплексирование вибрационного и акустико-эмиссионного метода диагностики во время проведения периодических работ по оценке текущего технического состояния насосных агрегатов позволяет существенно повысить информативность контроля и точность принятия решения о дальнейшей эксплуатации данного вида оборудования.

Список литературы

1. Теория и практика эксплуатации объектов космической инфраструктуры. Том 1. Объекты космической инфраструктуры: монография. –С.-Пб.: БХВ-Петербург, 2008 г.
2. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учеб. пособие // М-во образования и науки РФ, ГОУ ВПО «Омский гос. тех. ун-т»; НПЦ «Динамика». — 2-е изд., с уточн. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014 г.
3. ПБ 03-593-03 Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. Введ. 09.06.2003 г.

Именной указатель

Алипов А.В. 109
Андреев В.А. 86
Артющенко А.П. 53
Афанасьев М.А. 99
Астанков А.М. 134

Бакшеев В.Г. 44
Балдычев С.В. 40
Бао Ф. 128, 130
Барат В.А. 27, 107
Бардаков В.В. 27
Башков И.О. 128
Башков О.В. 124, 126, 128, 130
Беляев В.С. 81
Бережко П.Г. 46, 47
Бигус Г.А. 98
Бобров А.Л. 95
Ботвина Л.Р. 13, 14
Брянский А.А. 124
Бутусов О.Б. 119, 122
Бычков В.Б. 81

Вагапов М.А. 15
Васильев И.Е. 115
Веретенников А.А. 55
Виноградов А.Ю. 4, 15
Волошина В.Ю. 101, 103
Вьюненко Ю.Н. 86

Гасанов М.Ф. 77, 79
Гиляров В.Л. 22
Гневко А.И. 31
Гомера А.В. 38
Гомера В.П. 9, 38
Григорьев Е.В. 31
Григорьева А.В. 9

Дамаскинская Е.Е. 22, 59
Данюк А.В. 99
Дежин В.В. 49, 51
Денисов А.А. 77, 79
Деркачев И.С. 71

Елизаров С.В. 27, 107

Желтов М.А. 77, 79
Жилкин Е.В. 47
Жуков А.В. 28, 61

Забродина О.Ю. 46, 47
Зайков В.И. 128
Захаров Д.А. 105
Зобнин П.Ю. 92, 94
Золотов А.Е. 77, 79
Зубова Е.М. 67

Иванов В.И. 3, 60, 69, 107

Казаков В.А. 65
Казаков Н.А. 11
Карлов С.А. 65, 111
Кашафдинов И.Ф. 46
Ковалевич А.С. 134
Кольцов Р.Ю. 77
Комаров А.Г. 132
Комлев А.Б. 101, 103
Корост Д.В. 22
Короткевич М.С. 90
Короткевич С.В. 90
Кочегаров С.С. 77, 79
Кудрявцева И.С. 7
Кузнецов А.А. 46, 47
Кузькин В.В. 92
Кузьмин А.Н. 28
Кунавин С.М. 46, 47
Курносов Д.А. 5
Кустов А.И. 71, 73
Кутень М.М. 95
Кхун Х.Х. 126, 128

Лапшин Б.М. 63, 64
Лебедев Д.В. 117
Линдеров М.Л. 15
Лобанов Д.С. 67

Махмудов Х.Ф. 68, 83
Махутов Н.А. 115
Медведев В.Н. 68
Медведев К.А. 27, 57
Мелентьев С.В. 99
Мельников Е.В. 94
Мерсон Д.Л. 4, 15,17, 29, 99
Мигель И.А. 71, 73
Мисейко А.Н. 25
Митяшин С.А. 47
Мишин В.В. 42

Мишин В.М. 42
Мищенко И.В. 115
Моденов М.Ю. 113
Мокрушин В.В. 46, 47

Науменко А.П. 7
Нефедьев Е.Ю. 9, 11
Носов В.В. 20,31,53, 75, 88,97

Овчинников А.Л. 63, 64
Одинец А.И. 7
Озеров К.Г. 31

Павленко И.А. 75
Панин В.И. 44
Панов В.А. 105
Пантелеев И.А. 22, 76
Параев С.А. 117, 119, 122
Патонин А.В. 35, 36
Пенкин А.Г. 84
Пенкин М.А. 84
Перетятко С.А. 88
Петерсен Т.Б. 5, 14
Пичков С.Н. 105
Плюснин А.Д. 99
Покрасин М.А. 84
Пономарёв А.В. 35, 36
Попов А.В. 101, 103

Растегаев И.А. 17, 29, 99
Растегаева И.И. 17, 29
Ромашко Р.В. 128
Рощупкин В.В. 84

Савельев В.Н. 68, 83
Сагайдак А.И. 19
Сазонов А.А. 69
Самохвалов А.Б. 5
Самуйлов А.О. 101, 103
Севастьянов Д.В. 99
Сенкевич Ю.И. 23
Смирнов В.Б. 35, 36
Смородинова А.А. 73
Соколов С.И. 55
Соловов С.Н. 33
Соломонов А.В. 46
Степанова К.А. 134
Стояновский Л.О. 9
Судденок Ю.А. 81
Сульженко В.А. 11, 65
Суркова Д.А. 77, 79

Теплов А.О. 84
Теплов Е.С. 94
Терентьев В.Ф. 84
Терентьев Д.А. 27, 57, 60
Терёшин В.А. 113
Тюрин Е.А. 94
Тютин М.Р. 14
Тябликов А.В. 81

Филиппов Г.А. 42
Фролов Д.И. 22

Ханухов Х.М. 109
Харебов В.Г. 27
Холодов С.С. 98
Хомяков В.В. 44
Хохлова Е.Д. 20
Хрусталев А.К. 99

Царёв М.В. 46, 47
Царёва И.А. 46
Цой Е.В. 113

Чекалин А.С. 63
Черниговский В.Ю. 5
Чернов Д.В. 115
Чернявская Н.В. 86
Черняева Е.В. 86
Четвертухин Н.В. 109
Чугунов А.В. 17
Чуканов А.Н. 113

Шелобков В.И. 69
Шемякин В.В. 5
Шибков А.А. 77, 79
Шитов Д.В. 61
Шихова Н.М. 35, 36
Шишулин Д.Н. 105
Шорин В.Н. 81
Шулатов А.В. 44
Щитов Д.В. 42

Язовский А.В. 7
Яковенко А.А. 113
Яковлев А.В. 11, 40, 65
Ярославкин А.Ю. 92
Ярославкина Е.Е. 92
Ярошенко В.В. 47

Содержание

	Стр.
Иванов В.И. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АЭ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	3
Мерсон Д.Л., Виноградов А.Ю. МЕТОД АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ КАК ТОНКИЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ	4
Петерсен Т.Б., Шемякин В.В., Самохвалов А.Б., Курносов Д.А., Черниговский В.Ю. АЭ КАК КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД МОНИТОРИНГА ОБЪЕКТОВ. ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ.	5
Науменко А.П., Кудрявцева И.С., Одинец А.И., Язовский А.В. МОНИТОРИНГ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО СОСТОЯНИЯ	7
Нефедьев Е.Ю., Григорьева А.В., Стояновский Л.О., Гомера В.П. ПРИМЕНЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ МЕТАЛЛОГРАФИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ СТАЛИ НА СИГНАЛЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	9
Казаков Н.А., Нефедьев Е.Ю., Сульженко В.А., Яковлев А.В. МЕТОДОЛОГИЯ АЭ-КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ШВОВ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ	11
Ботвина Л.Р. ЭФФЕКТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЦИКЛИРОВАНИЯ: ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРОЧНОСТИ	13
Тютин М.Р., Ботвина Л.Р., Петерсен Т.Б. ОЦЕНКА КИНЕТИКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПО ПАРАМЕТРАМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, КОЭРЦИТИМЕТРИЧЕСКОГО И ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ	14
Линдеров М.Л., Вагапов М.А., Мерсон Д.Л., Виноградов А.Ю. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ КАК МЕТОД ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ	15
Растегаев И.А., Чугунов А.В., Растегаева И.И., Мерсон Д.Л. К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРОМЫШЛЕННОГО АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ НА ПРИМЕРЕ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ	17
Сагайдак А.И. СТАНДАРТЫ ПО КОНТРОЛЮ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	19
Носов В.В., Хохлова Е.Д. АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СЛОЖНО КОНТРОЛИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННО-КИНЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА	20

Дамаскинская Е.Е., Гиляров В.Л., Пантелеев И.А., Корост Д.В., Фролов Д.И. ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОТРЕЩИН И КРИТЕРИЙ ПЕРЕХОДА ДЕФОРМИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ В КРИТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ	22
Сенкевич Ю.И. ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ И АНАЛИЗУ СИГНАЛОВ ГЕОАКУСТИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИЙ	23
Мисейко А.Н. ДОСТОВЕРНОСТЬ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	25
Бардаков В.В., Елизаров С.В., Барат В.А., Харебов В.Г., Медведев К.А., Терентьев Д.А. АЭ КОНТРОЛЬ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ	27
Кузьмин А.Н., Жуков А.В. ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ	28
Растегаева И.И., Растегаев И.А., Мерсон Д.Л ВОЗМОЖНОСТИ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИЗНОСА ПАР ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ.	29
Григорьев Е.В., Носов В.В. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ	31
Гневко А. И., Озеров К. Г., Соловов С. Н. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО СПОСОБА КОНТРОЛЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА	33
Патонин А. В., Шихова Н.М., Пономарёв А. В., Смирнов В.Б. ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС INOVA: АППАРАТУРНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАЗРУШЕНИЮ ГОРНЫХ ПОРОД	35
Патонин А. В., Шихова Н.М., Пономарёв А. В., Смирнов В.Б. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ АКУСТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ПО ДАННЫМ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	36
Гомера В.П., Гомера А.В. ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КРИТЕРИЯ "ВЫДЕРЖКА НАГРУЗКИ" ПРИ АЭ КОНТРОЛЕ	38
Яковлев А.В., Балдычев С.В. АЭ-МОНИТОРИНГ СВАРНЫХ ШВОВ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ТРУБЫ В ПРОЦЕССЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ	40
Мишин В.М., Филиппов Г.А., Щитов Д.В., Мишин В.В. ИЗУЧЕНИЕ ИНВАРИАНТНОСТИ КРИТИЧЕСКОГО ЛОКАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ К НАДРЕЗУ И СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ МЕТОДОМ МЕХАНОСТИМУЛИРОВАННОЙ ФОТОЭМИССИИ	42
Бакшеев В.Г., Панин В.И., Шулатов А.В., Хомяков В.В. ЭТАЛОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ АМПЛИТУДЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СМЕЩЕНИЯ, КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ СРЕД И КОЭФФИЦИЕНТА ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В	44

СИСТЕМЕ ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРОВ ВОСПРОИЗВОДИМЫХ ЕДИНИЦ РАБОЧИМ СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЙ	
Кунавин С.М., Кузнецов А.А., Бережко П.Г., Царёв М.В., Кашафдинов И.Ф., Соломонов А.В., Мокрушин В.В., Царёва И.А., Забродина О.Ю. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ГИДРИРОВАНИИ ЦИРКОНИЯ	46
Кузнецов А.А., Кунавин С.М., Бережко П.Г., Жилкин Е.В., Царёв М.В., Ярошенко В.В., Мокрушин В.В., Забродина О.Ю., Митяшин С.А. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ГИДРИРОВАНИИ ТИТАНА	47
Дежин В.В. ОБ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЯХ БЕСКОНЕЧНОЙ КРАЕВОЙ ДИСЛОКАЦИИ В БЕЗДИССИПАТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ	49
Дежин В.В. ОБ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ СЕГМЕНТА КРАЕВОЙ ДИСЛОКАЦИИ В БЕЗДИССИПАТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ	51
Носов В.В., Артющенко А.П. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	53
Соколов С.И., Веретенников А.А. ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ОТ СТЕПЕНИ ИСКАЖЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ФЕРРИТА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СТАЛИ	55
Медведев К.А., Терентьев Д.А. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ	57
Дамаскинская Е.Е. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ КАК МЕТОД ЛАБОРАТОРНОГО ИЗУЧЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ КРУПНОМАСШТАБНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД	59
Терентьев Д. А., Иванов В.И. ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ	60
Шитов Д.В., Жуков А.В. ВЛИЯНИЕ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ НА РАБОЧУЮ ЧАСТОТУ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	61
Овчинников А.Л., Лапшин Б.М., Чекалин А.С. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ТРУБОПРОВОДАХ С ЖИДКОСТЬЮ ПРИ АЭ КОНТРОЛЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ	63
Лапшин Б.М., Овчинников А.Л. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ТРЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ПО ТРУБОПРОВОДАМ СРЕДСТВ ОЧИСТКИ И ДИАГНОСТИКИ	64
Казаков В.А., Карлов С.А., Сульженко В.А., Яковлев А.В. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ШВОВ СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ СДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ	65
Зубова Е.М. Лобанов Д.С. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В КОНСТРУКЦИОННЫХ КОМПОЗИТАХ	67
Савельев В. Н., Махмудов Х. Ф., Медведев В. Н. АКУСТИКО - ЭМИССИОННЫЙ МОНИТОРИНГ	68

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ФГУП «ГХК»ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ	
Сазонов А.А., Шелобков В.И., Иванов В.И. О КАЛИБРОВКЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	69
Деркачев И.С., Кустов А.И., Мигель И.А. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБУСЛОВЛЕННОГО ДЕФОРМАЦИОННЫМИ И КОРРОЗИОННЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН	71
Смородинова А.А., Кустов А.И., Мигель И.А. СПОСОБЫ ДИАГНОСТИКИ СТАТИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН	73
Павленко И.А., Носов В.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	75
Пантелеев И.А. АНАЛИЗ ТЕНЗОРА СЕЙСМИЧЕСКОГО МОМЕНТА ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ	76
Шибков А.А., Желтов М.А., Золотов А.Е., Денисов А.А., Гасанов М.Ф., Кочегаров С.С., Кольцов Р.Ю., Суркова Д.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ХОДЕ ПРЕРЫВИСТОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА	77
Шибков А.А., Желтов М.А., Золотов А.Е., Денисов А.А., Гасанов М.Ф., Кочегаров С.С., Суркова Д.А. АКУСТИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В ВОДНОЙ СРЕДЕ	79
Беляев В.С., Бычков В.Б., Судденок Ю.А., Тябликов А.В., Шорин В.Н. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ИМИТАЦИИ КОРРОЗИИ В НАГРУЖЕННОЙ ПЛАСТИНЕ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА	81
Савельев В.Н., Махмудов Х. Ф. ПРОЧНОСТЬ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ КАМЕР, КОЛЛЕКТОРОВ, АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДЛЕНИЯ РЕСУРСА	83
Рощупкин В.В., Терентьев В.Ф., Пенкин А.Г., Покрасин М.А., Пенкин М.А., Теплов А.О. ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АУСТЕНИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ ТРИП-СТАЛИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ	84
Черняева Е.В., Чернявская Н.В., Андреев В.А., Вьюненко Ю.Н. ОСОБЕННОСТИ РАДИАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИКЕЛИДА ТИТАНА В ПРУТКАХ ПОСЛЕ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ	86

Носов В.В., Перетятко С.А., ОСОБЕННОСТИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	88
Короткевич С.В., Короткевич М.С. ДИАГНОСТИКА ОПОР КАЧЕНИЯ И СКОЛЬЖЕНИЯ. АВТОМАТИЗАЦИЯ И БИЛЛИНГОВАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТРАНСПОРТА	90
Ярославкина Е.Е., Кузькин В.В., Зобнин П.Ю., Ярославкин А.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ Al МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	92
Мельников Е.В., Теплов Е.С., Тюрин Е.А., Зобнин П.Ю. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОВЕРКИ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕИСКАТЕЛЕЙ	94
Кутень М.М., Бобров А.Л. ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДЕФЕКТОВ	95
Носов В.В. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО МЕТОДУ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	97
Холодов С.С., Бигус Г.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	98
Растегаев И.А., Хрусталев А.К., Севастьянов Д.В., Плюснин А.Д., Мелентьев С.В., Данюк А.В., Афанасьев М.А., Мерсон Д.Л. АКУСТИКО-ЭМИССИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ЦАПФ СУШИЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ БУМАГО- И КАРТОНОДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН	99
Попов А.В., Комлев А.Б., Волошина В.Ю., Самуйлов А.О. СПОСОБ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ОСТЕКЛЕНИЯ ФОНАРЯ ГЕРМЕТИЗИРОВАННОЙ КАБИНЫ ВОЗДУШНОГО СУДНА НА ОСНОВЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	101
Попов А.В., Волошина В.Ю., Комлев А.Б., Самуйлов А.О. СИСТЕМА ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ИНВАРИАНТОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	103
Пичков С.Н., Шишулин Д.Н., Панов В.А., Захаров Д.А. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ	105
Барат В.А., Елизаров С.В., Иванов В.И. ЭМПИРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ.	107
Ханухов Х.М., Четвертухин Н.В., Алипов А.В. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЭ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ	109
Карлов С.А. ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ АЭ-ДИАГНОСТИКИ	111
Чуканов А.Н., Яковенко А.А., Цой Е.В., Терёшин В.А., Моденов М.Ю.	113

ИЗУЧЕНИЕ ВОДОРОДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В СОВМЕСТНОМ АНАЛИЗЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ	
Махутов Н.А., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Мищенко И.В. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СТАНДАРТНОГО АЛГОРИТМА ЛИНЕЙНОЙ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ	115
Параев С.А., Лебедев Д.В. СВЯЗЬ СИЛОВОГО И АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ ДЕФЕКТА. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЕРШИНЕ ТРЕЩИНЫ	117
Параев С.А., Бутусов О.Б. О ПРИМЕНЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В АКУСТИКО-ЭМИССИОННОМ КОНТРОЛЕ. САМООБУЧАЮЩИЕСЯ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ ТИПА LVQ	119
Параев С.А., Бутусов О.Б. ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ	122
Брянский А.А., Башков О.В. КЛАСТЕРИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ АНАЛИЗЕ КИНЕТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ	124
Кхун Х.Х., Башков О. В. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	126
Башков О.В., Ромашко Р.В., Башков И.О., Кхун Х.Х., Зайков В.И., Бао Ф. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА АДАПТИВНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРАХ	128
Башков О.В., Бао Ф. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ОКСИДНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	130
Комаров А.Г. A-LINE. ВЫПОЛНЕНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ. ПРАКТИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО	132
Астанков А.М., Ковалевич А.С., Степанова К.А. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО И АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ЗАПРАВОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ	134
Именной указатель	136
Содержание	138

Сборник материалов

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ» (АПМАЭ-2021)

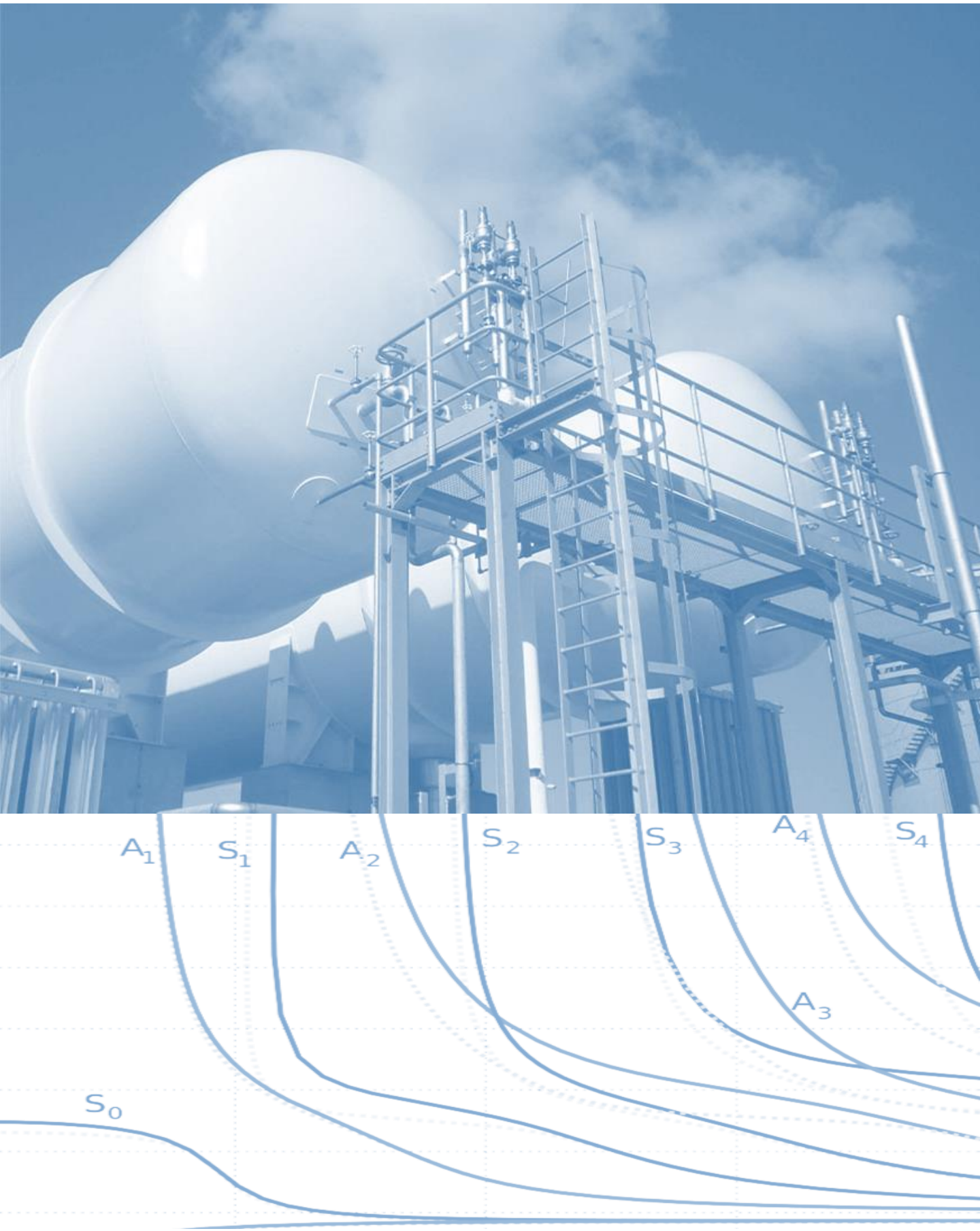
13 - 16 апреля 2021 года,
Санкт-Петербург, Россия

Научное издание

Издательство «СВЕН»
Россия, 194017, Санкт-Петербург, Удельный пр., 5
Тел.:(812) 670-76-09, 670-76-11
E-mail: editor@ndtworld.com
design@ndtworld.com
www.ndtworld.ru

В авторской редакции

Ответственный за выпуск: *Е.В. Черняева*
Компьютерная верстка: *Е.В. Черняева*
Дизайн обложки: *К.А. Степанова*


A1
S1
A2
S2
S3
A4
S4
A3
S0