

На правах рукописи



Рамазанов Илья Сергеевич

**АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ
ПРИ ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ И ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий,
веществ и природной среды (технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в Федеральном автономном учреждении «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина»

Научный руководитель: **Степанова Людмила Николаевна**
доктор технических наук, профессор, начальник
сектора разработки акустико-эмиссионной и
тензометрической аппаратуры ФАУ «СибНИА им.
С.А. Чаплыгина»

Официальные оппоненты: **Суханов Дмитрий Яковлевич**
доктор физико-математических наук, заведующий
лабораторией Электромагнитных методов контроля
Национального исследовательского Томского
государственного университета

Зуев Лев Борисович
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией Физики прочности
Института физики прочности и материаловедения
СО РАН, г. Томск

Защита состоится «28» марта 2023 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050 г. Томск, ул. Савиных, дом 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте dis.tpu.ru

Автореферат разослан « » 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Шевелева
Елена
Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

При решении вопросов безопасной эксплуатации машиностроительных конструкций все большее распространение получают методы неразрушающего контроля (НК). Одним из перспективных является метод акустической эмиссии (АЭ), обладающий высокой чувствительностью и позволяющий локализовать активные дефекты, относящиеся к наиболее опасным, в режиме реального времени. Данный метод позволяет выполнять оценку степени опасности дефекта, а вариативность параметров сигналов АЭ и их высокая информативность свидетельствуют об уникальных свойствах АЭ и возможностях оценки состояния конструкции. Методом АЭ осуществляется контроль крупногабаритных объектов с минимальным влиянием человеческого фактора на результаты измерений.

При воздействии нагрузки на объект контроля (ОК) начинается развитие внутренних дефектов, которому сопутствует излучение акустических волн. Локация их источников позволяет выделить такие дефекты как наиболее опасные для состояния конструкции, что является одним из главных преимуществ метода АЭ. При этом точность локации дефекта имеет первостепенное значение. Кроме того, важной является задача исключения из анализа сигналов АЭ от посторонних шумов, не несущих информации о дефектах.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в разработку метода АЭ, систем и методик контроля при диагностике конструкций внесли работы ученых О.В. Башкова, Г.А.Бигуса, С.И.Буйло, К.Б.Вакара, В.А.Гуменюка, Ю.Б. Дробота, В.И.Иванова, Н.А. Махутова, Д.Л.Мерсона, В.В.Муравьева, А.Я. Недосеки, В.В. Носова, С.В. Панина, Б.Е. Патона, Н.А. Семашко, А.Н. Серьезнова, А.Н. Смирнова, Л.Н. Степановой, В.В. Шемякина и ряда других. В развитие данного направления исследований внесли вклад работы зарубежных ученых Madaras E., Gorman M., Kanji O, Kurokawa Yu.

Объектом исследования являются элементы конструкций ответственного назначения в процессе прочностных испытаний и многопроходной сварки.

Предмет исследования – разработка методов расчета, анализа и обработки сигналов АЭ для повышения точности локации дефектов при прочностных испытаниях конструкций и многопроходной сварке.

Цель работы – разработка методов повышения точности локации дефектов при обработке сигналов АЭ в режиме реального времени в процессе сварки и неразрушающего контроля композиционных и металлических конструкций.

Задачи исследования:

– разработка метода быстрого вейвлет-преобразования, позволяющего за счет частотно-временного представления сигналов АЭ повысить качество фильтрации и точность локации дефектов в режиме реального времени в процессе прочностных испытаний;

- разработка и анализ способов определения степени опасности дефектов по оценке энергии и структуры кластеров сигналов АЭ при многопроходной сварке;
- разработка метода динамической кластеризации основных информативных параметров сигналов АЭ, позволяющего осуществлять обработку большого объема информации и надежную локацию дефектов в режиме реального времени;
- разработка способа АЭ-локации дефектов в процессе многопроходной сварки контуров сложной формы.

Методы исследования

При проведении прочностных исследований металлических и композиционных элементов конструкций использовались методы математического моделирования, вейвлет-преобразования, кластеризации, цифровой обработки сигналов АЭ и статистическая обработка АЭ-информации. Разработаны методы регистрации и анализа данных АЭ-контроля, позволяющие определять дефекты в режиме реального времени при выполнении многопроходной сварки объектов ответственного назначения и сложной формы, с использованием микропроцессорных АЭ и тензометрических сертифицированных систем утвержденного типа.

Научная новизна.

1. Предложен способ расчета координат источников сигналов АЭ с использованием модифицированного двухинтервального метода и вейвлет-преобразования.
2. Разработан способ контроля дефектов в процессе многопроходной сварки контуров сложной формы с использованием разработанного модифицированного табличного метода, осуществляющего локацию сигналов АЭ в режиме реального времени.
3. Разработан алгоритм быстрого вейвлет-преобразования сигналов АЭ для проведения фильтрации и локации сигналов АЭ в режиме реального времени в процессе прочностных испытаний металлических и композиционных конструкций.
4. Для повышения точности локации сигналов АЭ разработан метод контроля, учитывающий погрешности измерения скорости звука и времени прихода акустических сигналов на датчики пьезоантенны.
5. Разработана методика определения степени опасности дефектов металлических и композиционных конструкций по оценке энергии и структуры кластеров сигналов АЭ.

Практическая значимость работы.

По результатам диссертационных исследований разработаны и практически применяются методики расчета координат дефектов и степени их опасности в режиме реального времени при прочностных испытаниях элементов авиационных конструкций и самолетов в ФАУ «СибНИА им.С.А.Чаплыгина». Разработан способ контроля дефектов многопроходной сварки кольцевого сварного шва ответственных конструкций с использованием модифицированного табличного метода, который применен в программном обеспечении АЭ-систем, разработанных в ФАУ «СибНИА

им.С.А.Чаплыгина» при работе в АО «ПО «Севмаш»». Разработанные способы и методики АЭ-контроля дефектов при проведении прочностных испытаний конструкций используются в курсе лекций «Автоматизация измерений, контроля и испытаний», «Приборы неразрушающего контроля» в СГУПС, Новосибирск, РФ.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Методика вейвлет-фильтрации сигналов АЭ с малым соотношением «сигнал/шум» и с использованием быстрого вейвлет-преобразования для уменьшения разброса координат локации развивающихся дефектов в режиме реального времени.
2. Модифицированный пороговый метод определения времени прихода сигналов АЭ с локацией дефектов и одновременной оценкой погрешности расчета их координат.
3. Способ АЭ-контроля многопроходной сварки с использованием основных информативных параметров сигналов АЭ, их кластеризацией и последующей оценкой степени опасности выявленных дефектов.
4. Метод динамической кластеризации, позволяющий разделять сигналы на кластеры в процессе их регистрации, повысить надежность контроля и в автоматическом режиме выполнять локацию источников сигналов в режиме реального времени.
5. Модифицированный табличный метод АЭ-контроля дефектов многопроходной сварки контуров сложной формы с использованием способа калибровки сварного шва с учетом зоны термического влияния.

Апробация работы.

Основное содержание диссертационной работы докладывалось на конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды» (г.Новосибирск. ИГД СО РАН, 2012, 9–12 октября), VIII Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (Новосибирск. СГУПС, 2014 г), IX Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (Новосибирск. СГУПС, 2016 г), Юбилейной Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию со дня основания СибНИА (Новосибирск. ФГУП «СибНИА им.С.А. Чаплыгина». 2016, 20-21 октября), на 4-й Всероссийской конференции «Проблемы оптимального проектирования сооружений» (Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин) г. Новосибирск, 2017 г.), конференции, посвященный 70-летию д.т.н., профессора А.Н. Смирнова «Структура. Диагностика. Ресурс». (Кемерово: КузГТУ, 2017).

Публикации. По результатам исследований были опубликованы в соавторстве 27 статей в изданиях из списка ВАК, получено 7 патентов РФ, опубликованы параграфы в трех монографиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 116 наименований. Содержит 152 страницы текста, 72 рисунка и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируется цель исследований, перечисляются задачи и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ методов обработки сигналов АЭ, полученных при контроле разнообразных металлических конструкций ответственного назначения в процессе выполнения многопроходной сварки и при прочностных испытаниях композиционных материалов (КМ), таких как углепластики и стеклопластики.

На распространение акустической волны в конструкции влияют микроструктура материала, различные неоднородности и условия нагружения ОК. Неразвивающиеся дефекты сигналов АЭ не излучают, поэтому материал конструкции должен быть нагружен до напряжений, достаточных для развития различных дефектов структуры, которые, являясь концентраторами напряжений, излучают дискретные акустические волны.

Основными целями исследований при использовании метода АЭ являются: идентификация типа повреждения; выявление корреляции повреждений с условиями нагружения и напряженного состояния конструкции; распознавание различных типов повреждений в материалах; оценка механических свойств различных материалов.

Трещина или другой дефект, появившийся в нагруженной конструкции, излучает звуковые волны, которые регистрируются преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ). Метод АЭ обладает высокой чувствительностью и эффективен при контроле ранней стадии развития дефектов. В режиме реального времени определяется зона разрушения. При этом повышается быстродействие и точность контроля, снижаются объемы сканирования объекта и сокращается площадь контроля.

Основными информативными параметрами, характеризующими сигнал АЭ, являются амплитуда, энергия, число сигналов, число осцилляций, скорость счета, суммарный счет, активность, время прихода, время нарастания, крутизна переднего фронта, длительность первой полуволны и т.д. Каждый параметр сигнала АЭ связан с каким-либо параметром процесса разрушения и является его акустическим отображением. Возможность наложения диаграммы нагружения на временные зависимости основных информативных параметров сигналов АЭ позволяет оценить их динамику изменения от уровня нагрузки.

Методики контроля дефектов основаны на анализе основных информативных параметров сигналов АЭ, регистрируемых в процессе нагружения объекта и являющихся стохастическими, импульсными и многокомпонентными. В процессе распространения сигналов от источника до места установки акустических датчиков они претерпевают искажения. Параметры сигналов АЭ зависят не только от типа источника, материала, особенностей конструкции ОК, вида нагружения, но и от характеристик самих акустических датчиков. Резонансные свойства ПАЭ и затухания высокочастотных

составляющих сигналов АЭ могут приводить к существенным ошибкам при диагностике ОК.

Метод АЭ обладает низкой помехозащищенностью, так как он чувствителен к разнообразным помехам (акустическим, электромагнитным, вибрационным). Акустическая волна, излучаемая развивающимся дефектом, существенно искажается из-за различных переотражений, дисперсии скоростей, возбуждения резонансных мод. При проведении прочностных испытаний с использованием метода АЭ необходимо особое внимание уделять методическим вопросам по устранению побочных сигналов, не имеющих прямого отношения к процессам, протекающим в нагруженном материале.

Основной причиной снижения технологической прочности изделий, в составе которых имеются сварные соединения, являются наружные и внутренние дефекты (трещины, поры, непровары), образующиеся при сварке. В процессе многопроходной сварки с использованием метода АЭ необходимо обнаруживать различные дефекты на самых ранних стадиях развития в момент сварки и выполнять оценку степени их опасности. Надежность выявления трещин, расслоений, растрескиваний во многом определяется используемой аппаратурой и разработанной в данной работе методикой АЭ-контроля.

Волновые составляющие сигналов АЭ обладают различными несущими частотами. Имея частотно-временное распределение сигнала, можно выделить информацию о динамических свойствах упругих волн. Поскольку сигналы АЭ являются нестационарными, то в задачах их обработки широкое распространение получили методы анализа временных и частотно-временных распределений.

Во второй главе представлены разработанные автором методики обработки сигналов АЭ с использованием вейвлет-преобразования (ВП) и быстрого ВП. При работе с АЭ-информацией задача фильтрации осложнена тем, что полезная компонента сигнала имеет сложный вид. Параметры шумовой составляющей сигнала АЭ заранее неизвестны и могут существенно изменяться.

Разработана методика фильтрация сигналов АЭ с использованием быстрого ВП, при котором выполнялось разложение исходного сигнала по базису того или иного вейвлета на основе фильтра с конечной импульсной характеристикой. В разработанной методике из всего набора полученных коэффициентов $U \leftrightarrow \{A_{m_0}, D_{m_0}, \dots, D_1\}, m_0 \in Z$ выбирались уровни $1 \dots m_0$, соответствующие полезной компоненте сигнала. В результате исходный сигнал был представлен в виде набора коэффициентов, прошедших фильтрацию:

$$\{a'_{m,k}, d'_{m,k}\} = \{A'_{m_0}, D'_{m_0}, \dots, D'_1\}, m_0 \in Z, \quad (1)$$

где $d'_{m,k}$ – детализирующие коэффициенты отфильтрованного сигнала; Z – множество целых чисел; A_{m_0} – масштабирующие коэффициенты наибольшего используемого уровня

вейвлет-разложения; D_{m_0}, D_1 – детализирующие коэффициенты вейвлет-разложения наибольшего и первого уровней.

Затем с использованием обратного быстрого ВП выполнялось восстановление сигнала из полученного набора коэффициентов формулы (1).

Одним из возможных подходов к решению задач вейвлет-фильтрации является *hard*-правило, представляющее собой пороговый метод разделения коэффициентов ВП:

$$d'_{m,k} = \begin{cases} 0, & |d_{m,k}| < \varepsilon_m; \\ d_{m,k}, & |d_{m,k}| \geq \varepsilon_m, \end{cases}$$

где $d_{m,k}$ – детализирующие коэффициенты исходного сигнала.

Определение параметров фильтра сводится к нахождению порога фильтрации ε_m для каждого уровня разложения исходного сигнала, представленного набором коэффициентов D_m . Эта операция соответствует подавлению низкоамплитудных компонент сигнала АЭ по каждой из частотных субполос, ограниченных диадическими частотами. Амплитуда сигнала на каждой из субполос рассматривалась в среднем по временному «окну» размером $\Delta 2^m$, в котором сигнал представлялся вейвлет-коэффициентом с соответствующим индексом.

Основное влияние на эффективность вейвлет-фильтрации сигналов АЭ оказывало решающее правило, способное обнаружить их передний фронт. На любом из уровней вейвлет-разложения передний фронт аппроксимировался группой коэффициентов с близкими индексами, в результате чего решающее правило рассматривалось в виде:

$$d'_{m,k} = \begin{cases} 0, & F(d_{m,k}, \dots, d_{m,k+t_m}) < \varepsilon_m; \\ d_{m,k}, & F(d_{m,k}, \dots, d_{m,k+t_m}) \geq \varepsilon_m, \end{cases}$$

где t_m – параметр ширины временного «окна» на уровне разложения m , равный количеству коэффициентов вейвлет-разложения, попадающих в «окно».

Оно заменяет фиксированный порог разложения на «скользящий» путем выделения групп

коэффициентов $d'_{m,k}$, формирующих передний фронт сигнала при его восстановлении.

Расчет параметра ширины временного «окна» t_m производится по формуле:

$$t_m = T_x \frac{N^{(m)}}{N} \cdot f_d,$$

где T_x – ширина «окна» на исходном сигнале АЭ, выбираемая из условия $T_x > T_{нар}$;

$T_{нар}$ – параметр, характеризующий предположительное время нарастания сигнала.

Применение «оконного» решающего правила позволило выполнять фильтрацию низкоамплитудных сигналов АЭ.. Разработанная методика фильтрации применялась при обработке группы сигналов АЭ, зарегистрированных при испытаниях клепаных авиационных панелей. Анализ распределения доминирующих частот спектров сигналов показал, что в результате фильтрации были устранены искажения значений

доминирующей частоты, вызванные наличием шумовой составляющей. При этом дисперсия распределения доминирующих частот и времен прихода сигналов на ПАЭ уменьшилась.

Экспериментальные результаты показали, что использование разработанных методов фильтрации, основанных на быстром ВП, позволяет осуществлять преобразование сигналов АЭ с учетом их частотно-временной структуры и модового состава и удалять шумовые компоненты. Вейвлет-фильтрация позволяет определять время прихода сигнала АЭ на ПАЭ, что приводит к более точной и надежной локации дефектов.

Разработанная методика локации с использованием вейвлет-фильтрации прошла апробирования при прочностных испытаниях различных конструкций (самолеты Су-27, Ту-22, панели гермофюзеляжа самолета SSJ-100, элементы тележки грузового вагона, деаэраторы, лопасти вертолета Ми-8 и т.д.). Для разных кластеров отмечено уменьшение среднего квадратического отклонения (СКО) координат при локации сигналов АЭ от одного источника в (1,25 – 8,22) раз. На рисунке 1, а показаны результаты локации сигналов АЭ, полученные при прочностных испытаниях авиационной панели самолета SSJ-100 пороговым методом с использованием вейвлет-фильтрации. Здесь же показана область разрушения, где при последующих прочностных испытаниях усталостная трещина вышла на поверхность исследуемой панели. В соответствии с полученными экспериментальными результатами использование вейвлет-фильтрации позволяет увеличить точность определения координат развивающихся дефектов на 3-9% по величине СКО.

Метод определения времени прихода сигнала АЭ по величине коэффициентов быстрого ВП, содержит максимальный коэффициент вида:

$$d_{\max} = \max_{i,j} \{d_{i,j}\} = d_{i_{\max}, j_{\max}}, \quad (2)$$

где d_{\max} – максимальный коэффициент вейвлет-детализации;

j_{\max} – номер уровня вейвлет-разложения, на котором найден максимальный коэффициент вейвлет-детализации;

i_{\max} – его индекс, соответствующий времени.

Коэффициент из формулы (2) использовался при локации сигналов АЭ в процессе прочностных испытаний композиционного переднего лонжерона верхнего крыла композиционного самолета. Методом кластеризации по оцифрованной форме выделен кластер сигналов АЭ, локализованный в области разрушения лонжерона. В процессе нагружения конструкции сигналы АЭ из данного кластера последовательно локализовались в области расположения ПАЭ 3 на стенке и в области верхней полки лонжерона. Результаты локации подтвердились визуально-оптическим методом в области расположения разрушения конструкции лонжерона.

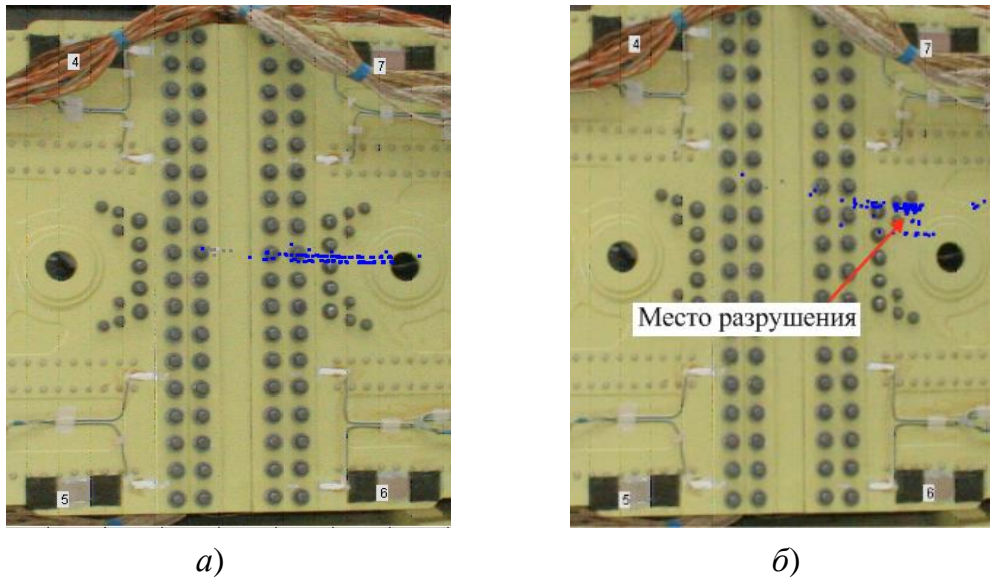


Рисунок 1 – Локация сигналов АЭ при прочностных испытаниях авиационной панели самолета SSJ-100: а - с использованием порогового метода; б – с использованием вейвлет-фильтрации

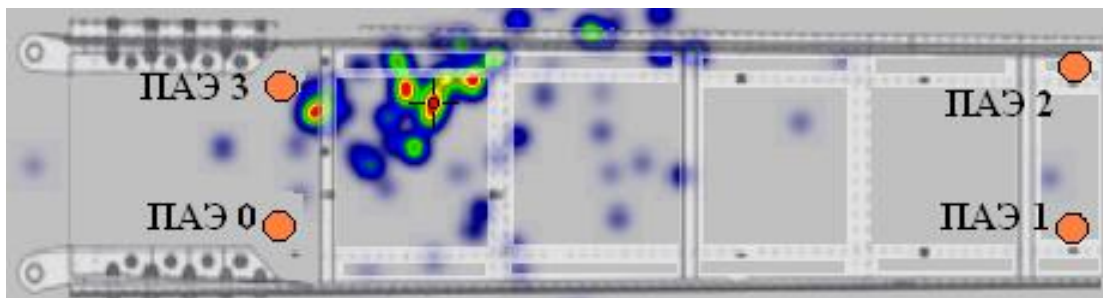


Рисунок 2– Локация сигналов АЭ из зоны разрушения лонжерона композиционного самолета с использованием вейвлет-преобразования

В третьей главе рассмотрены разработанные методы обработки сигналов АЭ, позволяющие повысить точность локации дефектов.

При прочностных испытаниях различных конструкций о степени опасности локализованного источника судят по параметрам его сигналов. Расчет координат источника сигналов АЭ осуществляется по разности времен прихода (РВП) на датчики пьезоантенны. Точность вычисления координат дефектов зависит от погрешностей определения скорости звука ΔC при калибровке и РВП ΔT_i сигналов АЭ. Для каждого источника сигналов АЭ погрешность определения его координат линейно зависит от погрешности определения скорости звука ΔC . Однако коэффициент линейной зависимости определяется положением источника относительно датчиков пьезоантенны и величиной скорости звука C . Вклад погрешности определения РВП ΔT_i зависит от метода расчета времени прихода сигнала АЭ, а ее величина оценивается по форме переднего фронта регистрируемых сигналов АЭ.

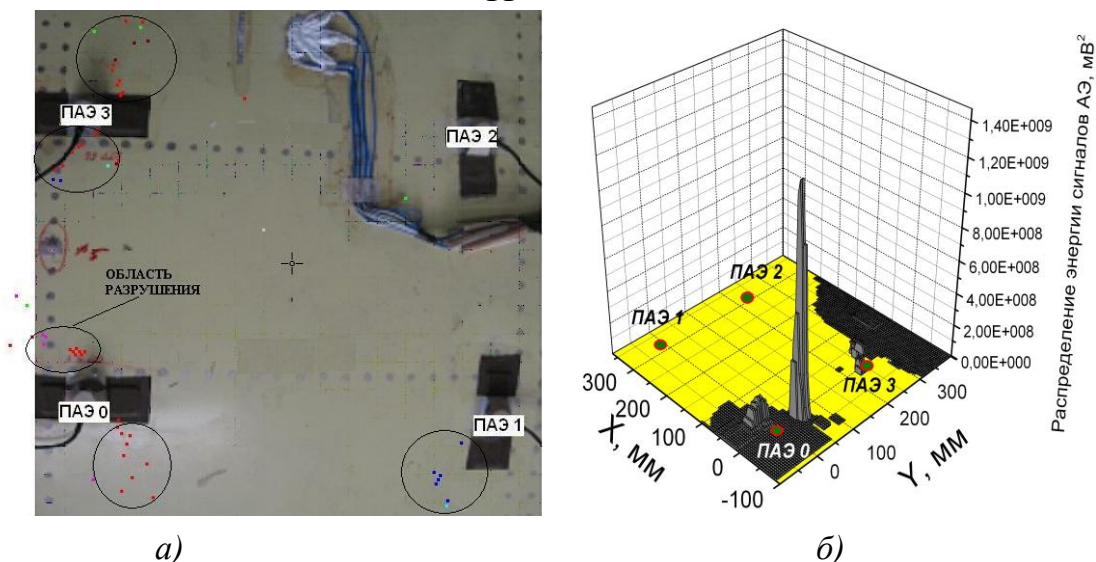


Рисунок 3 – Плоскостная локация сигналов АЭ: *а* – на авиационной панели самолета SSJ-100; *б* – распределение энергии с учетом погрешностей определения скорости звука и РВП

Показана картина распределения источников сигналов АЭ на авиационной панели самолета SSJ-100 (рисунок 3, а), полученная с учетом вычисленных погрешностей скорости звука ΔC и РВП $\Delta T_1, \Delta T_2$ и картина распределения энергии (рисунок 3, б). Это позволило определить координаты дефектов и оценить степень их опасности.

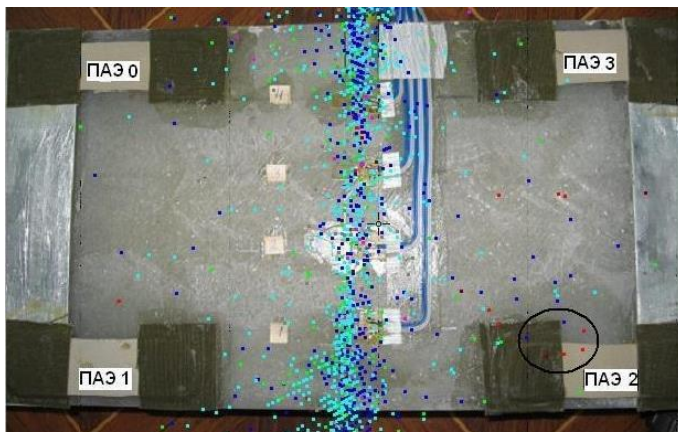
Выполнены циклические испытания образцов из стеклопластика с частотой $f = 5$ Гц, нагрузкой $P = (6...7) \cdot 10$ кН (рисунок 4,а). На рисунке 4,б показана трехмерная локация сигналов АЭ с учетом погрешностей определения скорости звука и РВП. Разработанная автором методика учета погрешностей скорости звука и РВП при циклическом нагружении позволила устранить из общей картины сигналы АЭ, локализованные с высокой погрешностью, и получить трехмерную картину расположения дефектов.

Определена погрешность расчета времени прихода сигнала АЭ на акустический датчик t_{Π} путем аппроксимации огибающей его переднего фронта. Методом линейной аппроксимации переднего фронта получена оценка времени прихода сигнала АЭ.

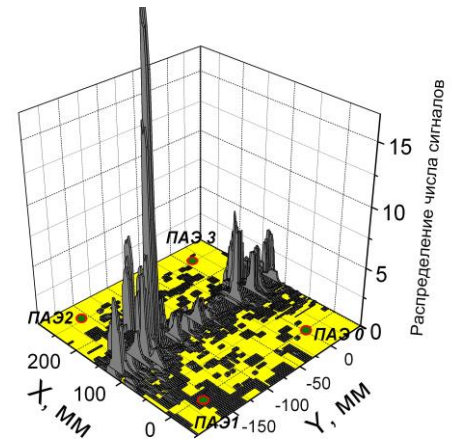
На точность оценки влияет выбор границ «окна», внутри которого аппроксимируется передний фронт сигнала. Характеристикой качества этой оценки является величина, определяемая из неравенства:

$$\lambda > P_{\text{порог}},$$

где $0 < P_{\text{порог}} < 1$ – варьируемое пороговое значение; λ – коэффициент детерминации регрессии.



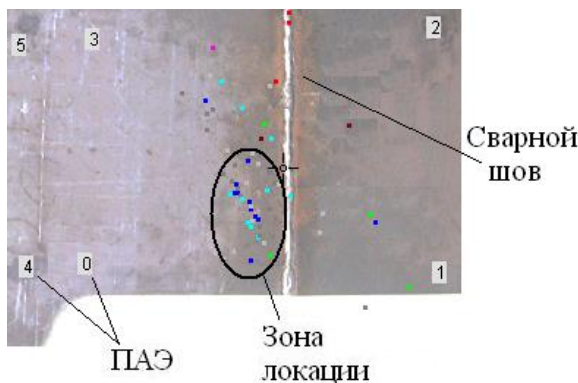
а)



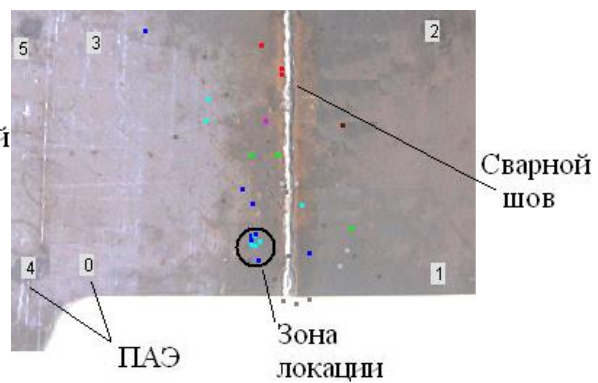
б)

Рисунок 4 – Плоскостная картина (а) локации сигналов в образце из стеклопластика;
б – локация с учетом погрешностей определения скорости звука и РВП

Разработанный метод линейной аппроксимации переднего фронта сигнала АЭ позволил определять время его прихода на датчики пьезоантенны с одновременной оценкой погрешности расчета. Для сигналов с пологим передним фронтом происходит уточнение времени прихода по сравнению с пороговым методом с «жестким» порогом срабатывания, что приводит к более точной локации дефектов.



а)



б)

Рисунок 5 – Локация сигналов АЭ при контроле процесса сварки пороговым методом: а – с «жестким» порогом селекции; б – с модифицированным пороговым методом с коэффициентом детерминации $R_{\text{порог}} = 0,3$

Разработанный метод локации сигналов АЭ использовался при контроле дефектов в процессе сварки образцов из стали Ст3 с последующим выполнением УЗК и фрактографического анализа. Приведена локация, рассчитанная с использованием порогового метода с «жестким» порогом срабатывания (рисунок 5, а), и с использованием разработанного модифицированного порогового метода с линейной аппроксимацией переднего фронта сигнала АЭ (рисунок 5, б). Рассматриваемые сигналы были отнесены в один кластер по признаку максимума корреляционной функции. Пороговый метод дает значительный разброс точек локации из-за влияния шумов и различной амплитуды

сигналов. При модифицированном пороговом методе изменился характер группировки точек локации и в кластере сформировался геометрический центр.

При кластеризации оценка источников регистрируемых сигналов АЭ осуществлялась статистическим анализом распределений параметров сигналов внутри кластеров. Сходство по основным параметрам сигналов, формирующих кластер, являлось признаком его соответствия реальному дефекту.

Для получения максимального объема информации из анализа распределений каждого параметра p сигналов АЭ внутри кластеров вычислялись величины:

- выборочная дисперсия распределения параметра D_p и СКО $\sigma = \sqrt{D_p}$;
- центральный момент распределения четвертого порядка μ_p^4 ;
- квартили распределения $\zeta_{1/4}$, $\zeta_{3/4}$ – величины, вычисляемые аналогично медиане, но при значениях функции распределения параметра p в кластере J $F_J^{(p)}(x) = 1/4$ и $F_J^{(p)}(x) = 3/4$, соответственно.

По этим величинам вычислялись статистики: «эксцесс» γ и «интерквартильная широта» E :

$$\gamma = \frac{\mu_p^4}{D_p^2} - 3;$$

$$E = \zeta_{3/4} - \zeta_{1/4}.$$

Признаком того, что сигналы АЭ, входящие в данный кластер, однородны по рассматриваемому параметру, и кластеры могут быть соотнесены с возможными дефектами исследуемого объекта, было одновременное выполнение условий:

$$\begin{cases} \gamma \geq 0 \\ E \leq \sigma. \end{cases}$$

Вычисление статистических характеристик внутрикластерных распределений позволило применить метод проверки параметров сигналов АЭ в кластерах на однородность при анализе данных АЭ-контроля процесса сварки. Однородными по какому-либо параметру формы переднего фронта сигнала АЭ считались кластеры, для которых условия однородности выполнялись одновременно по двум ближайшим к месту локации сигналов датчикам пьезоантенны. Применение метода при АЭ-контроле сварки образцов позволило выделять кластеры, локализуемые в местах расположения дефектов сварного шва.

Кластерный анализ, используемый для локации дефектов и их браковки по степени опасности, должен надежно выявлять источники сигналов АЭ в режиме реального времени. Условию надежности удовлетворяет метод кластеризации сигналов АЭ по оцифрованной форме. Основным недостатком данного метода является большое время

обработки, вызванное значительным объемом вычислительных операций. Для повышения быстродействия применяются методы кластеризации, основанные на сравнении скорости нарастания переднего фронта, либо на наборе информативных параметров сигналов АЭ. Однако эти методы используются после окончания записи сигналов АЭ. Дополнительные процедуры расчетов увеличивают время контроля. Для его сокращения разработан метод, основанный на динамической кластеризации, т.е. объединении сигналов в кластеры, выполняемые параллельно с процессом регистрации АЭ-информации.

Для выполнения динамической кластеризации по параметрам для каждого сигнала АЭ автоматически рассчитывались координаты точек локации, доминантная частота, число осцилляций, время и скорость нарастания переднего фронта. При локации каждого сигнала выполнялся также расчет погрешности определения координат дефекта. Первый зарегистрированный сигнал принимался в качестве базового для первого кластера.

В процессе локации каждого последующего сигнала определялось, можно ли соотнести данный сигнал с какими-либо из имеющихся кластеров. В противном случае происходило формирование нового кластера. Особенность применяемого метода динамической кластеризации состояло в возможности соотношения сигнала с несколькими кластерами одновременно до получения дополнительной информации об источниках сигналов АЭ. На рисунке 6 изображена схема кластера сигналов АЭ, состоящего из оболочки и ядра. После включения сигнала АЭ в какой-либо из кластеров, система проверяет, сформировано ли ядро у данного кластера. Сигналы, формирующие ядро, отличаются от сигналов, составляющих оболочку, считаются кластеризованными с достаточной точностью и по их параметрам рассчитывается образ кластера. Ядро кластера формируется после того, как число сигналов, включенных в кластер, превысит заранее заданный критический порог $M_{\text{форм}}$. Его увеличение делает параметры образа кластера статистически более значимыми. Это повышает надежность кластеризации, но увеличивает ее время из-за необходимости постоянного перерасчета параметров кластеров, не имеющих сформированного ядра.

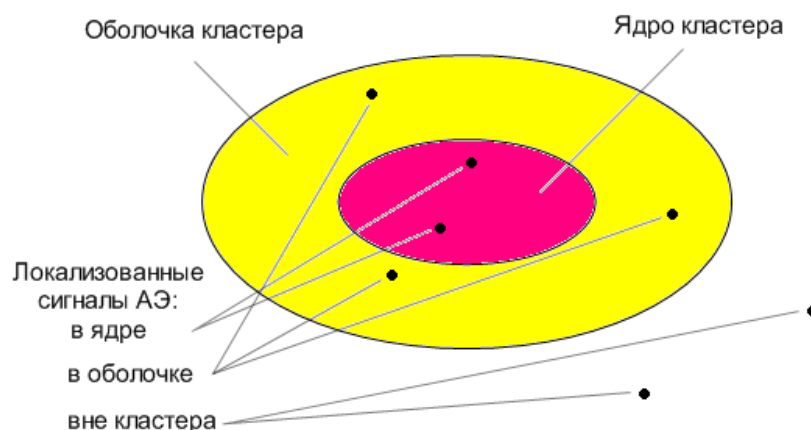


Рисунок 6 – Структура динамически формируемого кластера

При выполнении АЭ-контроля необходимо установить связь между кластерами, соответствующими источникам АЭ и зарегистрированными сигналами. Для этого предусматривается возможность в любой момент времени при выполнении АЭ-контроля проводить процедуру пересмотра результатов динамической кластеризации и исключать имеющиеся неоднозначности.

Проведенные исследования показали, что разработанный алгоритм динамической кластеризации сигналов АЭ позволяет в автоматическом режиме выполнять локацию источников сигналов АЭ в реальном времени.

В четвертой главе приведены результаты применения разработанных методик кластеризации сигналов АЭ, зарегистрированных в процессе сварки стальных образцов и элементов конструкций, а также при испытании элементов авиационных конструкций из углепластика.

Разработанные методики применялись при АЭ-контроле дефектов многопроходной сварки образцов из корабельной стали размерами 1000x800 мм с V-образной разделкой, выполненной в ОАО «ПО «Севмаш». Использовалась АЭ-система СЦАД-16.10 с «плавающими» порогами селекции. Частота оцифровки сигналов АЭ изменялась программно от 1 МГц до 8 МГц, а «плавающие» пороги исключали переход измерительных каналов в режим насыщения. Имитация дефектов осуществлялась за счет введения в сварной шов шести инородных вставок из металлов (титан, вольфрам), шлаковых включений и непровара. При этом АЭ-информация непрерывно записывалась системой, как в процессе сварки, так и при остывании сварного шва. По окончании процесса сварки выполнялся УЗ- и рентгенографический контроль.

Анализ результатов локации сигналов АЭ с использованием различных методов определения их времени прихода показал, что разработанный автором модифицированный пороговый и двухинтервальный методы с одинаковой точностью определяют координаты искусственного дефекта. При использовании метода расчета координат по СКО в «окне» получена максимальная погрешность. Использование двухинтервального метода привело к разделению области локации от искусственного дефекта на две отдельные части.

В условиях регистрации шумов и помех при выполнении АЭ-контроля многопроходной сварки одной из задач был поиск набора основных параметров сигналов, распределение которых существенно изменяется при формировании дефекта сварного шва. Разработана методика браковки дефектов многопроходной сварки по распределению основных параметров сигналов АЭ.

Установлено, что двухинтервальный коэффициент $K(t)$ чувствителен к наличию вольфрамовой и титановой вставок. Наиболее чувствительными к введенным в сварной шов вставкам оказались такие параметры, как среднее число осцилляций по переднему

фронту и энергетический параметр *MARSE*. Параметр «число осцилляций» определялся при проходе, когда зона расположения вставки заваривалась повторно. Наиболее явно данные параметры изменялись для сигналов, устойчиво локализуемых в зоне расположения вставки.

При локации дефекта происходило изменение распределения энергии сигналов АЭ. Увеличивалось среднее значение параметра *MARSE*, разница между средним значением и медианой распределения параметров. Экспесс распределения при этом уменьшался. Это соответствовало изменению вида распределения энергии сигналов АЭ, а именно – вместо сравнительно однородных по энергетическим параметрам сигналов, полученных при формировании сварного шва без вставок, начинали регистрироваться группы сигналов высокой амплитуды и энергии.

Гипотеза о достоверных различиях распределений для двух наборов данных принималась, если фактически наблюдаемое значение статистики λ было больше критического $\lambda_{кр}$. Поскольку разным уровням значимости с различными вероятностями ошибки соответствуют различные критические значения статистики $\lambda_{кр}$, то для оценки достоверности полученного результата использовался максимальный уровень значимости α , для которого выполнялось условие:

$$\lambda \geq \lambda^{\alpha}_{\text{ед}}.$$

При использовании данного критерия уровень значимости гипотезы α зависел от размера величины отклонения сравниваемых выборочных функций распределения. Поэтому предложено использовать значение α при расчете браковочного уровня как:

$$\sum_i q_{i,S}^{(\lambda)} \chi_{i,S}^{(\lambda)} + \sum_{i,j} q_{i,j}^{(\lambda)} \chi_{i,j}^{(\lambda)} = p_{\lambda}^{(m)}, \quad (3)$$

где $p_{\lambda}^{(m)}$ – браковочный уровень критерия Колмогорова–Смирнова для прохода сварки с номером m ; i – индекс рассматриваемого параметра сигнала АЭ в наборе информативных параметров; j – индекс прохода сварки, сравниваемого с рассматриваемым, $m - c_m \leq j < m$; c_m – параметр, характеризующий количество учитываемых проходов, выполненных перед текущим проходом сварного шва (глубина анализа); S – индекс эталонного прохода сварного шва; $q_{i,j}^{(\lambda)}$ – весовые коэффициенты, учитывающие значимость вклада информативного параметра сигнала АЭ в увеличение браковочного уровня $p_{\lambda}^{(m)}$.

Для учета вклада уровня значимости отклонения функции распределения параметра сигналов АЭ для текущего прохода введены функции $\chi_{i,j}^{(\lambda)}$:

$$\chi_{i,j}^{(\lambda)} = \begin{cases} 0, & \alpha_{i,j}^{(\lambda)} > 0,1 \\ 1, & 0,1 \geq \alpha_{i,j}^{(\lambda)} > 0,01 \\ 2, & 0,01 \geq \alpha_{i,j}^{(\lambda)} > 0,001 \\ 3, & \alpha_{i,j}^{(\lambda)} \leq 0,001 \end{cases}, \quad (4)$$

где $\alpha_{i,j}^{(\lambda)}$ – уровень значимости по критерию Колмогорова-Смирнова для гипотезы о существенном отличии распределения рассматриваемого параметра с индексом i прохода с номером m от прохода сварного шва с номером j .

В формулах (3), (4) при расчете браковочного уровня в зависимости от уровня значимости, слагаемые браковочных уровней принимали значения 0, 1, 2, 3. С помощью этих функций учитывалась достоверность вычисленной статистики.

Для проверки достоверности полученных результатов выполнен анализ сигналов АЭ, локализованных на участке сварного шва, в котором во время первых девяти проходов сварки не производилось введение искусственных дефектов. При локации сигналов АЭ методом поиска максимума двухинтервального коэффициента, для шестого прохода с введенной вольфрамовой вставкой максимальная величина браковочного уровня составила $p_{\lambda}^{(m)} = 11$ единиц. При остальных методах локации расчетная величина браковочного уровня не превышала 8 единиц. Однако при введении титановой вставки на третьем проходе, а также на седьмом проходе, непосредственно следовавшим за введением вольфрамовой вставки, величина браковочного уровня $p_{\lambda}^{(m)}$ была значительно выше. Следовательно, браковочный уровень, определяемый из формул (3), (4), может использоваться для поиска дефектов при АЭ-контроле многопроходной сварки.

Общие выводы

В результате выполнения диссертационной работы получены следующие научные и практические результаты.

1. Разработан модифицированный пороговый метод определения координат дефектов, основанный на расчете РВП сигналов АЭ на датчики пьезоантенны с одновременной оценкой погрешностей их определения. При этом осуществлено уменьшение погрешности координат при локации сигналов АЭ в кластерах при статических испытаниях авиационных конструкций и контроле процесса сварки стальных образцов. Для сигналов АЭ с пологим передним фронтом среднее квадратическое отклонение координат точек локации сигналов от одного источника может быть уменьшено в три раза по сравнению с немодифицированным пороговым методом.
2. Предложен метод локации дефектов в процессе выполнения многопроходной сварки с использованием кластеризации по форме и основным информативным параметрам

сигналов АЭ с последующей оценкой суммарной энергии полученных кластеров. Применение метода сравнения энергии кластера с медианой энергии сигналов АЭ позволило определять наличие в сварном шве дефектов типа трещин, шлаковых включений, непроваров в корне сварного шва. Показано, что медиана энергии сигналов АЭ в кластере может превышать пороговое значение, рассчитанное по всем зарегистрированным сигналам, в 2–6 раз. Полученные результаты подтверждены УЗ- и фрактографическим анализом сварного шва.

3. Разработан алгоритм фильтрации сигналов АЭ на основе быстрого вейвлет-преобразования, которая использовалась в процессе статических испытаний элементов авиационных конструкций. При использовании быстрой вейвлет-фильтрации в процессе испытаний панели самолета SSJ-100 была устойчиво локализована растущая трещина. Анализ влияния вейвлет-фильтрации на параметры сигналов АЭ показал уменьшение разброса координат локализации дефектов конструкции от незначительного в 1,25 раз до значительного в 8,22 раза, в зависимости от величины отношения сигнал / шум.

4. Выполнен анализ частотно-временной структуры сигналов АЭ с использованием непрерывного и дискретного вейвлет-преобразования. Для оценки модового состава сигналов АЭ разработан метод вычисления структурного коэффициента в режиме реального времени с использованием быстрого вейвлет-преобразования. Предложен метод выделения наиболее значимого уровня быстрого вейвлет-преобразования для сжатия АЭ-информации и ускорения ее обработки.

5. Для оценки внутренней структуры кластеров разработана методика контроля процесса многопроходной сварки с использованием статистического анализа результатов кластеризации сигналов АЭ. Предложен метод выделения кластеров, состоящих из сигналов АЭ от дефектов сварного шва, по величине эксцесса, интерквартильной широты и дисперсии распределений параметров сигналов АЭ. Метод позволил выявлять кластеры, сопоставимые с дефектами сварки.

6. Для выполнения АЭ-контроля процесса многопроходной сварки в режиме реального времени разработан алгоритм динамической кластеризации, позволивший разделять сигналы на кластеры в процессе их регистрации. Установлено, что сигналы АЭ от формирующихся дефектов регистрируются непосредственно во время сварки соответствующих участков сварного шва и могут быть соотнесены с имеющимися дефектами в режиме реального времени.

7. Проведен АЭ-контроль процесса сварки образцов из корабельной стали. В процессе испытаний определены наиболее информативные параметры сигналов АЭ: двухинтервальный коэффициент, энергетический параметр MARSE, количество осцилляций по переднему фронту. Показано, что для надежного контроля дефектов многопроходной сварки необходимо анализировать информацию по нескольким проходам

сварного шва, поскольку информация по одному проходу может быть неполной или искаженной.

8. Выполнен статистический анализ распределения параметров сигналов АЭ, зарегистрированных в процессе сварки, с использованием t – критерия Стьюдента и критерия Колмогорова-Смирнова с вычислением браковочных уровней для выявления дефектов сварки. При этом результаты АЭ-контроля дефектов сварки показали высокую степень соответствия результатам УЗ-контроля и радиографического методов, проведенных после полного остывания сварного шва.

9. Разработан модифицированный табличный метод локации сигналов АЭ в процессе многопроходной сварки контуров сложной формы. Получено повышение точности локации дефектов сварного шва при применении локационной таблицы для свариваемого кольцевого контура ответственной конструкции.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Параграфы в научных изданиях

1. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, А.Е. Кареев, Е.Ю. Лебедев, В.Л. Кожемякин, И.С. Рамазанов и др.; под ред. Л.Н. Степановой, А.Н. Серьезнова. – М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2008. – 440 с.
2. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Ивлиев, С.И. Кабанов, С.А. Бехер, К.В. Власов, А.Л. Бобров, А.Е. Кареев, Е.Ю. Лебедев, К.В. Канифадин, И.С. Рамазанов и др. – Новосибирск: Наука, 2011. – 272 с.
3. Акустико-эмиссионный контроль дефектов сварки/ А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов и др. – Новосибирск: Наука, 2018. – 272 с.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Рамазанов, И.С. Использование вейвлет-фильтрации при локализации сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, С.И. Кабанов, А.Е. Кареев // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 9. – С. 27 – 31.
2. Рамазанов, И.С. Вейвлет-фильтрация в задачах локализации сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 1. – С. 15 – 19.
3. Рамазанов, И.С. Локализация сигналов акустической эмиссии с учетом погрешностей измерения скорости звука и времен их прихода на датчики пьезоантенны / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, С.И. Кабанов // Контроль. Диагностика. – 2008 – № 10. – С. 60 – 64.
4. Рамазанов, И.С. Исследование разрушения образцов из стеклопластика с использованием методов акустической эмиссии и тензометрии / Л.Н. Степанова,

Е.Ю. Лебедев, С.И. Кабанов, В.Н. Чаплыгин, С.А. Катарушкин, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин // Дефектоскопия. – 2009. – № 2 – С. 39 – 46.

Ramazanov, I.S. Study of fracture of specimens made of fiberglass plastic using acoustic-emission and strain measurements / L.N. Stepanova, E.Y. Lebedev, S.I. Kabanov, V.N. Chaplygin, S.A. Katarushkin, I.S. Ramazanov, K.V. Kanifadin // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2009. – Vol. 45. – № 2. – P. 103-108.

5. Рамазанов, И.С. Оценка погрешностей определения времени прихода сигналов акустической эмиссии пороговым методом / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин // Дефектоскопия. – 2009. – № 4. – С. 69 – 78.

Ramazanov, I.S. Estimation of time-of-arrival errors of acoustic-emission signals by the threshold method / L.N. Stepanova, I.S. Ramazanov, K.V. Kanifadin // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2009. – Vol. 45. – № 4. – P. 273-279.

6. Рамазанов, И.С. Кластеризация источников сигналов акустической эмиссии по скорости нарастания переднего фронта / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, С.И. Кабанов, Е.Ю. Лебедев, К.В. Канифадин // Дефектоскопия. – 2009. – № 10. – С. 27 – 35.

Ramazanov, I.S. Clustering of sources of acoustic-emission signals by the leading-edge rise rate / L.N. Stepanova, K.V. Kanifadin, I.S. Ramazanov, S.I. Kabanov, E.Y. Lebedev // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2009. – Vol. 45. – № 10. – P. 685-692.

7. Рамазанов, И.С. Определение опасных источников сигналов акустической эмиссии по оценке энергии кластеров / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин, С.И. Кабанов // Дефектоскопия. – 2010. – № 9. – С. 64 – 73.

Ramazanov, I.S. Detecting hazardous sources of acoustic-emission signals using the estimated energy of clusters / L.N. Stepanova, K.V. Kanifadin, I.S. Ramazanov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2010. – Vol. 46. – № 9. – P. 676-683.

8. Рамазанов, И.С. Анализ структуры кластеров сигналов акустической эмиссии для оценки степени опасности дефектов сварки / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 3. – С. 68 – 72.

9. Рамазанов, И.С. Использование двухэтапной кластеризации сигналов акустической эмиссии для определения дефектов сварки / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин, В.В. Киреенко // Дефектоскопия. – 2011. – № 6. – С. 44 – 49.

Ramazanov, I.S. Using two-stage clustering of acoustic-emission signals for the detection of weld flaws / L.N. Stepanova, I.S. Ramazanov, K.V. Kanifadin, V.V. Kireenko // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2011. – Vol. 47. – № 6. – P. 393-397.

10. Рамазанов, И.С. Динамическая кластеризация по набору параметров сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 10. – С. 12 – 16.

11. Рамазанов, И.С. Расчет координат источников сигналов акустической эмиссии в образцах из углепластика / Л.Н. Степанова, Е.Ю. Лебедев, И.С. Рамазанов // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 8. – С. 74 – 78.
12. Рамазанов, И.С. Акустико-эмиссионный контроль дефектов в процессе многопроходной сварки объектов из судостроительной стали / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, Е.Ю. Лебедев, И.С. Рамазанов, В.В. Киреенко, А.В. Вонсовский // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 12. – С. 74 – 80.
13. Рамазанов, И.С. Разработка методики браковки дефектов многопроходной сварки по распределению основных параметров сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, В.В. Киреенко // Дефектоскопия. – 2014. – № 11. – С. 57 – 70.
Ramazanov, I.S. The development of a defect-rejection procedure for multiple-pass welding by the distribution of the principal parameters of acoustic-emission signals / L.N. Stepanova, I.S. Ramazanov, V.V. Kireenko // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – Vol. 50. – № 11. – P. 667-678.
14. Рамазанов, И.С. Контроль дефектов сварки с использованием статистических методов анализа параметров сигналов акустической эмиссии / В.Е. Прохорович, Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 2. – С. 24 – 31.
15. Рамазанов, И.С. Методика локации сигналов акустической эмиссии при статических испытаниях образцов из углепластика / Л.Н. Степанова, В.В. Чернова, И.С. Рамазанов // Дефектоскопия. – 2015. – № 4. – С. 53 – 62.
Ramazanov, I.S. A procedure for locating acoustic-emission signals during static testing of carbon composite samples / L.N. Stepanova, I.S. Ramazanov, V.V. Chernova // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51. – № 4. – P. 227-235.
16. Рамазанов, И.С. Акустико-эмиссионный контроль дефектов многопроходной сварки крупногабаритных конструкций / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов, Е.Ю. Лебедев, В.В. Киреенко, А.В. Вонсовский, И.Ю. Кинжагулов // Дефектоскопия. – 2015. – № 9. – С. 20-27.
Ramazanov, I.S. Acoustic-emission testing of multiple-pass welding defects of large-size constructions / L.N. Stepanova, S.I. Kabanov, I.S. Ramazanov, E.Y. Lebedev, V.V. Kireenko, A.V. Vonsovskii, I.Y. Kinzhagulov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Vol. 51. – № 9. – P. 540-545.
17. Рамазанов, И.С. Совершенствование акустико-эмиссионной локации дефектов при прочностных испытаниях конструкций из углепластика / Л.Н. Степанова, Г.Г. Анохин, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов, В.В. Чернова // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 6. – С. 67 – 72.
18. Рамазанов, И.С. Использование вейвлет-преобразований для локации сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, А.Н. Серьезнов, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 10. – С. 18 – 26.

19. Рамазанов, И.С. Методика контроля целостности планера композиционного самолета при испытании на статическую прочность с использованием акустической эмиссии и тензометрии/ Л.Н. Степанова, В.Л.Кожемякин, И.С. Рамазанов, В.В.Чернова // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 5. – С. 14 – 19.
20. Рамазанов, И.С. Использование методов кластеризации для обработки акустико-эмиссионной информации / Степанова Л.Н., Чернова В.В., Рамазанов И.С //Контроль. Диагностика. – 2019. – №8 – С.12–21.
21. Рамазанов, И.С. Анализ процесса разрушения углепластика, изготовленного автоклавным формованием, по параметрам сигналов акустической эмиссии / Степанова Л.Н., Рамазанов И.С., Чернова В.В. //Конструкции из композиционных материалов. – 2020. – №3. – С.25–31.
22. Рамазанов, И.С. Локация сигналов акустической эмиссии в образцах из дюралюминия и углепластика с использованием антенны, состоящей из волоконно-оптических датчиков и пьезопреобразователей / Серьёзов А.Н., Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С., Чернова В.В., Кузнецов А.Б. //Контроль. Диагностика. –2021. – №2. – С.18–29.

Публикации в ведущих научных рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Wos

23. Ramazanov, I.S. Acoustic-emission location of flaws during multiple-run welding of contours with complex shapes / / L.N. Stepanova, I.S. Ramazanov, V.V. Kireenko // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2016. – Vol. 52. – № 5. – P. 261-268.
24. Ramazanov, I.S. Analysis of errors in location of flaws in multipass welds using different clustering methods / L.N. Stepanova, S.I. Kabanov, I.S. Ramazanov, K.V. Kanifadin // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. – Vol. 53. – № 2. – P. 96-103.
25. Ramazanov, I.S. Acoustic-emission testing of failure in samples of CFRP exposed to static and heat loads / L. N. Stepanova, V. V. Chernova, E. S. Petrova, I. S. Ramazanov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2018. –Vol. 54.–№ 11. – P. 748 – 756.
26. Ramazanov, I.S. Acoustic-Emission Procedure For Rejecting Defects in Multiple-Pass Girth Welds / L.N. Stepanova, S.I. Kabanov, I.S. Ramazanov, V. V. Chernova // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2019. –Vol. 55.–№ 12. – P. 898 – 908.
27. Ramazanov, I.S. Acoustic-Emission Testing of Early Generation of Defects in CFRP Samples under Static and Thermal Loading / L. N. Stepanova, V. V. Chernova, I.S. Ramazanov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2020. –Vol. 56.–№ 10. – P. 784–794.

Патенты

1. Пат. 2356043 РФ. МПК G 01 N 29/14. Способ определения координат источников сигналов акустической эмиссии и устройство для его осуществления / Степанова Л.Н.,

Серьезнов А.Н., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю., Рамазанов И.С.— заявл. 27.06.2007; опубл. 20.05.2009, Бюл. №14.—18 с.

2. Пат. 2379677 РФ. МПК G 01 N 29/14. Способ акустико-эмиссионного контроля качества сварного шва в процессе сварки и устройство для его осуществления / Степанова Л.Н., Серьезнов А.Н., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю., Бехер С.А., Рамазанов И.С., Канифадин К. В. – заявл.17.07.2008; опубл. 20.01. 2010, Бюл. №2.— 14 с.
3. Пат. 2424510 РФ. МПК G 01 N 29/14. Способ обнаружения в процессе сварки дефектов в сварных швах и определения их местоположения по акустическим сигналам и устройство для его осуществления / Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С., Канифадин К.В., Лебедев Е.Ю., Серьезнов А.Н. –заявл. 14.07.2009; опубл. 20.07. 2011, Бюл. №2.— 19 с.
4. Пат. 2572067 РФ. МПК , G 01 N 29/14. Способ акустико-эмиссионного контроля качества кольцевого сварного шва в процессе многопроходной сварки и устройство для его осуществления / Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С., Канифадин К.В. – заявл. 06.08.2014; опубл. 27.12. 2015. Бюл. № 36.—14 с.
5. Пат. 2599327 РФ. МПК G 01 N 29/14. Акустико-эмиссионный способ диагностирования изделий из композиционных материалов на основе углепластика и устройство для его осуществления / Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С., Чернова В.В.—заявл. 09.06.2015; опубл.10.10.2016. Бюл.№ 28.—19 с.
6. Пат. 2633002 РФ. МПК, G 01 N 29/14. Способ определения координат источников сигналов акустической эмиссии / Степанова Л. Н., Рамазанов И. С., Кабанов С. И., Бехер С.А. –заявл. 04.07.2016; опубл. 11.10.2017. Бюл. № 29.—19 с.
7. Пат. 2674573 РФ. МПК, G 01 N 29/14. Способ акустико-эмиссионного контроля дефектов в композиционных конструкциях на основе углепластика/ Степанова Л.Н., Кабанов С. И., Рамазанов И.С., Чернова В.В. – заявл. 14.06.2017; опубл. 11.12.2018. Бюл. №35. – 18 с.

Рамазанов Илья Сергеевич

**АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ
ПРИ ПРОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ И ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**

Специальность 2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики
материалов, изделий, веществ и природной среды

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать г.
1,0 печ. л. Тираж 100 экз. Заказ №
Издательство
630049, Новосибирск,
Тел. (383). E-mail:
