

Федеральное автономное учреждение «Сибирский научно-исследовательский институт
авиации имени С.А.Чаплыгина»

На правах рукописи

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

Д и с с е р т а ц и я

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Л.Н. Степанова

Новосибирск – 2022 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА АКУСТИКО–ЭМИССИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ, ПРОВОДИМОГО В ПРОЦЕССЕ КОНТРОЛЯ	12
1.1 Несущие информацию характеристики акустико-эмиссионного контроля, используемые для идентификации дефектов	12
1.2 Обработка сигналов акустической эмиссии с использованием вейвлет-преобразований и кластерного анализа.....	18
1.3 Анализ принципов локации источников акустико-эмиссионных сигналов	23
1.4 Задачи исследования.....	28
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ФИЛЬТРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ- ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ	30
2.1 Разработка методики фильтрации сигналов акустической эмиссии с использованием быстрого вейвлет-преобразования	30
2.2 Анализ влияния вейвлет-фильтрации на основные характеристики сигналов акустической эмиссии.....	35
2.3 Способы влияния на погрешность определения координат источников акустической эмиссии с помощью вейвлет-преобразования.....	39
2.4 Использование вейвлет-преобразования для исследования структуры сигналов акустической эмиссии	46
Выводы по главе 2.....	56
3 РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ, СНИЖАЮЩИХ ПОГРЕШНОСТЬ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ	57
3.1 Анализ влияния скорости волн и времени регистрации сигналов на приемниках на параметры локации источников акустической эмиссии	57
3.2 Совершенствование табличного метода локации источников в процессе нагружения образцов из углепластика	63
3.3 Классифицирование источников дискретной акустической эмиссии по параметрам кластеров.....	72
3.4 Анализ структуры кластеров сигналов акустической эмиссии для оценки степени опасности дефектов	83

3.5 Исследование применения методики динамической кластеризации для контроля дефектов в режиме контроля, совмещенного с процессом сварки	93
Выводы по главе 3.....	100
4 АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ.....	102
4.1 Разработка методики двухэтапной кластеризацией сигналов	102
4.2 Методика выявления дефектов в процессе многопроходной сварки	112
4.3 Определение дефектов сварки по распределению характеристик сигналов акустической эмиссии.....	121
4.4 Разработка метода локации дефектов в процессе сварки контуров сложной формы.....	130
Выводы по главе 4.....	138
Основные выводы и результаты работы.....	140
Список использованных источников.....	142

ВВЕДЕНИЕ

При современном уровне развития техники повышена несущая способность конструкций, обеспечиваются жесткие эксплуатационные условия и работа в различных температурных режимах. Все это предъявляет высокие требования к вопросам надежности работы конструкций.

Для решения проблемы определения качественного изготовления изделий и конструкций традиционно применяют методы неразрушающего контроля (НК). Они применяются при работе с материалами и конструкциями в определенных условиях эксплуатации и взаимно дополняют друг друга. Для решения задач по контролю дефектов конструкций в реальном времени получают распространение различные методы диагностики. Широкий диапазон возможностей открывает применение акустико-эмиссионного метода (АЭ), который позволяет определять склонность к деградационным процессам в элементах конструкции непосредственно в процессе ее нагружения. Развитие дефектов в такой конструкции под нагрузкой сопровождается излучением упругих волн, которые можно регистрировать преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ) [10, 12, 73, 105, 106].

Метод АЭ обладает высокой чувствительностью и позволяет локализовать активные дефекты, относящиеся к наиболее опасным, и использовать метод для обнаружения и отслеживания развития трещин в цельных металлических, сварных и композитных конструкциях [105, 106, 113, 116].

Формирование и распространение ультразвуковой волны в такой конструкции тесно связано со структурой материала, формой, размерами и условиями нагружения такого объекта контроля (ОК). Напряжения, вызванные воздействием механической нагрузки, возникающей в процессе эксплуатации или вследствие температурного градиента, либо приложенной при прочностных испытаниях, вызывают структурные изменения в материале конструкции. Одной из общих характеристик сигналов АЭ, регистрируемых диагностической системой при нагружении ОК, является зависимость распределения выделяющейся энергии от времени. На эти несущие информацию характеристики АЭ влияют такие аппаратные и методические факторы как величина и схема нагружения, характеристики датчиков, примененная антенна и качество акустического контакта с исследуемым объектом. Резонансные эффекты в ПАЭ, влияние их температуры на передачу сигнала [75,93], затухание высокочастотных составляющих сигналов АЭ могут приводить к их существенному искажению и, как следствие, приводить к накоплению погрешностей и неверной оценке состояния конструкции. При этом упругое поле колебаний в материале формируется изменениями в дефектах и зависит от их величины и уровня накопленных на них напряжений, в связи с чем регистрация возникающих упругих колебаний мето-

дом АЭ стало характерной его особенностью, которая обеспечивает его преимущество перед другими методами НК.

Принято, что несущие информацию параметры сигналов АЭ, принимаемые ПАЭ и определяемые АЭ системой (к таким параметрам обычно относят амплитуду, медианную и доминантную частоты, структурный коэффициент, энергию сигналов, временные параметры и т.д.) связаны с характеристиками развития дефектов и разрушения материала. Наличие этой связи помогает приблизиться к объективному представлению о степени опасности таких, излучающих сигналы АЭ, дефектных участков и даже говорить о динамике их развития, а в итоге судить о прочности и даже надежности испытываемой таким образом конструкции.

Метод АЭ используется при решении задач мониторинга состояния конструкций во многих областях техники: для контроля дефектов сварки, при прочностных испытаниях авиационных и железнодорожных конструкций, при диагностике композиционных материалов, определения состояния конструкций в процессе прочностных испытаниях и т.д. Он может рассматриваться как средство управления физическими процессами, протекающими в различных материалах при производственных операциях, является чувствительным и эффективным методом контроля их ранних стадий разрушения.

Применение метода АЭ в процессе прочностных испытаний ответственных элементов конструкций позволяет обеспечивать высокую чувствительность, экономить время, снижать вероятность катастрофического развития повреждений, а также диагностировать растущие дефекты в труднодоступных местах. Увеличение надежности прогнозирования разрушений обеспечивается комплексным подходом, основанным на одновременном анализе нескольких параметров сигналов АЭ [57, 59, 61].

Наиболее обобщенной характеристикой сигналов АЭ, регистрируемых диагностической системой при нагружении ОК, является зависимость распределения выделяющейся энергии от времени. Поэтому для каждой комбинации параметров объекта и условий нагружения научный интерес представляет определение взаимосвязи между механизмами разрушения объектов и несущими информацию характеристиками сигналов АЭ, который можно перенести и внедрить в процесс реальных прочностных испытаний.

Основными целями исследований при НК конструкций методом АЭ являются:

- определение координат дефектов в режиме реального времени;
- оценка степени опасности дефекта;
- идентификация типа повреждения;
- корреляция повреждений с условиями нагружения и напряженным состоянием конструкции;
- определение связи структуры сигналов АЭ со структурой материала конструкции.

В процессе распространения сигналов от источника до места установки акустических датчиков они претерпевают искажения. Несущие информацию характеристики сигналов АЭ зависят не только от типа разрушения, материала, особенностей конструкции, вида нагружения, но и от параметров акустических преобразователей, от характеристик материала ОК и качества установки датчиков.

При практическом применении метода АЭ среди ограничивающих факторов выделяют присутствие помех и шумов, как от самого объекта, так и от преобразователей. Это приводит к снижению чувствительности метода и к регистрации сигналов, которые не характеризуют изменения в материале [82]. Наибольшее негативное влияние на результаты АЭ-контроля и на точность локации дефектов оказывают акустические шумы, источниками которых являются взаимодействие участков контакта ОК с опорами, креплениями и т.п. Исключение таких помех с помощью фильтрации по частоте, которую можно реализовать на схемотехническом уровне, малоэффективно. Поэтому необходимо применять методические приемы, позволяющие преобразовать сигналы АЭ, выделяя значимую для фильтрации информацию.

В процессе АЭ-контроля частично обработку информации выполняет аппаратура в режиме реального времени, так как при пост-обработке может произойти несанкционированное разрушение конструкции и потеря информации. Основные характеристики паразитных сигналов часто оказываются близкими к характеристикам сигналов от дефектов, что осложняет браковку ОК по степени опасности дефектов и поиск связи основных несущих информацию характеристик сигналов АЭ с процессом разрушения конструкции.

Полную и достоверную информацию о процессе разрушения ОК в режиме реального времени получают при непрерывной регистрации сигналов АЭ со всех измерительных каналов. Для повышения быстродействия и точности локации были разработаны микропроцессорные системы, в которые введены «плавающие» пороги селекции [6]. Введение «плавающих» порогов селекции позволяет при увеличении амплитуды входного сигнала автоматически уменьшать коэффициент усиления для того, чтобы каждый измерительный канал не перешел в режим насыщения. При уменьшении амплитуды входного сигнала коэффициент усиления измерительного канала автоматически увеличивается, что обеспечивает необходимую чувствительность системы [78].

При включении микропроцессора в каждый измерительный канал удалось расширить функциональные возможности таких систем за счет изменения алгоритмов обработки информации при перепрограммировании процессоров. Параллельно с обработкой информации определяются характеристики, которые дополняют картину контроля. Среди них используется температура, нагрузка, степень деформирования в зоне контроля, характеристики циклического нагружения и т.д. Использование дополнительно параметрического канала, с помощью кото-

рого регистрируются параметры нагружения, позволяет более надежно идентифицировать диагностические признаки, которые будут чувствительны к малым отклонениям параметров состояния объекта исследования. Кроме того, это позволяет анализировать структуру сигнала АЭ, которая формируется изменениями структуры материала и позволяет контролировать техническое состояние ОК [5, 7].

Эффективность АЭ-контроля существенно зависит от набора основных несущих информацию характеристик, выбранных для обработки зарегистрированной информации, а также от методик, позволяющих устранять помеховые сигналы, напрямую не связанные с процессами разрушения, протекающими в области потенциальной опасности [1, 8, 20–24, 36, 39, 43, 60, 75, 80, 84, 89, 97].

К основным недостаткам АЭ метода относятся:

- отсутствие методик, связывающих основные информативные параметры АЭ-сигналов с дефектами ОК;
- трудности выделения АЭ-сигналов на фоне шумов и помех высокого уровня, сопровождающих работу диагностируемой конструкции;
- неустойчивость связи регистрируемых несущих информацию характеристик сигналов АЭ с параметрами ОК, зависящими от его состояния при нагружении;
- низкое быстродействие и точность локации при дополнительной обработке информативного потока в режиме реального времени.

Представленные в работе методы позволяют более точно определять координаты дефектов, оценивать степени их опасности, определять связь структуры сигналов АЭ со структурой материала объектов в режиме реального времени [14, 20–23, 46, 56] с применением современных микропроцессорных систем АЭ-контроля. К числу новых разработанных методов локации относятся: двухинтервальный [30, 54], среднего квадратического отклонения (СКО) в «окне» [3], модифицированный пороговый метод [4, 96].

Актуальность работы. Безопасная эксплуатация технических объектов во многом определяется надежностью применимых к ним методов НК. Одним из перспективных является метод АЭ, обладающий высокой чувствительностью и позволяющий локализовать активные дефекты, относящиеся к наиболее опасным, непосредственно во время испытаний. Вариативность параметров и их связь непосредственно с процессами механического или термического нагружения позволяют использовать их для оценки степени опасности дефектных участков и оценки состояния конструкции в целом. Методом АЭ осуществляется контроль крупногабаритных объектов с минимальным влиянием человеческого фактора на результаты измерений.

При воздействии нагрузки на 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 важное значение для неразрушающего контроля конструкций. Кроме того, одной из основных является задача исключения из анализа сигналов АЭ от посторонних шумов, не несущих полезной 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 др. Среди зарубежных исследователей выделяют работы Madaras E., Gorman M., Kanji O., Kurokawa Yu., которые оказали большое влияние на развитие данного направления исследований.

Объектом исследования являются элементы авиационных конструкций ответственного назначения в процессе прочностных испытаний и методики обработки АЭ информации при этих испытаниях.

Предмет исследования – методики анализа сигналов АЭ, направленные на повышения надежности обнаружения и локации развивающихся дефектов.

Цель работы – развитие методик обработки сигналов АЭ, повышающих достоверность идентификации и локации опасных дефектов при АЭ контроле 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;
- разработка способа динамической кластеризации основных несущих информацию характеристик 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, цифровая обработка сигналов АЭ, статистическая обработка АЭ-информации. Получены результаты прочностных исследований металлических и композиционных элементов авиационных конструкций при использовании метода АЭ и тензометрии. Разработаны методы регистрации и анализа данных АЭ-контроля, позволяющие определять дефекты в режиме реального времени при выполнении многопроходной сварки объектов сложной формы ответственного назначения с использованием микропроцессорных АЭ и тензометрических сертифицированных систем утвержденного типа.

Научная новизна.

1. Предложен способ расчета координат источников сигналов АЭ с использованием модифицированного способа сравнения параметров сигнала в двух временных окнах и вейвлет-преобразования.
2. Предложена методика обнаружения дефектов в процессе многопроходной сварки контуров сложной формы.
5. Модифицирован табличный способ локации источников, применение которого возможно непосредственно во время испытания объекта.
3. Разработан алгоритм быстрого вейвлет-преобразования сигналов АЭ, который позволяет отфильтровывать значимые сигналы и проводить локацию источников непосредственно 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 практически применяются методики расчета координат дефектов и степени их опасности в режиме реального времени при прочностных испытаниях элементов авиационных конструкций и самолетов в ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина». Разработанный способ контроля дефектов многопроходной сварки кольцевого сварного шва с использованием модифицированного табличного метода используется в программном обеспечении АЭ-системы СЦАД-16.10 при работе в ОАО «ПО «СЕВМАШ». Разработанные способы и методики АЭ-контроля дефектов при проведении прочностных испытаний конструкций используются в курсе лекций по дисциплинам «Автоматизации из-

мерений, контроля и испытаний» и «Приборы неразрушающего контроля» в СГУПС, Новосибирск, РФ.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Методика вейвлет-фильтрации сигналов АЭ с низким соотношением «сигнал/шум» и с использованием быстрого вейвлет-преобразования для уменьшения разброса координат локализации 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 несущих информацию характеристик 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); International conference on the methods of aerophysical research (Novosibirsk, 2020, November 1 – 7).

Публикации. По результатам исследований были опубликованы в соавторстве 22 статьи в изданиях из списка ВАК, получено 9 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.

1 МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА АКУСТИКО–ЭМИССИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ, ПРОВОДИМОГО В ПРОЦЕССЕ КОНТРОЛЯ

1.1 Несущие информацию характеристики акустико-эмиссионного контроля, используемые для идентификации дефектов

При оценке прочностных характеристик машиностроительных конструкций получил распространение метод АЭ, основанный на регистрации и обработке акустических сигналов, излучаемых материалом при деформировании. Упругие волны вызываются динамической локальной перестройкой внутренней структуры материала конструкции. Волны напряжений связаны со скоплением и движением дислокаций, формированием микродефектов вплоть до перехода изменений структуры материала на макроуровень с последующим разрушением. В зависимости от микроскопической структуры материала, различных неоднородностей и условий нагружения ОК изменяется и прохождение акустической волны от источника. В процессе деформации материала конструкции происходит образование и развитие различных дефектов, что приводит к излучению сигналов АЭ. Без развития дефектов не происходит излучения акустических волн, поэтому для регистрации сигналов АЭ конструкцию подвергают воздействию нагрузки, нарушающей стабильное состояние дефектов.

Метод АЭ находит широкое применение при решении задач мониторинга состояния и обнаружения повреждений конструкций во многих областях техники: для контроля дефектов сварки, при прочностных испытаниях различных конструкций, при их диагностике и мониторинге в процессе эксплуатации. Он может рассматриваться как средство контроля и управления физическими процессами, протекающими в различных материалах при производственных операциях. Как отмечается в [1–5], АЭ-контроль является одним из самых эффективных методов мониторинга процессов разрушения конструкции.

В ГОСТ Р 52727 – 2007 по АЭ-диагностике отмечается, что данный метод чувствителен к различным структурным изменениям при регистрации сигналов в широком диапазоне частот [25]. В настоящее время как в нашей стране, так и за рубежом проводятся исследования по комплексному использованию метода АЭ совместно с традиционными методами НК. Дефекты в конструкции под воздействием нагрузки начинают «звучать», и это «звучание» регистрируется в процессе АЭ-контроля. Любой развивающийся дефект нагруженной конструкции излучает звуковые волны, которые регистрируются ПАЭ и затем поступают в диагностическую АЭ-систему. Метод АЭ чрезвычайно чувствителен и эффективен при контроле ранней стадии развития дефектов. В режиме реального времени определяется зона разрушения, а глубина залегания и размеры дефектов могут находиться другими методами НК (УЗ, вихретоковым,

радиационным и т.д.). При этом повышается быстродействие и точность контроля, снижаются объемы сканирования объекта и сокращается площадь контроля.

Основные преимущества АЭ-диагностики заключаются в аккумулирующем информацию процессе обработки сведений о динамике появления и роста повреждений, в интегральном контроле крупногабаритных объектов, выявлении опасных растущих дефектов, диагностировании объектов без их разборки.

Используя информацию о скорости ультразвука в материале контролируемого объекта, местах установки преобразователей и разности времен прихода (РВП) сигналов АЭ рассчитываются координаты источников сигналов АЭ. При этом приходится учитывать слабую помехозащищенность метода, так как разнообразные помехи (акустические, электромагнитные, вибрационные) регистрируются наравне с полезными сигналами. Сигнал АЭ от растущего дефекта искажается под влиянием структуры и конфигурации акустического тракта тех нескольких типов волн и их мод, которые были возбуждены источником и трансформированы на границах объекта, а также от влияния преобразования. Для его практического использования необходимо осуществлять деформирование исследуемого объекта нагрузкой, не превышающей $P_{max} \geq 1,25 \cdot P_{раб}$, где $P_{раб}$ – рабочая нагрузка. Это существенно осложняет процесс широкого использования метода АЭ при диагностике и мониторинге конструкций.

При использовании АЭ-диагностики в ходе прочностных испытаний необходимо сосредоточить внимание на методических вопросах по устранению паразитных сигналов.

Волновые составляющие характеризуются несущими частотами. Частотно-временное представление сигнала служит для выделения сведений о динамических свойствах упругих волн. В задачах обработки нестационарных сигналов широкое распространение получили методы анализа временных и частотно-временных вейвлет-распределений, поскольку трансформация параметров сигналов с помощью преобразования Фурье эффективна только при анализе стационарных сигналов [3, 6].

Основными параметрами сигналов АЭ, используемыми для анализа состояния ОК, являются максимальная амплитуда, энергия сигнала и суммарная энергия сигналов, число сигналов, скорость счета, коэффициент концентрации источника, суммарный счет, активность источника, индивидуальные параметры отдельных сигналов АЭ. Конечно, все эти характеристики определяются с параметрами дефектообразования и могут быть рассмотрены как акустическое отображение [1, 3, 6].

Измерение потока сигналов АЭ позволяет диагностировать ранние стадии разрушения и исследовать кинетику накопления повреждений. В силу существенного уменьшения амплитуды высокочастотных спектральных составляющих, а также резонансных свойств ПАЭ и разброса их чувствительности, регистрируемые сигналы значительно искажаются, расплываются, проис-

ходит их частичное наложение [63]. В результате РВП сигналов на ПАЭ определяются со значительными погрешностями, что ведет к ошибочной оценке координат зоны разрушения и степени опасности повреждений. Прогнозирование состояния конструкций данным методом основывается на экспериментально определенных зависимостях между изменением основных параметров сигналов АЭ и происходящими процессами разрушения материала.

В связи с созданием современных микропроцессорных быстродействующих и высокоточных АЭ-систем появилась возможность разработки способов анализа информативных характеристик сигналов АЭ и решать задачи, связанные с их выделением на фоне помех, локацией и оценкой связи параметров с типом и степенью опасности зарождающихся дефектов [50, 64–70]. Для решения этих задач ведется поиск новых несущих информацию характеристик, позволяющих создавать критерии АЭ-контроля для работы с множеством материалов, используемых в настоящее время при создании конструкций. В различных исследованиях [53, 89, 91, 95, 97, 98] приводятся данные, позволяющие идентифицировать и оценить степень опасности некоторых дефектов путем анализа параметров АЭ (энергетический параметр *MARSE*, среднее число осцилляций по переднему фронту сигнала и двухинтервальный коэффициент). В результате оценки зависимостей перечисленных параметров от номера прохода многопроходной сварки обнаружено, что распределение *MARSE*, отражающее изменение амплитуды и длительности регистрируемых сигналов АЭ, является наиболее статистически значимым, что позволяет использовать его для автоматического распознавания дефектов.

Излучение АЭ-сигналов связывают с различными механизмами разрушения, к основному числу которых можно отнести [21, 108]:

- пластическую деформацию, при которой осуществляется совместное движение дислокаций (переход через плоскость разрыва модуля упругости, двойникование, аннигиляция пар дислокаций, структурных и фазовых переходов);
- повреждение структуры материала (образование, рост и накопление микротрещин).

Количество высвобожденной энергии АЭ явно зависит от размеров источника и скорости процессов, происходящих на нем. Локальные упругие возмущения порождают сигналы, регистрируемые по отдельности (дискретная АЭ) или непрерывно.

В некоторых работах исследованы эмпирические связи между регистрируемыми параметрами дефектов конструкции и характеристиками сигналов АЭ. Однако эти связи имеют качественный характер, поэтому необходимо разрабатывать методики браковки, позволяющие количественно оценить степень опасности дефекта [30, 40, 45, 53, 58, 104].

В случае регистрации непрерывной АЭ для части параметров измерение имеет свои особенности, появляются специальные параметры, описывающие непрерывный процесс эмиссии. Суммарная АЭ и скорость счета АЭ определяются числом пересечений регистрируемым сигн-

лом АЭ установленного порога чувствительности за время его регистрации или за единицу времени [25].

Метод АЭ способен определять разрушения металлических и композиционных конструкций на ранних стадиях развития и отслеживать разрушения материала конструкции на микроскопическом уровне [15– 24]. Анализ интегральных параметров потока сигналов АЭ (активности, их числа, общей энергии), информативность которых следует из их природы, позволяет идентифицировать стадии пластической деформации и разрушения материалов.

При вероятностном подходе выполняется анализ временных параметров потока актов АЭ на стадии рассеянного накопления микроповреждений в материале контролируемого объекта, рассматриваемого как пуассоновский. Для определения момента перехода процесса хаотического накопления микротрещин на стадию появления и развития макродефектов предлагается использовать метод инвариантов, который представляет собой обнаружение макродефекта по отклонению параметров потока актов АЭ от пуассоновской модели. Показано, что данный метод позволяет получить наглядную картину процессов накопления повреждений и точно определить момент наступления предразрушающего состояния ОК. Дополнительное использование амплитудных соотношений позволяет подтвердить диагноз в случае бездефектности ОК. С применением численных значений временных и амплитудных инвариантов построен диагностический критерий по наиболее просто регистрируемым параметрам сигналов АЭ [20, 21].

В процессе испытаний образцов и конструкций довольно часто в качестве информативного параметра применяется активность сигналов АЭ. Однако классификация источников по активности не учитывает скачкообразного характера развития дефектов в процессе разрушения конструкции. Качественных представлений о связи параметров сигналов АЭ с типом дефекта недостаточно для надежной оценки степени его опасности. Идентификация стадий структурных изменений, деформации и разрушения материалов ОК осуществляется по повышению активности сигналов АЭ. При этом может проводиться анализ их амплитудного распределения, но не выполняется локация источников, что не позволяет оценить степень опасности дефектов.

Наиболее общей характеристикой сигналов АЭ, регистрируемых диагностической системой при нагружении ОК, является зависимость распределения выделяющейся энергии от времени. Оптимальным параметром по соотношению «простота регистрации – информативность» является суммарный счет сигналов АЭ и скорость счета. При решении задачи определения надежной взаимосвязи между механизмами разрушения и некоторыми информативными характеристиками сигналов АЭ показано, что существенное изменение параметра «скорость счета» сигналов АЭ связано с ростом трещины, на стадии пластической деформации данный

параметр изменяется незначительно, а критерием предразрушающего состояния является число осцилляций сигналов АЭ [31, 33].

Если же в качестве объекта рассматривать сварные конструкции, то их прочностные характеристики на практике связаны с наличием несплошностей (например, трещин, пор, непроваров и т.д.), образующихся при сварке [6]. При контроле сварных швов, особенно в процессе многопроходной сварки методом АЭ обнаруживаются дефекты на самых ранних стадиях развития непосредственно в процессе сварочных работ, более того, появляется возможность оценивания степени дефектности сварного шва [26, 62]. Выявление опасных дефектов, таких как трещины и другие концентраторы напряжений, например, расслоения, флокены и т.д. во многом зависит от методики АЭ-контроля. Активность появления сигналов АЭ с большим размахом амплитуды постепенно снижается, а при последующем остывании зоны сварки сигналы регистрируются не равномерно, а скачкообразно [6].

Большой уровень шумов, сопровождающих сварку, затрудняет выделение полезных сигналов, поэтому необходимо решать сложную задачу локации дефектов при действии высокого уровня помех. Необходимо учитывать, что сигналы АЭ при сварке поступают в канал измерительной системы непрерывно, что может привести к ее переходу в состояние насыщения [2, 93].

Эффективность АЭ-контроля существенно зависит от набора параметров, выбранных для обработки зарегистрированной информации. Данное влияние особенно важно при контроле и разделении дефектов на локально неподвижные, медленно или быстро растущие, а деформации – на микропластические и пластические. Предложена [107] схема классификации источников сигналов АЭ по таким параметрам как «распределение и перемещение в объеме», «мощность», «продолжительность сигнала». Для обработки и анализа сигналов АЭ применяется не только амплитудное распределение, но и распределения спектральных параметров. Энтропия спектрального распределения рассматривается как информативный параметр сигналов АЭ. При этом вид энергетического спектра сигнала определяет тип источника только для сигналов из одной пространственной области, что требует их точной локации.

В [90, 91, 93] разделение источников от трещин и непроваров в процессе сварки осуществляется по амплитуде сигналов, сопровождающих процессы плавления и кристаллизации. По результатам исследований стальных образцов с искусственными дефектами, введенными в сварные швы, наиболее информативными параметрами были выбраны суммарный счет, скорость счета и медиана энергии. При этом основное число сигналов АЭ регистрируются на начальном этапе остывания сварного шва, после чего наблюдается снижение скорости счета, а на заключительном этапе сигналы АЭ регистрируются только из зоны дефектов.

Использование метода АЭ при выполнении фильтрации регистрируемой информации позволяет выявлять дефекты сварки в процессе сварочных работ, а также оценивать качество

исправления недопустимых дефектов. При этом важна оценка опасности дефектов и точность их локации. В [27–29] рассмотрена многопараметрическая система классификации на основе нечеткой логики. Используются следующие параметры АЭ: пиковая амплитуда, средний уровень огибающей, верхняя частота спектральной функции сигнала. Принимается, что высокая частота и амплитуда сигналов АЭ характеризуют появление развивающейся трещины. Приводятся примеры анализа сигналов от трещины сварного шва, вольфрамового включения, а также технологических помех. Подчеркивается, что при многопроходной сварке данные по единственному проходу не могут обеспечить адекватную оценку опасности дефекта. Показывается, что метод АЭ способен локализовать объемные окисления материала шва, не выявляемые методами ультразвукового и рентгеновского контроля [98, 101, 107].

Известно, что АЭ-контроль многопроходной сварки позволяет выявлять внутренние дефекты в момент самого процесса формирования шва, а также при его остывании [6, 78, 83, 87, 89, 91]. При этом осуществляется анализ зарегистрированной информации и оперативное исправление дефектов с минимальным объемом выборки металла.

В [80] предложено использовать многопараметрическую систему классификации степени опасности источников сигналов АЭ. Вероятностная природа процесса разрушения материала приводит к большому многообразию генерируемых сигналов АЭ. Для учета поведения развивающихся дефектов предложено использовать для оценки состояния контролируемого объекта методы нечеткой логики и ввести единый комплексный параметр, автоматически формируемый для каждого сигнала АЭ. Для накопления и обобщения АЭ-информации и суммирования опыта АЭ-контроля предлагается использовать алгоритмы обработки АЭ-информации с применением анализа состояния объектов на основе нечеткой логики [26, 75–76, 80, 86].

Важным этапом АЭ-контроля является определение набора параметров, которые применяются для анализа. При их выборе необходимо учитывать характеристики аппаратуры. Большим потенциалом обработки сигналов и извлечения различных параметров обладают системы с возможностью записи информации в цифровом виде. Аналого-цифровое преобразование позволяет трансформировать ряд параметров и определять спектральные характеристики и отображать сигналы АЭ в частотной области. Кроме того, по оцифрованной форме с применением методов математической обработки сигнала можно уточнять время начала зарегистрированного сигнала на приемнике. При этом повышается точность определения таких информативных параметров как амплитуда, время нарастания и длительность. Наиболее часто оценивают такие спектральные характеристики как ширина спектра, резонансная частота. Выделяют также граничную частоту (медианную), она соответствует значению спектральной плотности сигнала, при которой спектральная мощность справа от нее и слева равны. Также для анализа определяют частоту распределения сигналов по амплитудам, которая относится к одному и

тому же источнику. Поэтому для применения данного параметра необходимо предварительно выполнять локацию сигналов и выделение источников АЭ.

К основным недостаткам существующих методик анализа и обработки параметров сигналов АЭ относятся:

- отсутствие общепринятых соотношений, связывающих основные информативные параметры АЭ-сигналов с дефектами материала контролируемого объекта;
- трудности выделения АЭ-сигналов на фоне шумов и помех высокого уровня, сопровождающих работу диагностируемого объекта;
- неустойчивость связи регистрируемых параметров сигналов АЭ с параметрами состояния объекта;
- низкое быстродействие и незначительная точность локации при обработке информации в режиме реального времени.

1.2 Обработка сигналов акустической эмиссии с использованием вейвлет-преобразований и кластерного анализа

В процессе прочностных испытаний разрушение конструкций сопровождается регистрацией большого объема АЭ - информации. Для своевременного обнаружения дефектов запись информации осуществляется непрерывно в течение всего нагружения. При этом до 90 % регистрируемой информации относится к различным шумам и помехам, что затрудняет процесс быстрой и качественной локации дефектов. Решение о состоянии ОК принимается по результатам обработки экспериментальной АЭ-информации. Однако все осложняется необходимостью выделения полезных сигналов на фоне шумов и помех высокого уровня. Существуют методы анализа, позволяющие выполнить фильтрацию полезных сигналов АЭ, но большинство из них применяются уже после проведения контроля. Для качественной реализации метода АЭ при контроле образцов, конструктивных элементов и самих конструкций обработку получаемой информации необходимо выполнять в реальном времени. Поэтому современные АЭ-системы должны обладать высоким быстродействием и достаточной мощностью для обработки большого потока информации. Для этого используются различные статистические методы, в том числе, кластеризация [6, 7, 45, 75, 79, 115].

При АЭ-контроле задачей кластерного анализа является выделение источников сигналов АЭ за счет их группировки из общего массива. При оценке степени опасности дефектов и определении остаточного ресурса конструкции основным требованием к кластерному анализу является достоверное выделение источников. При этом принцип кластеризации сигналов в случае АЭ контроля отличается от традиционных задач статистического распознавания [28, 75].

Образы объектов распознаются с помощью процедуры отнесения распознаваемого объекта по совокупности наблюдений и степени соответствия выбранных параметров к одному из непересекающихся классов. Обычно стадиями данного процесса являются:

- 1) формирование поля распознаваемых признаков $\{\xi_1 \dots \xi_j\}$;
- 2) формирование диапазона для каждого параметра по каждому классу объектов $\{K_1 \dots K_j\}$ (этап обучения);
- 3) этап определения параметров и принятия решения об отнесении исследуемого объекта к одному из установленных классов по принятому алгоритму [90].

Однако возможен и совмещенный процесс записи сигналов АЭ и параллельная кластеризация, что и является особенностью динамической кластеризации. Таким образом, обучение выполняется совместно с принятием решения. Поэтому получаемая картина размещения кластеров сигналов АЭ на объекте после окончания испытания, в отличие от кластеризации в виде динамической группировки, точнее соответствует реальной картине расположения источников АЭ на ОК [89, 97].

Для получения полной информации о разрушении кластеризация сигналов должна выполняться с учетом положения источника сигнала. Координаты сигнала рассчитываются по РВП на ПАЭ рассматриваемой пьезоантенны, установленной в зоне контроля.

Оценка источников сигналов АЭ производится с применением различных методов кластеризации. Самым надежным из них является кластерный анализ по оцифрованной форме, при котором рассчитывается максимум функции взаимной корреляции цифровых эквивалентов. Это обусловлено тем, что оцифрованная форма наиболее полно характеризует сигнал. В [79, 89, 90] представлены результаты применения методики кластерного анализа при обработке сигналов АЭ, регистрируемых при анализе качества сварки и в процессе остывания сварного шва стальных образцов. При проверке нормальности распределения по статистическому критерию Шапиро-Уилка установлено, что распределение большинства кластеров является нормальным. При определении наличия грубых погрешностей по критерию 3σ получено, что все сигналы каждого кластера принадлежат к одному источнику и являются закономерными [5]. Главный недостаток метода кластеризации состоит в больших временных затратах, что не позволяет использовать его при контроле дефектов сварки в реальном времени [3, 6].

В [3, 6, 79] предложен метод кластеризации, основанный на анализе несущих информацию характеристик зарегистрированных сигналов АЭ. Данный подход позволяет уменьшить время обработки информации. Основной задачей является выбор оптимального набора параметров, позволяющих наиболее достоверно классифицировать сигналы АЭ. В работе [95] приведены результаты кластеризации источников и определения их координат по параметрам сигналов АЭ, записанных в процессе сварки и при последующем остывании двухстороннего

сварного соединения в стальных образцах с внедрением в сварной шов искусственных дефектов из титана и дюралюминия. Распознавание кластера проводили по энергии и параметрам локации источников сигналов АЭ. Показано, что выявленные при контроле кластеры соответствовали непроварам по сечению металла и по кромке шва, шлаковым включениям, порам и трещинам.

В [102] выполнен анализ экспериментальных результатов, полученных при прочностных испытаниях алюминиевых образцов при циклическом нагружении. Рассмотрены такие параметры сигналов АЭ, как координаты, медианная частота, частота максимума спектральной функции, амплитуда. Исследован вопрос оптимального построения целевой функции кластеризации. Показано, что с использованием кластерного анализа удастся определить момент смены механизма разрушения образца.

На рисунке 1.1 показаны результаты расчета корреляции необработанной АЭ-информации. Исходные данные и параметры сигналов АЭ дают очень ограниченное понимание о разрушении (рисунок 1.1, *а*). Кластер, основанный на подходе обеспечения указания критического роста разрушения, также используется, как информация о расположении. Разрушение образца происходило рядом с датчиком 2, что хорошо совпадало с плотной областью АЭ-кластера. На спектре (рисунок 1.1, *б*) черным показана область с высокой плотностью кластеров. Два кластера выстраивались в линию также как область разрушения, но до разрушения плотность сигналов кластеров была меньше. Погрешность локации сигналов АЭ связана с внутренней структурой материала, распространением волн Лэмба и скоростью звука до внезапного разрушения.

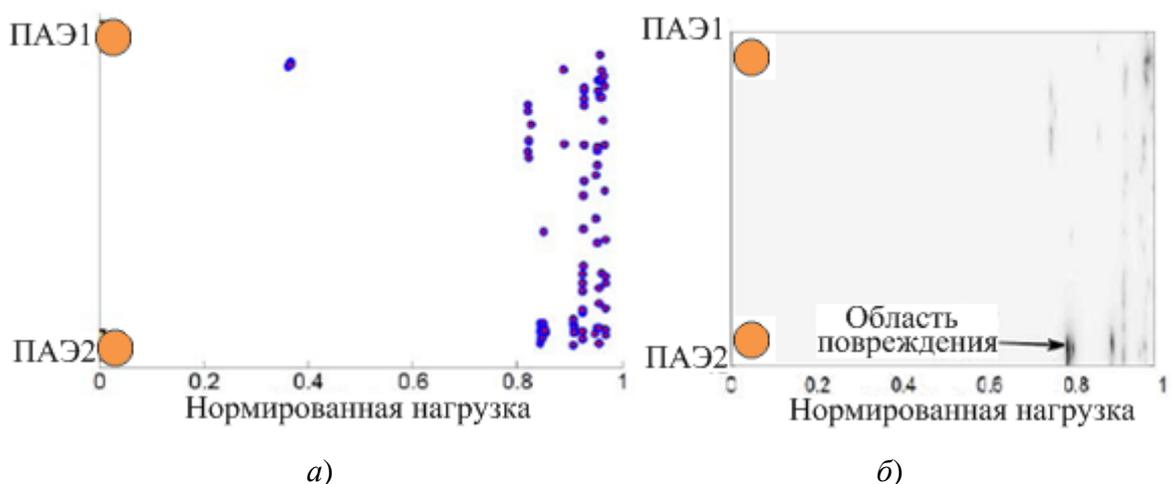


Рисунок 1.1 - Локация сигналов АЭ, зарегистрированных в образце с перекрестными слоями (*а*) и график плотности распределения (*б*)

Метод корреляции был разработан для получения информации о локации растущего разрушения и для связи его с критическим разрушением. Используя ту же АЭ-информацию, что и при анализе традиционных параметров, корреляция позволяет получить локацию кластеров, которые характеризуют разрушение волокон. Результаты отличались высокой повторяемостью для всех образцов. При использовании данной методики анализируется развитие и рост кластеров различных размеров и определяется наличие больших кластеров, непосредственно предшествующих внезапному разрушению.

Большинство сигналов, излучаемых при деформировании и разрушении твердых тел, являются нестационарными и имеют сложные частотно-временные характеристики. Поэтому для анализа необходим метод, обеспечивающий разложение сигнала АЭ как по частоте, так и по времени. Разложение по частоте позволяет выявить низкочастотную составляющую, а по времени – компоненты высокой частоты. Решение данной задачи осуществляется с применением вейвлет-преобразований (ВП), которые основываются на разложении сигнала по системе копирования материнской функции в виде дочерних вейвлет-функций, которые сдвинуты и масштабированы по времени (растянуты или сжаты) [3]. Основное направление применения ВП – анализ и выделение полезной информации из нестационарных во времени или неоднородных в пространстве сигналов. Это делается для того, чтобы в результате такого преобразования получать дополнительную информацию о характере источника и его расположении на ОК. Особенности состояния источника и координаты в этом случае влияют на формирование групп частотных составляющих сигнала и их изменение, которые можно увидеть только при ВП.

При анализе используют непрерывное (НВП) или дискретное ВП. Рассмотрим НВП, которое является разложением информативного сигнала по всем возможным сдвигам сигнала и его масштабным изменениям (то есть сжатиям и растяжениям) в виде заданной функции:

$$W_s = \frac{1}{\sqrt{a}} \int s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt,$$

где $s(t)$ – функция сигнала АЭ;

$\psi(t)$ – материнский вейвлет;

a – масштабный коэффициент;

b – временной сдвиг;

t – время.

В результате непрерывного вейвлет-преобразования получаем спектр коэффициентов корреляции сигнала АЭ с вейвлетом, который отображается в трехмерном пространстве в виде скалограмм.

При АЭ-контроле анализ сигналов с применением непрерывного вейвлет-преобразования затруднен и приводит к большим временным затратам. Поэтому альтернативой является

использование дискретного ВП, при котором значения масштабного коэффициента a и параметра сдвига b принимают дискретные значения. Обычно осуществляют расчет для коэффициентов a и b вида [87, 88]:

$$a = 2^i; \quad \frac{b}{a} = j; \quad i, j \in Z.$$

При анализе различных методов исследования сигналов АЭ с использованием ВП для мониторинга состояния элементов конструкций выделяют частотно-временной анализ сигналов; удаление из сигналов шумовых компонент; определение особенностей сигналов; сингулярный анализ ОК; получение особенностей имеющих повреждений и дефектов. Вейвлет-фильтрация сигналов АЭ позволяет эффективно удалять шумовые компоненты сигнала, что способствует уменьшению влияния шумов и помех на определения времени прихода сигнала, а в результате – к повышению точности локации источников АЭ.

В работах [42, 51] показан подход к идентификации структурных перестроек в деформируемом твердом теле, основанный на фрактальном и вейвлет-анализе сигналов АЭ. Рассмотрены вейвлет-скалограммы зарегистрированных сигналов, что позволило визуально оценить изменение их спектральных свойств во времени. В соответствии с полученными результатами при различных исследуемых напряжениях во всех сигналах присутствует доминирующая частота (600 – 800) Гц. При увеличении напряжения наблюдается расширение спектра доминирующей частоты.

Алгоритмы, использующие вейвлет-спектрограммы для идентификации источника, основанные на анализе спектрального отношения сигналов от «базового источника» и исследуемого, предложены в [46, 111]. В качестве «базового» принимался источник с минимальной длительностью акта излучения, что соответствует практически равномерному амплитудному спектру в полосе пропускания аппаратуры. Приведены результаты сопоставления длительности сигналов АЭ после сквозного прохождения волнами стального листа толщиной 9 мм. Получено, что увеличение длительности импульса приводило к уменьшению нормированного спектрального отношения. Предложенные алгоритмы обработки сигналов АЭ позволяют количественно оценить источник [46].

Совместное использование вейвлет-анализа и кластеризации показано в [11, 75], где обосновывается необходимость применения этих видов обработки АЭ-информации из-за сложности решения задачи моделирования сигналов АЭ. Рассматриваются меры близости сигналов АЭ, используемые для автоматической кластеризации. Предлагается метод оценки схожести формы сигналов на основании корреляции значимой части их вейвлет-детализации. Рассматривается алгоритм двухэтапной кластеризации и возможность кластеризации групп сигналов. Сначала осуществляется расчет коэффициента взаимной корреляции двух разных сигналов АЭ,

зарегистрированных одним измерительным каналом. Далее на основании рассчитанных коэффициентов корреляции выполняют кластеризацию сигналов, результатом которой является формирование «классов сигналов». Данные классы объединяют в группы таким образом, что в одну группу попадают сигналы различных измерительных каналов, относящиеся к одному акту АЭ. На втором этапе формируют «классы групп». К одному «классу групп» относятся те группы, в которых сигналы, зарегистрированные одними и теми же измерительными каналами, соответствуют одним и тем же «классам сигналов». Данный алгоритм позволяет достоверно осуществлять анализ АЭ-информации при малом количестве акустических датчиков.

1.3 Анализ принципов локации источников акустико-эмиссионных сигналов

В процессе нагружения ОК осуществляется регистрация и обработка информации об источниках непосредственно в процессе испытаний. Некоторые разработанные методики позволяют определять координаты источников, но большинство методик локацию не выполняют. Одним из преимуществ применения метода АЭ при диагностике конструкций является возможность локации дефектов на стадии их зарождения и в процессе развития. Задача определения местонахождения источника сигналов АЭ является одной из главных при диагностике. Известно достаточно много способов локации источников сигналов АЭ [1–4, 6, 23, 24, 34, 35, 39, 47, 52, 54, 82, 83, 85, 94, 100]:

- зонная локация широко применяется, но при ее использовании нельзя точно определить местоположение источника, так как локация источника привязана к одной из зон, на которые разделен ОК;

- расчетный способ локации позволяет определить координаты источника каждого сигнала путем решения системы уравнений, и определяющим условием для реализации этого способа является определение времени прихода сигнала от одного акта АЭ на несколько ПАЭ [1–4, 6]:

- амплитудный расчетный способ локации, который основан на учете коэффициента затухания сигнала при распространении на разнесенные ПАЭ, в этом случае принимается приближение о том, что амплитуда сигнала затухает при увеличении расстояния до источника строго по экспоненциальному закону, а логарифмический декремент затухания α принимается одинаковым при направлении волны в любом направлении от источника [3]:

$$A(x, y) = A_0 e^{-\alpha \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}},$$

где $A(x, y)$ – средний максимум или среднеквадратичное отклонение амплитуды зарегистрированного сигнала одним ПАЭ, который имеет координаты x и y ;

A_0 – первоначальная амплитудная характеристика, формируемая источником АЭ;

x_0, y_0 – координаты источника.

– локация с помощью определения РВП сигнала АЭ на пространственно разнесенные ПАЭ. При этом используется предположение о постоянстве скорости распространения акустической волны во всех направлениях.

При локации амплитудным способом проводят измерения отношение значений амплитуд сигналов вследствие одного акта АЭ в каналах различных датчиков. Способ предполагает экспоненциальное затухание акустических волн. Этот способ позволяет определять координаты в случае непрерывной АЭ. Однако при его реализации на точность результатов оказывают значительное влияние амплитудно-частотные характеристики ПАЭ, качество их установки, а также взаимная ориентация дефекта и диаграмма направленности ПАЭ.

Другим способом, который более распространен, относят временной принцип определения координат источников [3, 6, 30]. Основными способами расчета координат сигналов АЭ являются аналитический и табличный. При этом в аналитическом способе принимается, что во всех направлениях скорость распространения акустической волны постоянна, а для решения задачи составляется система уравнений, как правило, на линейных или плоскостных объектах.

При контроле конструкций сложной формы установка прямоугольной пьезоантенны затруднительна, а иногда невозможна, поэтому приходится применять антенну произвольной формы [85]. Для расчета прямоугольная система координат XOY преобразуется, для чего выполняются операции:

- нулевая точка декартовых координат устанавливается в точке нахождения одного из ПАЭ с координатами $(x_0; y_0)$;

- коррекция масштаба осей с приведением их к скорости ультразвука: $x' = x/C; y' = y/C$;

- поворот ортогональных осей на угол $\theta = \arctg [(y_1 - y_0)/(x_1 - x_0)]$.

В этом случае ПАЭ с координатами $(x_0; y_0)$ будет иметь координаты $(x'_0; y'_0)$, а для остальных ПАЭ координаты вычисляются по формулам;

$$\begin{cases} x' = \frac{1}{C} [(x - x_0) \cdot \cos \theta + (y - y_0) \cdot \sin \theta]; \\ y' = \frac{1}{C} [-(x - x_0) \cdot \sin \theta + (y - y_0) \cdot \cos \theta], \end{cases} \quad (1.1)$$

где C – скорость ультразвуковой волны.

В системе координат $X'O'Y'$ ПАЭ0 имеет координаты $(0; 0)$. Для определения координат источника на плоскости достаточно трех ПАЭ. С учетом всех действий система уравнений для расчета координат источника принимает вид:

$$\begin{cases} \sqrt{(y'_0 - y)^2 + (x'_0 - x)^2} = (T_0 + T_c); \\ \sqrt{(y'_1 - y)^2 + (x'_1 - x)^2} = (T_1 + T_c); \\ \sqrt{(y'_2 - y)^2 + (x'_2 - x)^2} = (T_2 + T_c), \end{cases}$$

где T_0, T_1, T_2 – времена регистрации сигнала от каждого акта АЭ на ПАЭ0, ПАЭ1 и ПАЭ2 соответственно;

T_c – временной сдвиг отсчета.

При использовании триангуляционного метода локации по РВП на погрешность определения координат влияют следующие характеристики [43]:

- погрешность определения РВП между ПАЭ для каждого акта АЭ ($\Delta t_{01}, \Delta t_{02}, \Delta t_{12}$);
- погрешности (x_1, x_2, y_2) измеренных значений координат ПАЭ;
- неопределенность скорости Δc акустических волн в материале ОК.

Первые два вида погрешности можно определить, используя систему координат $X'O'Y'$, в которой жестко нормирована скорость распространения акустической волны и заданная системой уравнений (1.1).

Для контроля объектов сложной формы применяется табличный метод локации. Перед испытанием объект контроля разбивается на N зон. На конструкцию устанавливается пьезоантенна и осуществляется калибровка, при которой последовательно каждый из датчиков переключается в режим имитатора, а остальные остаются приемниками. После регистрации приемниками имитирующего сигнала от излучающего датчика формируем матрицу РВП акустических волн [1]:

$$\begin{vmatrix} 0 & t_{01} & t_{02} & t_{03} \\ t_{10} & 0 & t_{12} & t_{13} \\ t_{20} & t_{21} & 0 & t_{23} \\ t_{30} & t_{31} & t_{32} & 0 \end{vmatrix},$$

где $t_{i,j}$ – РВП сигналов на разные ПАЭ пьезоантенны;

i – номер ПАЭ, работающего в режиме излучения;

j – номер ПАЭ, работающего в режиме приема.

При решении задач локации источников АЭ, применив табличный метод, точность определения координат зависит от точности вычисления РВП сигнала, зарегистрированного акустическим датчиком пьезоантенны. Для измерения РВП с минимальной погрешностью необходимо точно определить начало сигнала АЭ.

В объектах с малыми геометрическими размерами время, за которое волна переносится в акустическом тракте и несет энергию акта АЭ вполне сравнимо с погрешностью его определения диагностической системой. Это приводит к низкой точности локации источников, из-за

наличия в пределах размеров антенны интерференционной зоны, в которой абсолютно небольшие значения РВП на разные приемники приводят к значительным ошибкам при расчете координат каждого источника [100]. Поэтому получение высокой точности вычисления РВП связано с применением алгоритмов, в которых определяются оптимальные значения коэффициентов, используемых в вейвлет-преобразовании и определяются значения среднеквадратичного отклонения амплитуды сигналов АЭ в ограниченном временном диапазоне, который смещается по всему временному интервалу, занимаемому сигналом.

Преимущество использования вейвлет-преобразования перед классическим преобразованием Фурье при разложении квазистохастических сигналов АЭ связано с применением смещаемого и масштабируемого частотно-временного «окна». Такой подход позволяет наблюдать представленный сигнал с высоким разрешением по оси частот для низкочастотных составляющих, тогда используя в качестве оси время, наоборот получается такое разрешение для высокочастотных составляющих.

В работе [42] представлен сравнительный анализ точности локации источников с определением максимумов коэффициентов вейвлет-преобразований со способом, использующим СКО амплитуды сигналов АЭ в задаваемом временном интервале. С применением ВП определялся момент появления медленной моды в структуре сигнала АЭ. Для этого выполнялось их вейвлет-преобразование на основе базисного вейвлета Габора, который описывается уравнением:

$$y(t) = g(t) \cdot e^{-j\omega t}.$$

Расчет координат и их погрешностей выполнялся для четырех схем установки пьезоантенны. При этом изменялись геометрические размеры антенны, а положение источника сигналов АЭ было постоянным. Результаты исследований с применением такого вейвлета показали независимость погрешности локации источников в случае определения РВП от геометрической величины локационной зоны и значительно меньше, по сравнению со способом определения координат по изменению СКО амплитуды в задаваемом временном «окне».

В работе [77] авторы получили данные, показавшие, что при циклическом нагружении образцов из КМ «Органит-10Т» применение метода АЭ для анализа процесса разрушения эффективно. Авторами разработана методика, в соответствии с которой выполняется анализ амплитудного распределения, если объем выборки составляет 200 сигналов. Она позволяет получать информацию о динамике изменения амплитуды, которая является одним из информативных параметров. При этом не показан алгоритм, связывающий изменения амплитудного распределения и разрушения структуры материала образцов.

В статье [53] предложены критерии оценки степени опасности дефектов, локализованных при испытании котла цистерны. Методика заключается в нанесении браковочной сетки на

объект контроля. В области нанесения сетки локализуются сигналы АЭ, которые бракуются по алгоритму, включающему число сигналов АЭ, их амплитуда, спектральная характеристика, корреляционная связь сигналов по спектру, зависимость интенсивности сигналов от нагрузки. Точность расчета всех предложенных критериев зависит от достоверности регистрируемой информации, на которую влияет наличие шумов и помех в сигналах АЭ.

Для оценки степени опасности дефектов применяются различные методики и критерии. Амплитудный критерий основывается на расчете средней амплитуды нескольких сигналов для каждого источника и на сравнении ее с пороговым уровнем. Интегральный критерий предусматривает определение активности источников сигналов АЭ через число событий в интервале времени. При локально-динамическом критерии используется число выбросов и энергия сигналов АЭ, об источнике судят по результатам сравнения нормированной величины данных параметров и их пороговых значений. Интегрально-динамический критерий предусматривает определение коэффициента концентрации источника сигнала АЭ и значение его суммарной энергии.

Погрешность при установлении времени прихода сигналов АЭ на ПАЭ в ряде случаев увеличивается за счет таких факторов:

- большой уровень шума по отношению к уровню сигнала;
- единичные ложные всплески, регистрируемые аппаратурой;
- излучение нескольких типов волн при генерации одного события.

Волновой пакет сигнала АЭ искажается различными факторами, например, такими как различие электромеханического коэффициента преобразования приемного ПАЭ для различных частот, особенности контакта ПАЭ на поверхностях реальных ОК, искажение волнового пакета при распространении по ОК, влияние диаграмм направленности излучения источника и приема ПАЭ.

Время нарастания переднего фронта может зависеть от наличия множественных переотражений сигнала АЭ. Методы определения РВП можно разделить на следующие:

- определение времени прихода по превышению сигналом некоторого уровня дискриминации;
- метод взаимной корреляции сигналов с двух датчиков определяется как:

$$R(\tau) = \frac{\langle U_i(t)U_j(t+\tau) \rangle}{\sqrt{\langle U_i^2 \rangle \langle U_j^2(t+\tau) \rangle}},$$

где U_i – электрический сигнал АЭ с i -того ПАЭ.

- метод использования двух смещаемых окон, который фиксирует момент резкого изменения амплитуды сигналов АЭ.

Основная задача, решаемая при локации сигналов АЭ на плоскости состоит в определении координат источника по значениям РВП. Для преобразования информации о координатах каждого источника сигналов на ОК стоит задача визуализации точки локации в используемой модели на изображении поверхности ОК.

Расчет координат источника каждого акта АЭ проводят аналитическим (триангуляционным) и табличным способами. При использовании табличного способа локации связь между определенной комбинацией РВП и точкой на представленной и визуализированной модели объекта приводится в табличной форме. Таким образом, координаты дефектов определяются относительно места установки акустических датчиков [11, 40, 43, 48]. Данный подход позволяет локализовать источник сигналов АЭ при испытаниях объектов со сложной геометрической формой. В [13] приведены результаты контроля сосудов давления. Анализ погрешности определения координат с использованием алгоритма для антенны в форме правильного треугольника и табличного метода показал, что предложенный метод обладает большей устойчивостью к погрешностям регистрации при различных сбоях и наводках на каналах регистрации, наложении сигналов и т.д.

В [109] рассмотрен метод локации сигналов АЭ по времени прихода симметричной и асимметричной мод. Способ локации основан на комбинации времени распространения и алгоритме определения координат источника с использованием мод.

1.4 Задачи исследования

В настоящее время метод АЭ широко применяется при контроле и диагностике объектов, эксплуатируемых в различных отраслях промышленности. Актуальной задачей является разработка и совершенствование методик регистрации и обработки АЭ-информации. Недостатком рассмотренных методик является отсутствие алгоритмов, надежно связывающих изменение структуры сигналов АЭ и изменение структуры деформируемого материала ОК. Кроме того, в большинстве исследований предлагаются модели, работающие при испытаниях образцов, а не реальных конструкций. Поэтому задачи оценки состояния и определения типов дефектов в металлических и композиционных конструкциях остаются не решенными.

Необходимо разрабатывать новые методики, позволяющие совершенствовать процесс обработки и анализа АЭ-информации в режиме реального времени. Применение вейвлет-преобразований для решения задач фильтрации шумов и помех, частотно-временного анализа, а также для модификации алгоритмов локации является перспективным направлением. Это позволяет повышать точность получаемых при АЭ-контроле результатов и прогнозировать разрушение элементов конструкций при определенном напряженно-деформируемом состоянии.

Кроме того, необходимо разрабатывать новые методики кластеризации, позволяющие надежно выполнять классификацию сигналов АЭ (как при использовании кластеризации по цифровой форме) и без больших временных затрат (как при параметрической кластеризации).

После анализа исследований были сформулированы следующие задачи:

1) Проведение экспериментальных исследований технических объектов из металлических и композиционных материалов при прочностных испытаниях с использованием метода АЭ.

2) Разработка метода фильтрации шумов и помех, регистрируемых при АЭ-контроле образцов и элементов металлических и композиционных конструкций с использованием быстрого вейвлет-преобразования для повышения качества фильтрации и точности локации дефектов в режиме реального времени.

3) Разработка методики локации дефектов при АЭ-контроле процесса сварки контуров сложной формы и при остывании сварного шва и способа оценки степени опасности выявляемых дефектов.

4) Разработка метода динамической кластеризации по набору основных информативных параметров сигналов АЭ, позволяющего осуществлять обработку большого объема информации и надежную локацию дефектов непосредственно во время испытания.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ФИЛЬТРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

2.1 Разработка методики фильтрации сигналов акустической эмиссии с использованием быстрого вейвлет-преобразования

Активное развитие микропроцессорной техники позволило создавать диагностические АЭ-системы, способные регистрировать большие потоки информации и анализировать данные синхронно с их регистрацией. Для быстрого получения результатов контроля в современных АЭ-системах применяется широкое многообразие средств анализа АЭ информации. Среди них одним из наиболее полезных является вейвлет-преобразование (ВП).

Широкие возможности вейвлет-анализа используются при решении задач определения структуры сложных АЭ-сигналов и их выделения на фоне шумов и помех. Эти задачи особенно актуальны при анализе данных, синхронизированных с процессом их регистрации при прочностных испытаниях ответственных конструкций. Метод АЭ способен с большой достоверностью определять координаты усталостных повреждений непосредственно после их появления и в процессе их роста, соотнести их с определенным классом опасности и рассчитать остаточный ресурс ОК. Поскольку большой процент регистрируемых сигналов АЭ относится к помехам и шумам, алгоритмизация задачи фильтрации для быстрого получения итогов контроля представляется актуальной.

В современных диагностических АЭ-системах оцифровка сигнала АЭ имеет вид массива значений $U = \{u_i\}$ через равные интервалы $\Delta_i = \Delta$, которые обратно пропорциональны частоте f_d дискретизации аналого-цифрового преобразователя регистрируемых сигналов АЭ как $f_d = 1/\Delta$, и числом точек дискретизации для каждого сигнала АЭ $N: i = 0 \dots (N - 1)$.

Одним из путей схематического разбора «сложных» сигналов АЭ на составляющие для последующей идентификации дефектов, является ВП, математическим смыслом которого является декомпозиция функции по базису ортогональной системы $\varphi_{j,n}(x), \psi_{j,n}(x)$, материнского вейвлета $\psi(x)$ [3, 11, 15, 34, 35, 72, 87, 88, 114].

Фильтрация сигналов АЭ с использованием ВП представляется в виде последовательности действий. На первом шаге выполняется декомпозиция $U(t)$ по базису избранного вейвлета на базисе фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ) с применением быст-

рого ВП. На втором шаге происходит выбор из полного набора коэффициентов формулы (2.1) уровней $1 \dots, m_0$, для выбора полезной части сигнала:

$$U \leftrightarrow \{A_{m_0}, D_{m_0}, \dots, D_1\}, m_0 \in Z, \quad (2.1)$$

где Z – общепринятое обозначение множества всех целых чисел;

A_{m_0} – масштабирующие коэффициенты последнего применяемого уровня вейвлет-декомпозиции;

D_{m_0}, D_1 – детализирующие коэффициенты вейвлет-декомпозиции последнего и первого уровней.

Главные сложности при работе с многокомпонентными сигналами появляются на втором шаге, после которого исходный сигнал представляется в виде модифицированного набора коэффициентов:

$$\{a'_{m,k}, d'_{m,k}\} = \{A'_{m_0}, D'_{m_0}, \dots, D'_1\}, m_0 \in Z, \quad (2.2)$$

где $d'_{m,k}$ – детализирующие коэффициенты отфильтрованного сигнала.

На шаге 3 сигнал восстанавливается из набора шага 2 с помощью обратного ВП.

Сложность фильтрации АЭ-информации обусловлена тем, что при решении задачи моделирования сигналов приходится принимать во внимание множество факторов (расстояние до источника, параметры волновода, влияние среды). Дополнительно осложняет задачу непредсказуемость искажающих форму сигналов АЭ неустраняемых шумов и их нестационарный характер. После восстановления сигнала можно уточнить некоторые характеристики АЭ сигнала (например, максимальную амплитуду, время прихода сигнала на ПАЭ и др.) и тем самым выполнить задачу фильтрации. Однако такая постановка задачи требует оптимизации алгоритма выделения сигнала из шума с граничным условием в виде сохранения величины максимально возможного множества параметров в исходном, не искаженном состоянии. Широко известны *soft*-правила фильтрации, применяемые в задачах сжатия сигналов и распознавания образов. Коэффициенты ВП уменьшаются на одинаковую величину [34, 35]:

$$d'_{m,k} = \begin{cases} 0, & |d_{m,k}| < \varepsilon_m \\ \text{sign}(d_{m,k})(|d_{m,k}| - \varepsilon_m), & |d_{m,k}| \geq \varepsilon_m \end{cases},$$

где ε_m – порог решающего правила фильтрации;

$d_{m,k}$ – детализирующие коэффициенты вейвлет-разложения фильтруемого сигнала.

Искажение, которому в результате применения *soft*-правила подвергается угол наклона огибающей переднего фронта сигнала АЭ, как правило, незначительно. Однако изменение

амплитуды и всех связанных с амплитудой параметров существенно, что ограничивает возможность применения *soft*-правила для вейвлет-фильтрации сигналов АЭ.

Другим возможным подходом к вейвлет-фильтрации сигналов АЭ оказывается *hard*-правило, определяемое как метод выбора коэффициентов ВП по жестко заданному порогу:

$$d'_{m,k} = \begin{cases} 0, & |d_{m,k}| < \varepsilon_m \\ d_{m,k}, & |d_{m,k}| \geq \varepsilon_m. \end{cases} \quad (2.3)$$

После выбора материнского вейвлета определяется порог ε_m для каждого уровня декомпозиции базового сигнала, представленного своим набором коэффициентов D_m . В результате происходит подавление низкоамплитудных составляющих сигнала АЭ независимо по всем субполосам, ограниченным диадическими частотами. Каждый уровень декомпозиции m имеет свой масштаб ВП, поэтому результат преобразования аналогичен замене части сигнала в каждом временном «окне» размером Δt^m на субполосе m вейвлет-коэффициентом с соответствующим индексом. Соответствие уровней детализации ВП различным частотным субполосам показано на рисунке 2.1.

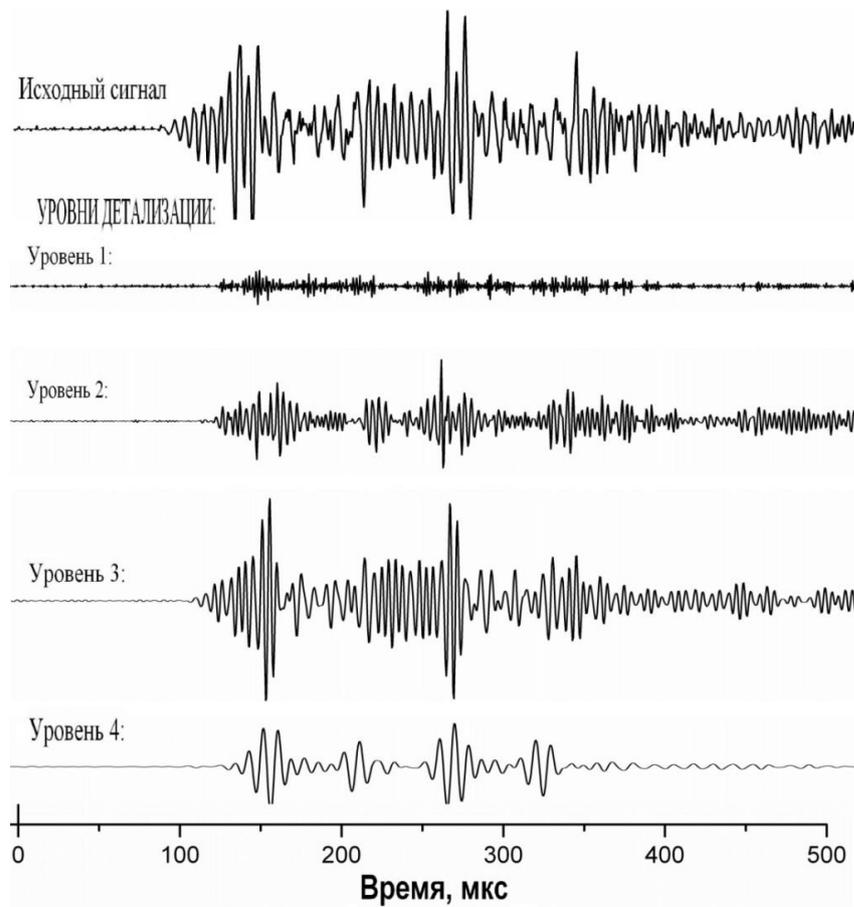


Рисунок 2.1 –Соответствие уровней вейвлет-декомпозиции сигнала АЭ частотным диапазонам

Пороги фильтрации ε_m , $m \leq m_0$ после осуществления ВП до уровня m_0 задаются в зависимости от величины полученных коэффициентов в формуле (2.1).

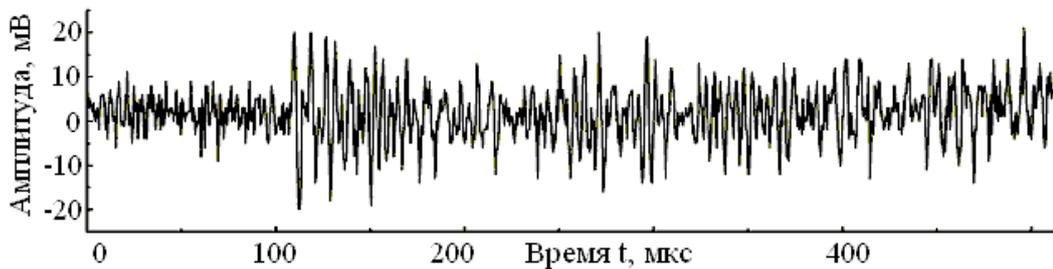
Один из рекомендованных (при работе с акустическими сигналами ультразвуковой части спектра) методов задания величины порога имеет вид [3, 11, 35]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_m &= s_1 \sqrt{2 \ln N^{(1)}}, m \leq m_0 \\ \varepsilon_m &= s_m \sqrt{2 \ln N^{(m)}}, m \leq m_0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

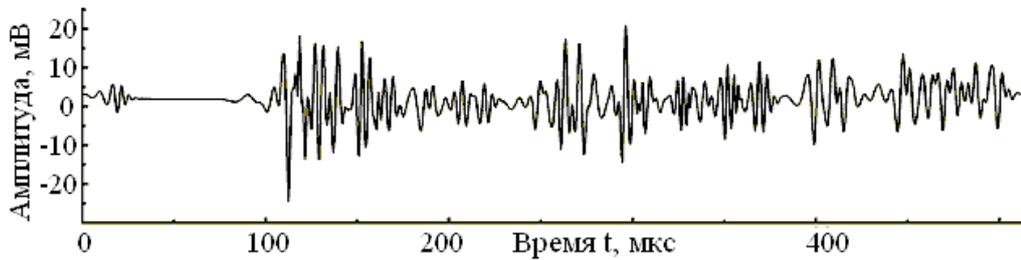
где N – число отсчетов в цифровой реализации сигнала АЭ;

$N^{(m)}$ – число коэффициентов ВП уровня m ;

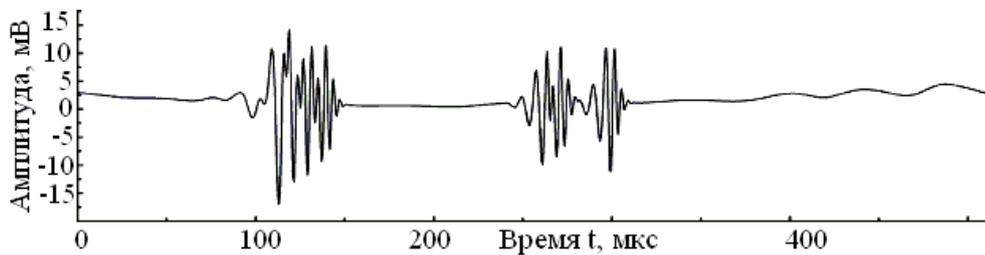
$s_m = \text{med}(|d_{j,k}|) / C_{\text{мет}}$, где $C_{\text{мет}} = 0,67$ – постоянная метода расчета.



а)



б)



в)

Рисунок 2.2 – Вид ВП для сигнала АЭ с малым соотношением сигнал-шум: а – вид сигнала; б – результат фильтрации с единым порогом; в – результат фильтрации с подбором величины порога для каждого уровня ВП

Вычисление s_m по медиане коэффициентов ВП осуществляется потому, что данная статистика оценки среднего легко вычисляется и наименее чувствительна к «выбросам», т.е. присутствию в выборке отдельных значений, сильно превышающих основной уровень по модулю.

В уравнении (2.4) порог может вычисляться как по первому уровню вейвлет-детализации (2.1), так и отдельно для всех уровней вейвлет-декомпозиции. Влияние вейвлет-фильтрации на примере сильно «зашумленного» сигнала АЭ для двух способов расчета порога показан на рисунке 2.2. Быстрое ВП производилось до уровня $m_0 = 6$.

Применение к группе сигналов метода с расчетом единого порога фильтрации может в некоторых случаях существенно увеличить количество локализованных сигналов за счет увеличения количества локализуемых слабых сигналов с низким (до фильтрации) отношением сигнал / шум. На рисунке 2.3 приводится картина локации источника АЭ до и после вейвлет-фильтрации. Время прихода сигналов определялось пороговым методом с автоматическим вычислением порогового уровня по форме сигнала. Для локации источника сигналов АЭ использовался аналитический метод.

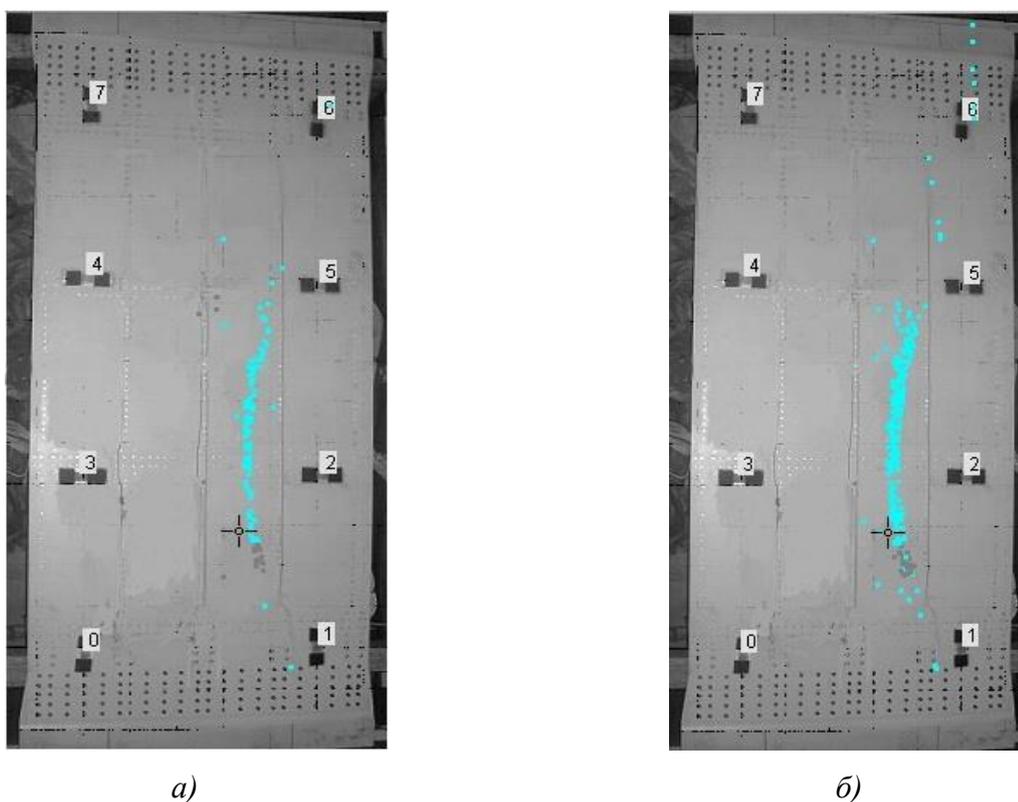


Рисунок 2.3 – Локация сигналов АЭ: *а* - исходная картина локации до вейвлет-фильтрации (256 локализованных событий); *б* - после вейвлет-фильтрации методом с расчетом единого порога (361 локализованное событие)

С другой стороны, применение к группе сигналов метода с независимым подбором порогов фильтрации на каждом уровне вейвлет-разложения во многих (хотя и не во всех) случаях

приводит к эффективному удалению из экспериментально полученного сигнала шумовой составляющей. Вследствие этого времена прихода сигналов АЭ определяются точнее и картина локации может качественно улучшиться (часть сигналов локализуется точнее). Однако вместе с шумом метод способен подавить и часть полезной составляющей акустического сигнала. Поэтому часть сигналов перестает локализоваться из-за нехватки информации в прошедшей через фильтр составляющей формы. Как правило, это происходит с сигналами, амплитуда которых ненамного больше амплитуды шума в канале. До фильтрации такие сигналы часто локализуются на заведомо неверных позициях, искажая общую картину.

2.2 Анализ влияния вейвлет-фильтрации на основные характеристики сигналов акустической эмиссии

Правила фильтрации из уравнения (2.4) дают хороший результат при решении задач типа аппроксимации сигнала АЭ со сжатием и сохранением частотных характеристик в случае, когда критерием качества аппроксимации является размер СКО сжатого исходного сигнала. При этом в процессе АЭ-диагностики технических объектов фильтрация применяется главным образом для автоматического детектирования возникновения информативной составляющей сигнала АЭ, при этом необходимо качественно отделить ее от шумовой. При использовании правила фильтрации вида (2.4) возможны появления ошибок оценки времен прихода (опережение или запаздывание) в результате искажения фильтрацией переднего фронта сигнала. При этом характер переднего фронта (большая длительность) и уровень сигнал/шум (слабая информативная компонента сигнала АЭ) имеют решающее значение. Для надежной и качественной вейвлет-фильтрации в процессе АЭ-диагностики необходимо использовать решающее правило, способное к распознаванию переднего фронта сигнала. Анализ показывает, что на всех уровнях декомпозиции вейвлета приближение переднего фронта можно описать группой коэффициентов, имеющих смежные индексы. Исходя из этого, решающим правилом для решения задач, поставленных перед АЭ-контролем объектов, имеет вид:

$$d'_{m,k} = \begin{cases} 0, & F(d_{m,k}, \dots, d_{m,k+t_m}) < \varepsilon_m; \\ d_{m,k}, & F(d_{m,k}, \dots, d_{m,k+t_m}) \geq \varepsilon_m, \end{cases} \quad (2.5)$$

Результатом применения этого правила является то, что можно выделить группы коэффициентов $d'_{m,k}$, которые формируют передний фронт сигнала АЭ за время его нарастания, которые затем заменяются на коэффициенты, соответствующие подвергнутому фильтрации сигнала. Дополнительно, вместо фиксированного порога фильтрации применялся «плавающий»

в подвижном окне временных интервалов. Функцией такого окна временных интервалов, для использования в решающем правиле (2.5), является:

$$F(d_{m,k}, \dots, d_{m,k+t_m}) = \frac{1}{2t_m + 1} \cdot \sum_{i=k}^{k+t_m} |d_{m,i}|,$$

где t_m – длительность временного «окна» на уровне декомпозиции m , соответствующая количеству коэффициентов вейвлет-декомпозиции, которые попадают в это «окно».

Расчет длительности временного «окна» t_m производится по формуле:

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

где T_X – длительность окна, выбираемая из условия $T_X > T_{нар}$;

$T_{нар}$ – характеристика предположительного времени нарастания сигнала, выбираемая из дополнительных характеристик, связанных с природой регистрируемых сигналов АЭ.

Преимуществом использования методов фильтрации, основанных на быстром ВП, для восстановления параметров сигналов АЭ, является возможность уточнения некоторых характеристик. На рисунке 2.4 представлен пример изменения распределения числа сигналов по доминирующей частоте после применения вейвлет-фильтрации.

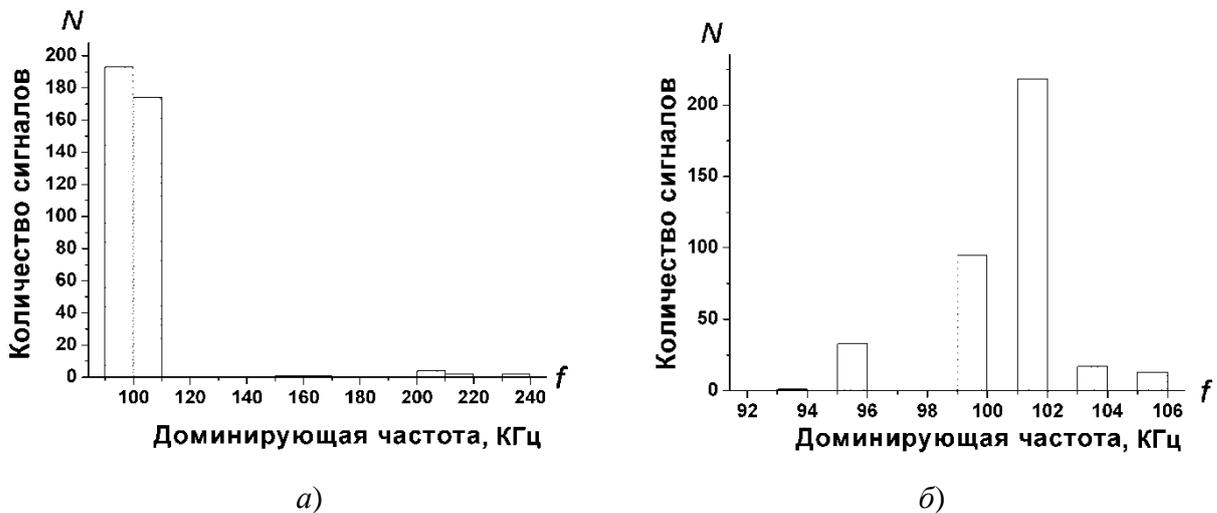


Рисунок 2.4– Распределения доминирующих частот спектра сигналов: *a* – до фильтрации; *б* – после вейвлет-фильтрации

Изложенная методика фильтрации применялась при обработке АЭ-информации, полученной при прочностных испытаниях клепаных авиационных панелей (рисунок 2.5). Для испытаний с дополнительной регистрацией АЭ сигналов применили диагностическую систему СЦАД-16.10 (свидетельство RU.C. 27.007.A № 40707, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под №45154-10). Время прихода сигналов АЭ определялось пороговым методом [1, 3, 6]. Кластеризацию групп сигналов, которые имеют высокую вероятность

формирования от одного и того же источника, сначала выполняли для всех сигналов АЭ по величине коэффициента взаимной корреляции автокорреляционной функции для всех пар сигналов. Рассмотрены результаты фильтрации для двух кластеров. До применения алгоритма в кластере 1 было локализовано 45 событий (рисунок 2.5, а), а в кластере 2 – 372 события (рисунок 2.5, в).

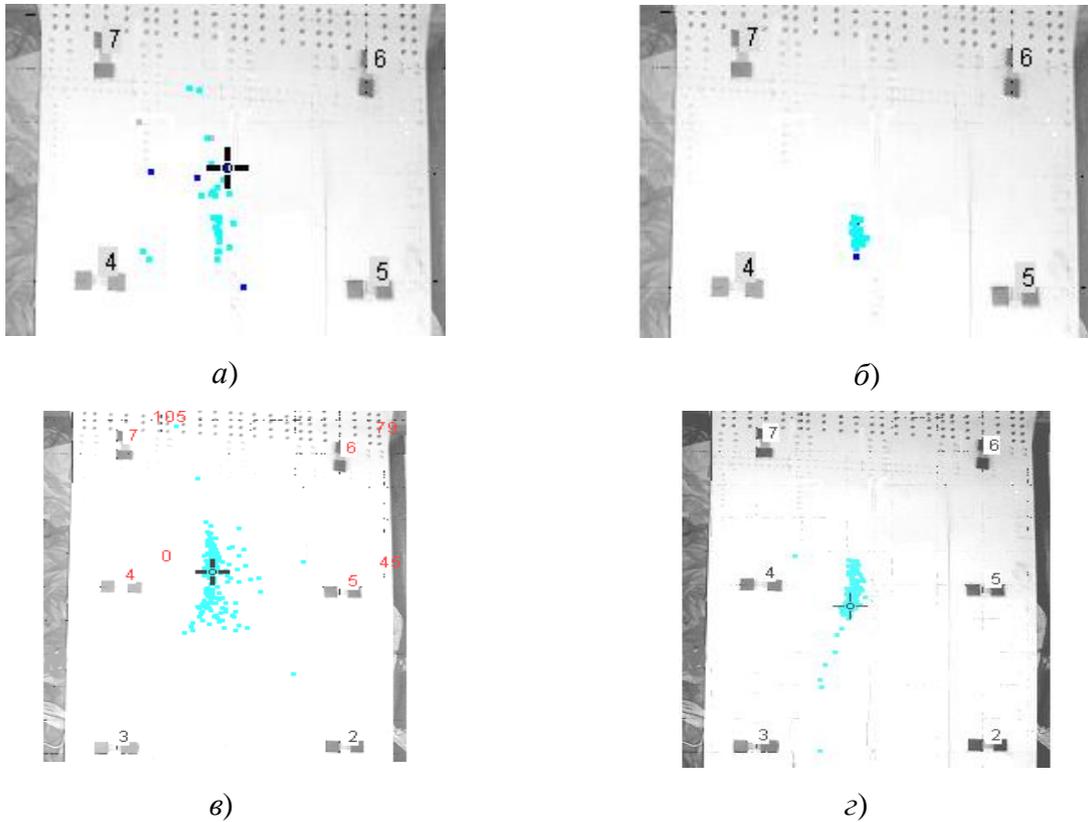


Рисунок 2.5 – Локация сигналов АЭ в кластере 1 до (а) и после (б) фильтрации; в кластере 2 до (в) и после (г) фильтрации

Далее с применением вейвлет-фильтрации и решающего правила, определяемого по формуле (2.5), была получена локация сигналов АЭ, показанная на рисунке 2.5, б и г. В кластере 1 было локализовано 44 события, а в кластере 2 – 197. При этом разброс точек локации был существенно уменьшен. Установлено, что использование «оконного» решающего правила улучшает качество фильтрации. Наибольший эффект был получен для слабых сигналов АЭ.

Проанализировано распределение доминантных частот в спектре сигналов АЭ. Получено, что фильтрация позволяет устранять шумовую помеху, вызывающую искажение спектра. Кроме того, для доминантных частот (таблица 2.1) и времен прихода (таблица 2.2) сигналов АЭ на ПАЭ отмечалось уменьшение дисперсии. Величины для распределений оценивались по стандартным формулам:

$$D_N = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \quad \text{– дисперсия выборки;}$$

$$S_E = \sqrt{\frac{D_N}{N}} \quad \text{– стандартная ошибка оценки дисперсии;}$$

$$S_D = \sqrt{D_N} \quad \text{– среднее квадратическое отклонение;}$$

где N – размер выборки; \bar{X} – среднее выборки.

Таблица 2.1 – Доминантная частота в спектрах сигналов АЭ

Номер кластера	До фильтрации				После фильтрации			
	СКО, кГц	Стандартная ошибка, кГц	СКО, %	Стандартная ошибка, %	СКО, кГц	Стандартная ошибка, кГц	СКО, %	Стандартная ошибка, %
1	90,20	13,16	9,02	1,32	72,68	10,60	7,29	1,06
2	17,24	0,889	1,72	0,09	2,10	0,11	0,21	0,02

Таблица 2.2 – Распределение параметров времен прихода сигналов АЭ

Номер кластера	До фильтрации				После фильтрации			
	СКО, мкс	Стандартная ошибка, мкс	СКО, %	Стандартная ошибка, %	СКО, мкс	Стандартная ошибка, мкс	СКО, %	Стандартная ошибка, %
1	23,18	3,42	10,53	1,6	2,82	0,43	1,3	0,2
2	85,30	4,70	38,8	2,1	68,23	3,69	31,0	1,7

Рассмотрено применение вейвлет-фильтрации при обработке результатов прочностных испытаний авиационной панели самолета SSJ-100. В процессе нагружения был использован способ определения времени прихода для каждого сигнала АЭ при фиксированном пороге чувствительности. При этом была получена локация, представленная на рисунке 2.6, а [35].

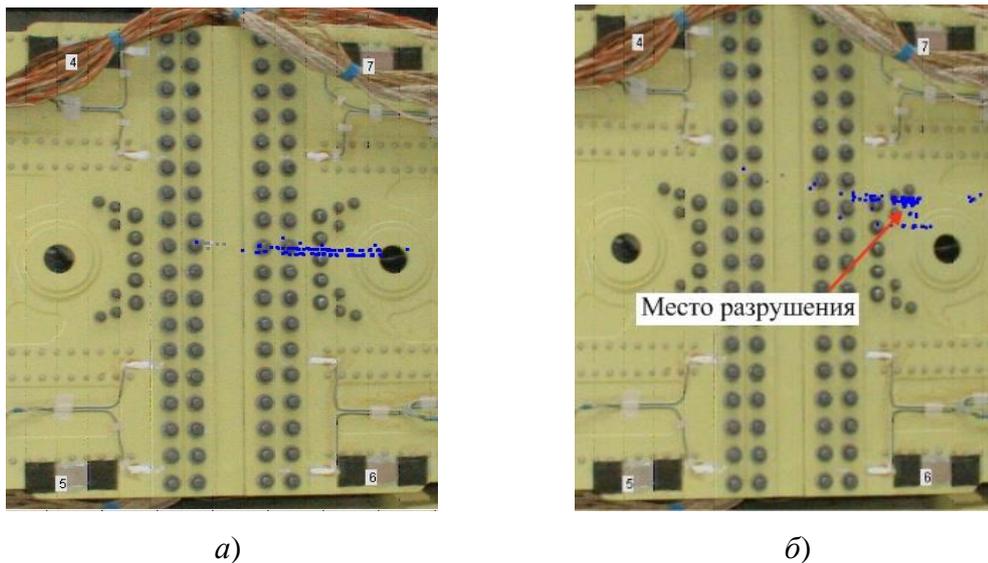


Рисунок 2.6 – Локация источника АЭ при нагружении авиационной панели самолета SSJ-100:

а - с использованием порогового метода; б – после применения вейвлет-фильтрации

Далее для зарегистрированной АЭ-информации применялся разработанный алгоритм вейвлет-фильтрации. При этом координаты сигналов АЭ смещались в верхнюю часть ОК (рисунок 2.6, б). При испытаниях была установлена область, в которой начиналось разрушение конструкции. Дальнейшее нагружение панели приводило к развитию усталостной трещины, которая вышла на поверхность. После прерывания нагружения и осмотра на участке отображенного источника была найдена развивающаяся трещина длиной 105,5 мм. Кроме того, симметрично относительно стыка визуально была обнаружена другая трещина длиной 90,6 мм. При этом из зоны обнаружения второй трещины акустической активности зарегистрировано не было. Сигналы из источника были локализованы из района края усталостной трещины. Однако момент зарождения и начальный этап ее развития не был зарегистрирован.

Сопоставление результатов локации после вейвлет-фильтрации и местоположение дефекта показало, что предложенная методика позволяет более точно определить координаты и момент зарождения усталостной трещины на ранней стадии.

2.3 Способы влияния на погрешность определения координат источников акустической эмиссии с помощью вейвлет-преобразования

При АЭ-контроле задачу определения координат различных источников приходится решать с помощью вычислений, то есть, косвенным способом. Для этого, в процессе регистрации сигналов АЭ определяются времена их прихода на датчики пьезоантенны (T_i , $i = 0..3$ – номер канала, к которому подключен ПАЭ) и координаты (x_i , y_i), а затем рассчитываются их РВП.

Погрешность определения координат по РВП находится как:

$$\Delta^2 = \Delta_x^2 + \Delta_y^2$$

где $\Delta_x^2 = (x_d - x)^2$; $\Delta_y^2 = (y_d - y)^2$;

(x , y) – координаты дефекта, рассчитанные по времени прихода сигналов АЭ;

(x_d , y_d) – действительные координаты дефекта.

Для определения координат дефекта (x , y) необходимо рассчитать значение $(T_i + \delta_i)$, где δ_i – погрешность определения времени прихода сигнала АЭ. Минимизация этой погрешности позволяет повысить точность расчета координат (x , y). Данная задача может быть решена с использованием последовательной сначала вейвлет-фильтрации, а затем установления времени прихода сигнала на ПАЭ.

Цифровую форму записанного сигнала можно представить в виде зависимости:

$$X = \{x_i\}, 0 \leq i \leq N - 1$$

где N – количество точек дискретизации записываемых сигналов.

Далее для вейвлет-фильтрации необходимо задать глубину вейвлет-декомпозиции исходного сигнала, которая определяется параметром $K \leq \log_2 N$. На выбор оказывает влияние ограничение снизу полосы частот ω_L , в пределах которой производится вейвлет-фильтрация. В свою очередь, значение нижней границы для полосы частот вычисляем по формуле:

$$\omega_L = \omega_d / 2^{K+1},$$

где ω_d – частота дискретизации сигнала АЭ.

Фильтрация с использованием вейвлет-преобразования рассчитывается в диапазоне частот $[\omega_L, \omega_d/2]$. Также выбирается вейвлет $\psi(x)$.

На следующем этапе для уменьшения погрешности измерений проводится усреднение исходного сигнала: $X \rightarrow X'$. Сигнал можно представить в виде:

$$X' = \{x'_i\}, x'_i = x_i - \bar{x}, 0 \leq i \leq N-1, \quad (2.6)$$

где $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i x_i$ – среднее значение сигнала, вычисленное из оцифрованных дискретных величин.

Определенные времена начала сигнала АЭ во времени точнее совпадают с координатами известного источника при использовании оптимального порогового значения решающего правила фильтрации ε_j , которое связывается с входным параметром алгоритма оптимизации фильтрации A и вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_j = A \cdot m_j \sqrt{2 \ln N^{(j)}}, \quad 1 \leq j \leq K \quad (2.7)$$

где $m_j = \text{med}_{0 \leq i < N^{(j)}} \{|d_{ij}|\}$ – медиана модулей детализирующих коэффициентов на каждом уровне разложения j .

Преимущество использования в расчетах медианы связано с ее меньшей чувствительностью к наличию в выборке отдельных выбросов.

Множитель A в формуле (2.7) варьируется в некотором диапазоне с шагом d_A :

$$d_A \leq A < A_{\max},$$

где $A_{\max} = \max_j \left\{ \frac{M_j}{m_j \sqrt{2 \ln N^{(j)}}} \right\}$ – максимальное значение итерационного шага для параметра алгоритма фильтрации;

тра алгоритма фильтрации;

$M_j = \max_{0 \leq i < N^{(j)}} \{|d_{ij}|\}$ – максимум вектора модулей коэффициентов вейвлет-декомпозиции уровня j фильтруемого сигнала;

d_A – заданный шаг изменения параметра A .

Исходя из сказанного, при применении расчетов возможны три результата вычислений:

– параметр $A = 0$, в этом случае нулевой порог правила фильтрации $\varepsilon_j = 0$, что приводит к восстановлению сигнала без изменений;

– если будет выполняться условие $A > A_{\max}$, то восстановленный сигнал, к которому применяется быстрое ВП, становится равным 0;

– если множитель A будет в диапазоне $d_A \leq A < A_{\max}$, то для каждого его значения определяется восстановленный сигнал $Y' = \{y'_i\}, 0 \leq i \leq N - 1$, расчет которого выполняется по формуле (2.5) с использованием обратного быстрого ВП с применением коэффициентов $d'_{j,k}$.

В последнем случае расчет с помощью вейвлет-фильтрации приводит к трансформации исходного сигнала по формуле (2.6) с нулевым средним.

Затем алгоритм определяет момент времени T' пересечения подвергшимся ВП сигналом порога дискриминации АЭ-системы для каждого сигнала на различных ПАЭ. При использовании этой методики, формула для определения времени прихода принимает вид:

$$T' = (T + \delta'),$$

где T – время прихода, определенное для не подвергавшегося ВП сигнала;

δ' – разница определения времени прихода между временами необработанного и преобразованного сигналов.

Время T' также как и в обычном случае определяется по моменту первого превышения фильтрованным сигналом АЭ Y' порогового значения $U'_{\text{пор}}$, т.е.

$$T' = I_{U'} / \omega_d$$

где ω_d – частота дискретизации;

$I_{U'} = \min_{0 \leq i < N} \{i : y_i > U'_{\text{пор}}\}$ – номер отсчета первого превышения фильтрованным сигналом АЭ порогового уровня.

Если шумы канала представить равными нулю, значение погрешности δ' рассчитывается для каждого порога при определении времени прихода $U'_{\text{пор}}$ и для каждого параметра A алгоритма вейвлет-фильтрации. При этом параметры A и $U'_{\text{пор}}$ выполняют функции управления

параметрами в алгоритме вейвлет-фильтрации сигналов АЭ. Для этого U'_{nop} можно изменять в пределах:

$$d_U \leq U'_{nop} < U'_{max}$$

где d_U – шаг изменения порогового значения при вычислении времени прихода сигнала на ПАЭ, который соответствует амплитудному порогу чувствительности измерительной системы; U'_{max} – максимально возможное значение этого порога, который можно рассчитать по формуле:

$$U'_{max} = 3\sigma,$$

где $\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n_\sigma - 1)} \sum_{i=1}^{n_\sigma} (X_i - \bar{X})^2}$ – оценка СКО шума, определяемая из интервала времени до момента времени прихода исходного сигнала АЭ на приемный ПАЭ;

n_σ – численно выраженный интервал числа точек дискретизации, используемых для оценки шума.

Поэтому минимизировать погрешность определения времени прихода для каждого сигнала АЭ на ПАЭ $|\delta| \rightarrow \min$ можно с помощью набора приведенных операций:

$$\delta'(A, U'_{nop}) \rightarrow \min_{\substack{d_A \leq A < A_{max} \\ d_U \leq U'_{nop} < U'_{max}}} \delta'(A, U'_{nop}), \quad \delta'(A, U'_{nop}) = |T'(A, U'_{nop}) - T|.$$

Погрешность, зависящая от обоих варьируемых параметров преобразования $\delta'(A, U'_{nop})$ определяется на поле значений $(d_A, d_{U'})$. При решении оптимизационной задачи учесть, что $\delta'(U'_{nop})$ является, так называемой кусочно-гладкой возрастающей функцией. Но в результате расчетов получаемая поверхность функции $\delta'(A, U'_{nop})$ не является гладкой. Поэтому поиск оптимальных параметров функции следует производить как интегральное среднее значение.

Параметр погрешности $I_\delta(A, U) = \int_{A-d_A}^{A+d_A} \int_{U-d_U}^{U+d_U} \delta'(A, U) dU dA$ определяется для всех точек сетки, кроме крайних. Затем определяется минимум функции $I_\delta(A, U) \rightarrow \min$ на сетке $(d_A, d_{U'})$ с введением дополнительных граничных условий $U \rightarrow \min, A \rightarrow \min$. Удовлетворяющие этим условиям числовые значения можно принять как оптимальные в алгоритме A_{opt}

и U'_{opt} . Операция определения оптимальных характеристик производится для каждого ПАЭ. Таким образом, можно получить полный набор величин для алгоритма, с помощью которого можно определять координаты источника сигналов АЭ с повышением точности.

Такая методика уточняющей локации с использованием вейвлет-фильтрации применялась в процессе обработки АЭ-информации, зарегистрированной при прочностных испытаниях ответственных элементов авиационных конструкций (самолет Су-27, панели гермофюзеляжа самолета SSJ-100, деаэраторы, лопасти вертолета Ми-8 и т.д.).

При испытании самолета Ту-22 были исследованы толстые металлические плиты с различным крепежом [37]. На подготовительном этапе была выполнена калибровка зон контроля с применением имитатора Су-Нильсена. При нагружении плит осуществлялась регистрация сигналов АЭ, локация которых приведена на рисунке 2.7.

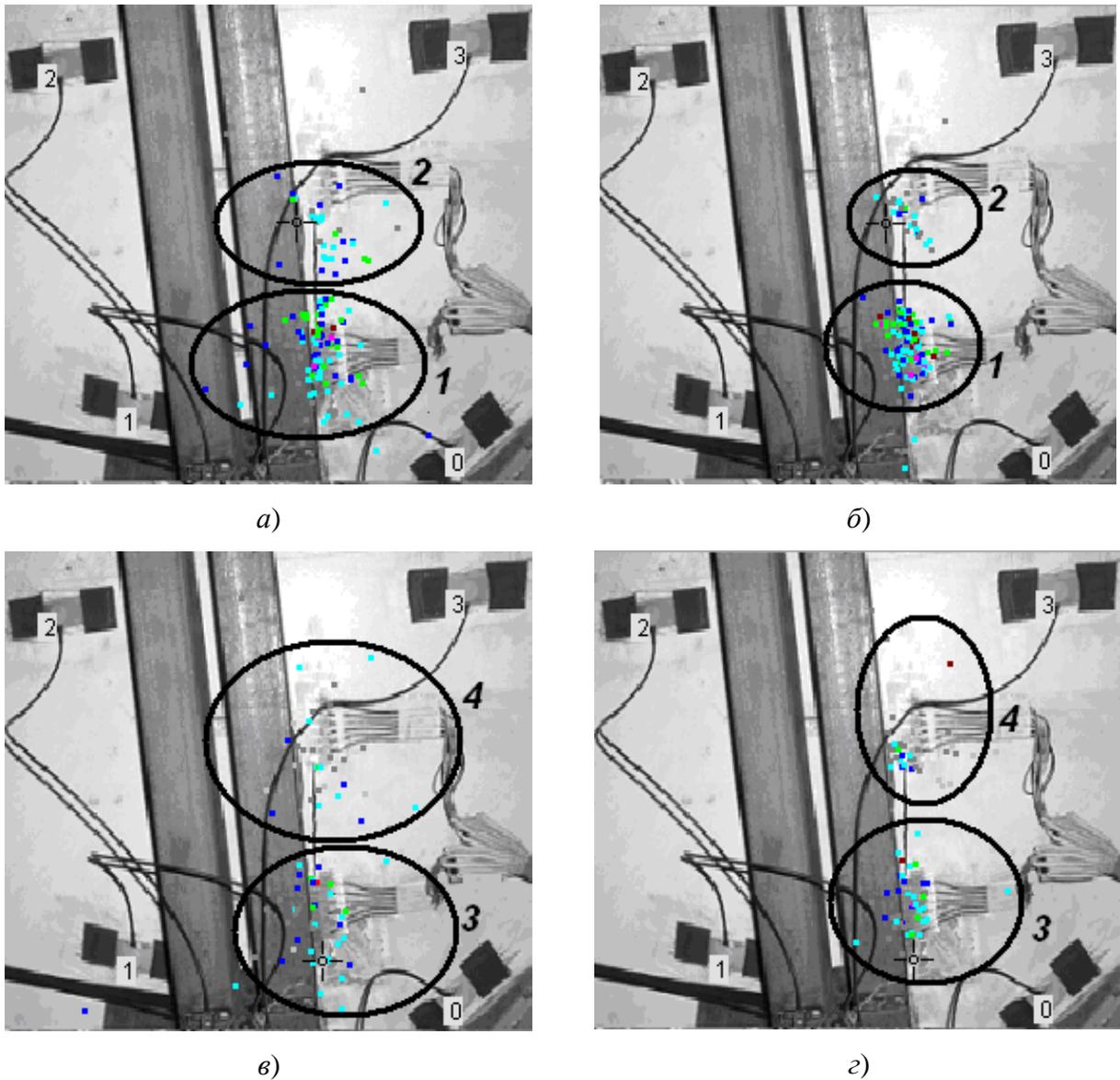


Рисунок 2.7 – Локация сигналов АЭ на самолете Ту-22 с применением стандартного порогового способа определения координат (а, в) и вейвлет-фильтрации (б, г)

При этом в процессе испытаний для определения времен прихода сигналов на ПАЭ использовался пороговый метод (рисунок 2.7, а, в). После проведения испытаний использовали дополнительно вейвлет-фильтрацию для уточнения координат источников (рисунок 2.7, б, г). Сравнение полученных результатов показало, что методика с использованием вейвлет-фильтрации позволила исключить разброс координат, повысить точность локации [1, 3, 6, 35, 37, 38, 88, 96].

Для всех идентифицированных источников сигналов АЭ были рассчитаны СКО по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2},$$

где $R_i = \sqrt{(X_i - \bar{X})^2 + (Y_i - \bar{Y})^2}$ – расстояние в плоскостных координатах от рассчитанной точки до средней точки, определяемой для всей группы сигналов от каждого источника;

$\bar{X}, \bar{Y}, \bar{R}$ – соответствующие средние значения, для каждой группы сигналов, т. е. источника.

Результаты расчета приведены в таблице 2.3. Сравнительный анализ результатов показывает уменьшение разброса точек локации источников сигналов АЭ при использовании вейвлет-фильтрации. Это свидетельствует о повышении точности определения координат.

Таблица 2.3 – Среднеквадратические отклонения σ точек локации при использовании вейвлет-фильтрации и порогового метода

Номер источника АЭ	Число сигналов источника	СКО точек локации, см		СКО точек локации, %	
		Пороговый способ	Вейвлет-фильтрация	Пороговый способ	Вейвлет-фильтрация
1	133	3,29	1,91	7,3	4,2
2	35	2,53	1,14	5,6	2,5
3	47	3,41	2,6	7,6	5,8
4	36	3,71	2,52	8,2	5,6

В процессе гидравлических испытаний сосудов (деаэраторов) применение метода АЭ имело свои особенности. Большое затухание сигналов АЭ в зоне локации, что необходимо было принимать во внимание при настройке параметров пьезоантенны. Кроме того, зарегистрированные сигналы АЭ необходимо было выделять из фонового шума.

На рисунке 2.8 показана оцифрованная форма сигнала АЭ, зарегистрированная датчиком ПАЭ 3 (рисунок 2.9). Анализ показал, что в сигналах наблюдалось две составляющие моды. Также было замечено, что сигналы АЭ, обладающие малой максимальной амплитудой, не имели значимую первую моду, которая практически целиком поглощалась фоновым шумом.

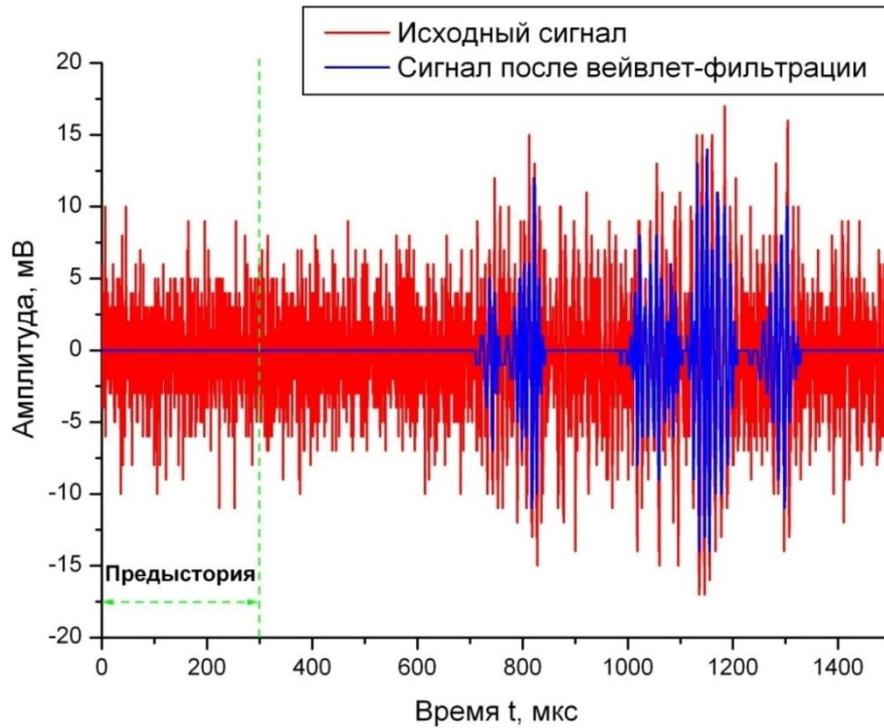
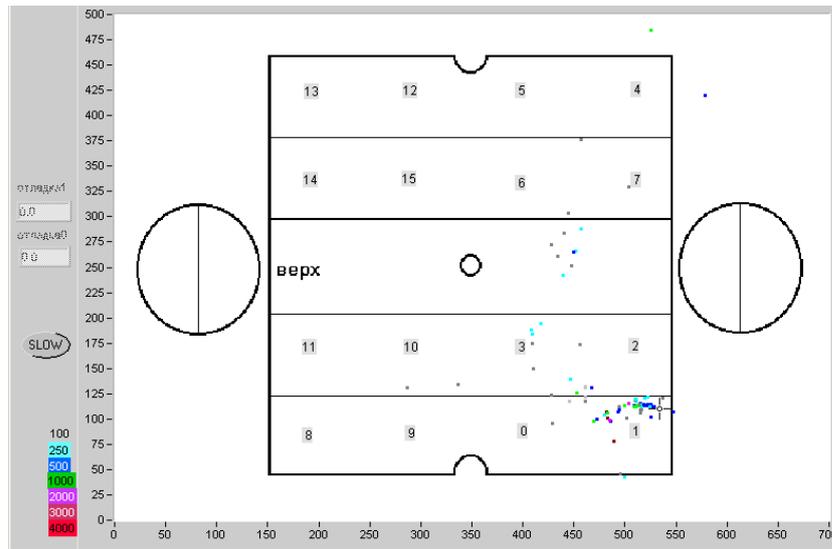


Рисунок 2.8 – Амплитудно-временное представление исходного сигнала (красный цвет) и после его вейвлет-преобразования (синий цвет)

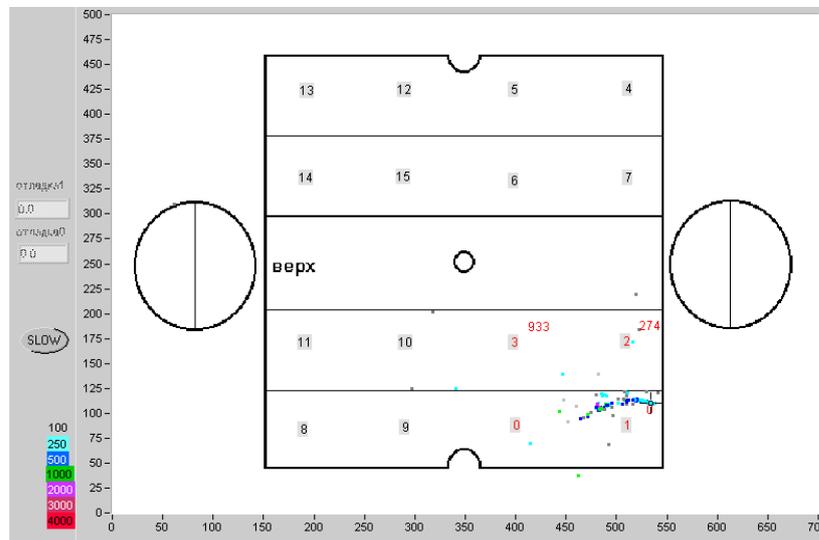
Применение порогового метода для определения времени прихода затруднено и поэтому осуществляется системой в момент, соответствующий второй моде, значительно отстающей от первой, «потерянной» в шумах канала. Поэтому для низкоамплитудных сигналов пороговый способ чреват неверным расчетом координат источников. На рисунке 2.9,а представлена исходная локация источника на горизонтальной цилиндрической емкости, где расчет точек каждого сигнала определяли пороговым способом [1, 6, 96]. Всего на емкости локализовали 102 сигнала АЭ.

Последующее использование вейвлет-фильтрации с исключением из расчетов сигналов, с малым отношением сигнал/шум, позволило скорректировать результаты локации. Разброс точек локации источника уменьшился (рисунок 2.9, б), а количество локализованных сигналов увеличилось до 195.

Таким образом, было показано, что при использовании метода АЭ шумы значительно затрудняют решение задачи определения координат дефектов. Применением обычной частотной фильтрации, реализуемой на схмотехническом уровне, сложно фильтровать шумы. Для повышения эффективности и достоверности контроля следует использовать вейвлет-фильтрацию. Такая операция производит преобразование каждого сигнала на структурном уровне и избавляет его от шумовых составляющих.



а)



б)

Рисунок 2.9 – Локация сигналов АЭ в деаэраторе пороговым способом (а) и после использования вейвлет-фильтрации (б)

2.4 Использование вейвлет-преобразования для исследования структуры сигналов акустической эмиссии

При обработке сигналов АЭ необходимо использовать их моды, так как различные моды колебаний затрудняют точное определение координат дефектов и снижают достоверность состояния ОК. Исследование структуры сигналов связано с частотно-временным анализом, который выполняется с применением вейвлет-преобразования. При этом осуществляется декомпозиция первоначальных данных о записанном сигнале по базису системы функций $\varphi_{j,n}(x), \psi_{j,n}(x)$, порожденному материнским вейвлетом $\psi(x)$ [69–71].

Существующие алгоритмы предполагают использование как непрерывного ВП (НВП), так и дискретного. Непрерывное ВП функции $f(x)$ определяем как [3, 6, 114]:

$$CWT_{\psi}[f](a,b) = (f, \psi_{a,b}) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \quad a, b \in R, a \neq 0, \quad (2.8)$$

где $\psi(x)$ – прообраз функции преобразования;

$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right)$ – масштабирование вейвлета и его смещение;

a, b – масштаб и смещение вейвлета во времени;

R – множество рациональных чисел.

Для анализа цифровой информации используют дискретный метод ВП. Он позволяет сократить количество вычислительных действий. При этом для материнского вейвлета устанавливают дополнительные условия. Наиболее часто выполняют расчет значений по формуле (2.8):

$$a = 2^{-i}, \quad \frac{b}{a} = j, \quad i, j \in Z.$$

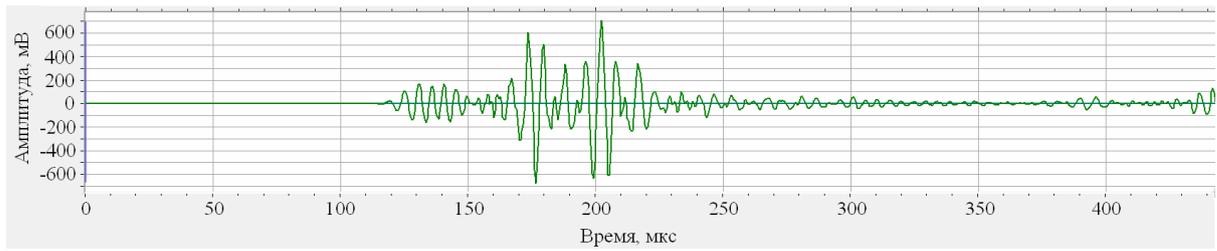
Непрерывное ВП для дискретных сигналов осуществляют при помощи вейвлет-фреймов, являющихся аналогом НВП:

$$a = 2^{-i}, \quad i \in Z, \quad b \in R.$$

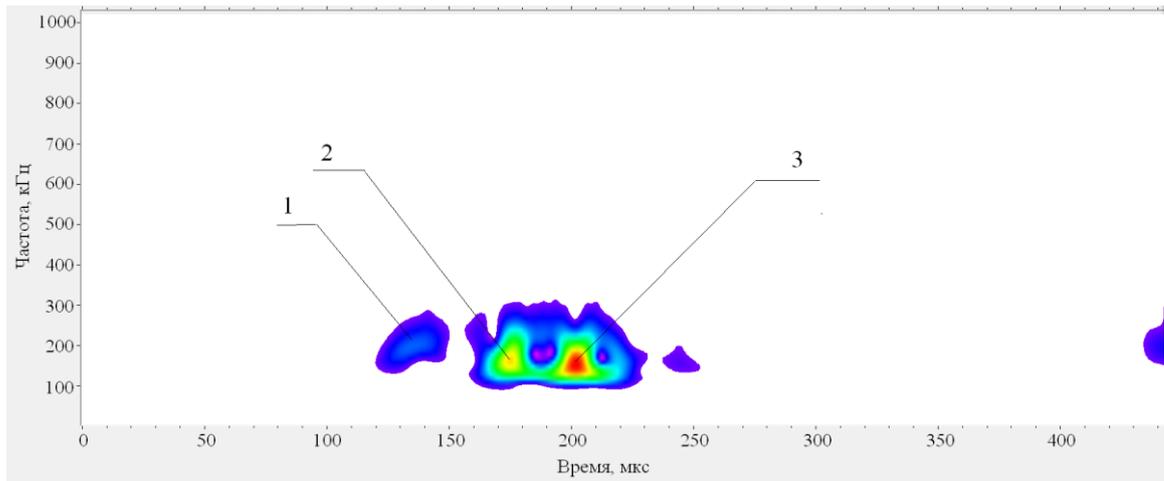
Значения масштаба a в алгоритме аналогично дискретному преобразованию, это означает, что на соседних уровнях вейвлеты масштабируются копиями друг друга. При этом для каждого a декомпозиция сигнала осуществляется по значениям b по оси времени вейвлета, аналогично случаю непрерывного ВП [3, 6].

Работоспособность алгоритма для определения времени начала сигнала на временной шкале с применением вейвлет-фильтрации проверяли с помощью имитатора на плоском стальном участке. Обработка полученных сигналов АЭ (например, изображенного на рисунке 2.10, а) получили вейвлет-скалограмму, имеющую три выраженных амплитудных экстремума (рисунок 2.10, б). Экстремум 1 на рисунке 2.10 соответствует асимметричной моде A_0 волны Лэмба, что видно при расчете расстояний при подстановке скорости этого типа волны для соответствующей толщине листа. Эта мода несет малое количество энергии и ее применение для определения начала колебаний в сигнале нежелательно. Экстремум амплитуды 2 соответствует симметричной моде S_0 волны Лэмба и имеет значительно большую величину. Поэтому для определения времени прихода данная мода была предпочтительнее симметричной моды S_0 . У экстремума 3 отмечалась максимальная амплитуда. Однако он характеризовал отраженную мед-

ленную моду A_0 и на время его прихода оказывала влияние геометрия ОК. Поэтому для определения времени прихода использование данной моды не подходило.



а)



б)

Рисунок 2.10 – Амплитудно-временное представление АЭ сигнала, принятого от имитатора на стальном листе (а) и его вейвлет-скалограмма (б)

Далее были рассчитаны РВП сигналов на акустические датчики и средняя скорость распространения. При расчетах сравнивали предлагаемую методику расчета и способ по определению СКО в «окне». В таблице 2.4 приведены промежуточные параметры расчетов и результаты определения РВП, а также погрешности измерения РВП, усредненные по 24 симитированным актам АЭ. На рисунке 2.11 представлены результаты расчетов РВП для разных точек нахождения излучающего датчика электронного имитатора.

Таблица 2.4 — Результаты расчетов РВП местонахождения излучающего датчика имитатора

Метод определения РВП	T_1 , мкс	T_3 , мкс	σ_1 , мкс	σ_3 , мкс	D , мкс	C , мм/мкс
Способ по СКО во временном окне	0,29	77,71	0,22	0,22	2,16	5,249
По локальным экстремумам	4,35	124,56	0,12	0,028	8,11	3,253

Примечание:

T_1 , T_3 – средние значения РВП; σ_1 , σ_3 – средние квадратичные отклонения РВП, вычисленные по всем положениям имитатора; D – максимальная погрешность нелинейности; C – расчетная скорость звука.

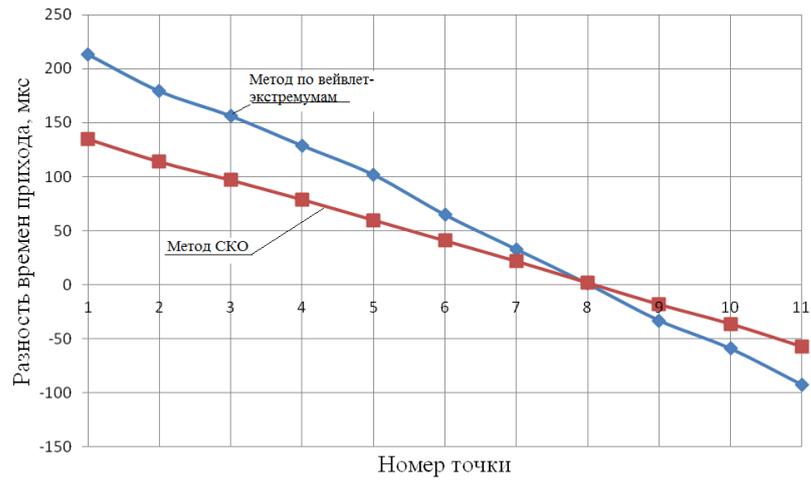


Рисунок 2.11 — Зависимость РВП, зарегистрированных между ПАЭ 1 и ПАЭ 2, от номера точки установки датчика имитатора

Аналогичный анализ был проведен при исследованиях образцов из углепластика T700. Его геометрические размеры составляли 1120×195 мм (рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 — Образец из углепластика T700 с ПАЭ для оценки точности локации

В качестве имитатора также использовался акустический преобразователь, подключенный к генератору сигналов. Этот датчик устанавливался через каждые 50 мм на площадке между ПАЭ1 и ПАЭ2. Результаты локации точек установки имитатора способом определения РВП по СКО представлены на рисунке 2.13. Как видно локация источника по длине образца достаточно точна.

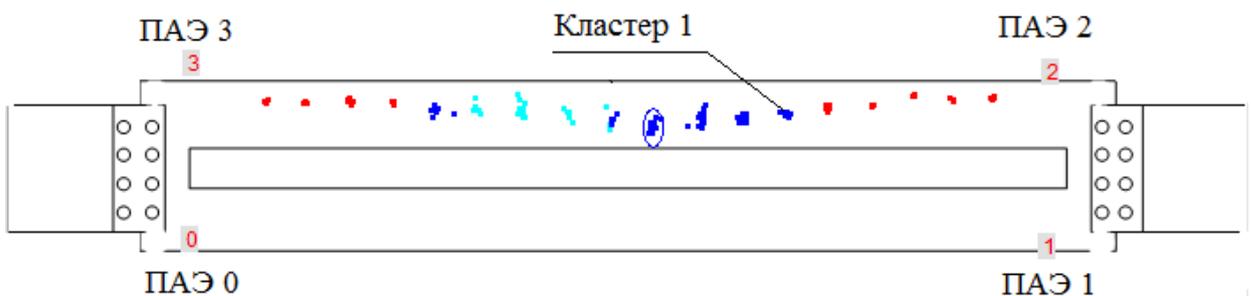
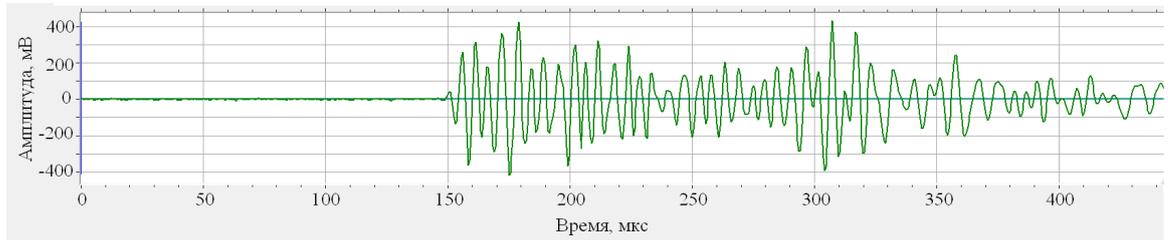
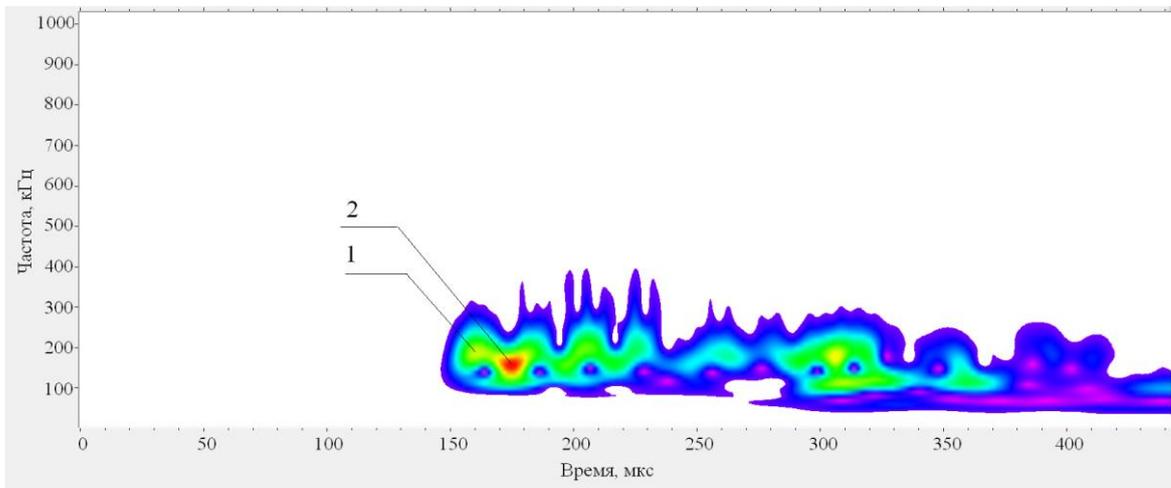


Рисунок 2.13— Визуализация локации точек установки имитатора на образце из углепластика

Для повышения точности нахождения момента времени начала сигнала для каждого ПАЭ использовали вейвлет-фильтрацию. На рисунке 2.14 приведена восстановленная форма сигнала АЭ и его вейвлет-скалограмма. Представленный сигнал записан на ПАЭ1 и идентифицирован в кластере № 1 на рисунке 2.13.



а)



б)

Рисунок 2.14 – Цифровая форма сигнала АЭ, зарегистрированного от датчика имитатора, установленного на образец из углепластика T700 (а) и его вейвлет-скалограмма (б)

На рисунке 2.14, б видно, что на вейвлет-скалограмме выделяются локальные экстремумы. В полученном модовом составе сигнала определить время начала сигналов с использованием «медленной» по времени моды было невозможно вследствие отсутствия сведений о дисперсионных кривых изменения скорости волны в слое для углепластика T700. Поэтому скорости звука, полученные экспериментально, приведены в таблице 2.5. Для анализа применялись первые по времени два экстремума. Результаты расчетов РВП по 11 измерениям в одной точке нахождения имитатора приведены в таблице 2.5. Разброс РВП, определенных по локальному экстремуму вейвлет-преобразования, меньше разброса РВП, определенных по методу СКО.

Таблица 2.5 — Расчет РВП по 11 измеренным данным в одной точке датчика имитатора

Способ определения РВП	T_1 , мкс	T_3 , мкс	σ_1 , мкс	σ_3 , мкс	D , мкс	C , мм/мкс
По СКО в «окне»	13,58	65,75	0,51	2,34	3,03	6,069
По времени начала первого экстремума вейвлет-скалограммы	39,25	64,91	0,45	0,63	10,57	6,105
По времени начала второго экстремума вейвлет-скалограммы	65,04	90,66	0,33	0,32	16,68	5,739

Зависимость РВП, рассчитанных разными методами, от номера точки нахождения ПАЭ-имитатора приведена на рисунке 2.15.

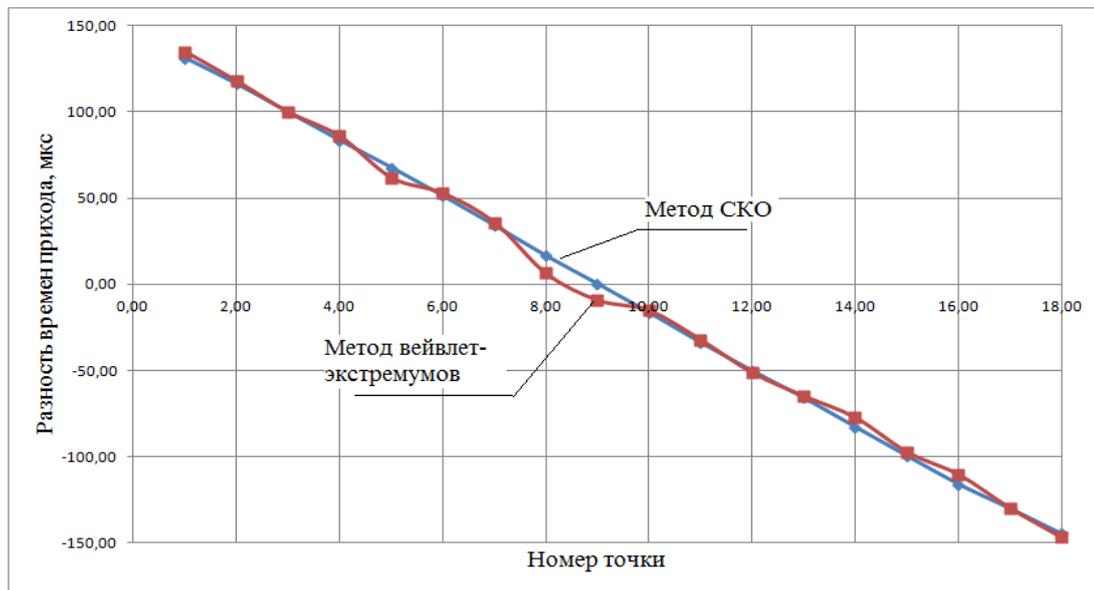


Рисунок 2.15 — Зависимость рассчитанных разными методами РВП от номера точки нахождения ПАЭ имитатора на композиционном образце

По экспериментальным результатам можно сделать следующие выводы. Определение РВП с помощью моментов времени, соответствующим локальным экстремумам на преобразованном сигнале приводит к меньшей погрешности расчета координат источника, как для композиционного образца, так и для стального листа. Однако расчет данным методом дает значительную погрешность нелинейности, что ограничивает его применение. Кроме того, при расчете времени прихода по локальным экстремумам вейвлет-преобразования имеются алгоритмические трудности.

Кроме того, при анализе АЭ-информации, зарегистрированной в процессе испытаний образцов и элементов конструкций, необходимо оценивать изменения структуры сигналов АЭ. При нагружении объектов такие исследования осуществлялись с применением коэффициента

$P_D(f)$, который можно определить из отношения максимумов вейвлет-детализации для двух мод в виде [3, 34, 87]:

$$P_D(f) = \frac{D_{A0}}{D_{S0}}, \quad (2.9)$$

где D_{A0} , D_{S0} – максимальные коэффициенты ВП, соответствующие асимметричной и симметричной модам волн Лэмба, которые определяются видом вейвлет-декомпозиции сигналов АЭ.

Апробация алгоритмов обработки и анализа АЭ-информации с применением вейвлет-преобразования осуществлялась в процессе исследований образцов из углепластика. На рисунке 2.14,а показана оцифрованная форма сигнала АЭ, зарегистрированного от датчика имитатора в образце из углепластика T700 размерами 1120x195 мм. На вейвлет-скалограмме данного сигнала (рисунок 2.14,б) видно несколько локальных экстремумов. Однако применение алгоритма по определению момента времени начала сигналов по медленной моде A_0 было затруднено из-за отсутствия сведений о дисперсионных кривых волн Лэмба в материале исследованного углепластика.

При циклических испытаниях и использовании АЭ метода автоматически записывается, систематизируется и параллельно анализируется большой поток информации. Логично предположить, что с повышением объема регистрируемых данных АЭ-системой параллельный поиск максимумов детализации D_{A0} , D_{S0} из формулы (2.9) затрудняется. При этом анализ скалограмм показывает, что, как правило, энергия сигнала АЭ находится в узкой полосе частот. Поэтому для увеличения скорости обработки сигналов АЭ без потери информативности используется быстрое вейвлет-преобразование. Оно является дискретным аналогом непрерывного ВП, но лишено избыточной информации. При этом сохраненная информация о сигнале, минимальна и достаточна для его обратного восстановления.

Реализация быстрого ВП требует минимизировать набор значений параметра b по координате времени, но число этих значений должно быть достаточным для последующего полного восстановления каждого из сигналов. Проведение дискретного ВП следует осуществлять, применяя алгоритмы, в которых в каждой вейвлет-функции используются сопряженные дискретные фильтры: $\{h_n\}$ – низкочастотный; $\{g_n\}$ – высокочастотный фильтр декомпозиции; $\{h_n^R\}$ – низкочастотный и $\{g_n^R\}$ – высокочастотный фильтры реконструкции (синтеза) со среднеквадратической нормой $1/\sqrt{2}$.

При применении быстрого ВП исходный сигнал представляется набором вейвлет-коэффициентов. Тогда проведение вейвлет-декомпозиции по базисной вейвлет-функции $\psi(x)$ по алгоритму Малла, определяет массив коэффициентов, описывающий сигнал АЭ:

$$\{A_K, D_K, D_{K-1}, \dots, D_1\},$$

где $D_j = \{d_{1j}, d_{2j}, \dots, d_{N^{(j)}, j}\} = \{d_{i,j}\}$, $0 < i < N^{(j)}$; $j \leq K$ – коэффициенты уровня разложения j ;

$N^{(j)}$ – длина вектора коэффициентов ВП уровня j ;

$A_K = \{a_{1K}, a_{2K}, \dots, a_{N^{(K)}, K}\} = \{a_{i,j}\}$ – масштабирующие коэффициенты максимального уровня декомпозиции K .

Для коэффициента K есть ограничение:

$$K \leq \log_2 N, \quad (2.10)$$

где N – частота дискретизации оцифрованного сигнала. Это ограничение отфильтровывает составляющие сигнала на низких частотах, на которых, как правило, формируется относительно высокий уровень помех.

Для K требуется ввести полосу рассматриваемых частот в диапазоне $[\omega_L, \omega_d/2]$

$$\omega_L = \omega_d / 2^{K+1};$$

где ω_L – нижняя граница выделяемой частотной полосы;

ω_d – частота дискретизации записываемых сигналов АЭ.

Вся используемая полоса частот, в пределах которой выполняется ВП, разделяется на K участков, связанных с частотным интервалом, и каждый из них соответствует определенному уровню ВП. Каждый из уровней ВП $D_j = \{d_{i,j}\}$ представляет дискретный интервал частот $[\omega_d/2^{j+1}, \omega_d/2^j]$, в котором j – индекс уровня быстрого ВП. При этом каждый интервал частот $j+1$ уменьшается относительно предыдущего в два раза, а временной интервал вейвлет-анализа соответственно увеличивается.

Восстановления сигнала, в случае необходимости такой операции, производится за счет определения максимального значения коэффициента детализации, используемого в ВП:

$$d_{\max} = \max_{i,j} \{d_{i,j}\} = d_{i_{\max}, j_{\max}}, \quad (2.11)$$

где j_{\max} – уровень вейвлет-декомпозиции, соответствующий максимуму коэффициентов вейвлет-детализации;

i_{\max} – временной индекс рассматриваемых коэффициентов.

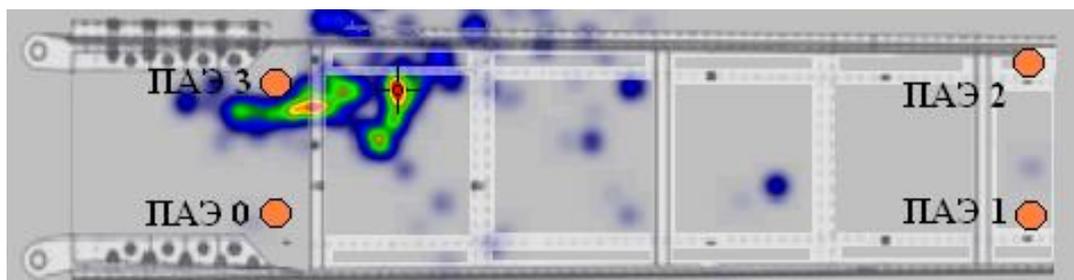
Количество коэффициентов ВП на максимальном уровне меньше размерности массива значений первичного сигнала АЭ в $2^{j_{\max}}$ раза, и это существенно сокращает время обработки

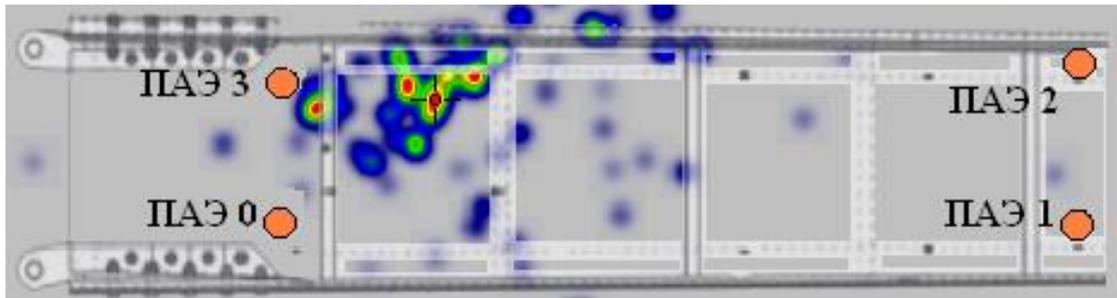
регистрируемой информации. Таким образом, применение ВП не приводит к потере информации, в том числе, шумовой составляющей, записанной в интервале времени, предшествующем собственно сигналу АЭ, пришедшему от источника. Эта шумовая составляющая канала необходима для реализации способов определения времен прихода и последующей локации источников [3, 87, 88]. Алгоритм такой обработки реализуется быстрее, чем вейвлет-фильтрация с выбором порога селекции [3].

Для повышения точности отыскания времени начала сигнала на ПАЭ целесообразно использовать быстрое ВП, что также позволяет дополнительно определять спектральные характеристики сигналов АЭ, несущих информацию об источнике. Количество сигналов, для которых таким образом определяются времена начала сигналов и, соответственно, координаты источников изменяются в зависимости от уровня декомпозиции. Результаты обработки сигналов на композиционном образце показывают, что наибольшее число сигналов АЭ (около 70,8 %) относится к третьему уровню вейвлет-декомпозиции. Это означает, что в этом интервале частот и сосредоточена энергия сигналов АЭ от искомого участка разрушения.

Определение времен начала сигнала на временной развертке канала с использованием уровней быстрого ВП с определением максимального коэффициента d_{max} было применено для локации источников АЭ в ходе прочностных испытаний композиционного переднего лонжерона крыла самолета [49]. Сначала, в процессе испытаний с помощью кластерного анализа обнаружили кластер сигналов, локализованный в области проявленного в последующем очага разрушения. В процессе испытаний лонжерона сигналы кластера последовательно фиксировали (рисунок 2.16, а).

В ходе последующих продолжающихся нагружений обнаруженная трещина росла до тех пор, пока не произошел отрыв верхней полки лонжерона от его стенки. Локация сигналов в это время от источника показана на рисунке 2.16 а, б. В момент времени, соответствующий самому отрыву, была отмечена максимальная активность источника. Наблюдаемые результаты локации источника соответствовали наблюдаемым дефектам в конструкции лонжерона и началу процесса его разрушения. С использованием быстрого вейвлет-преобразования получена распределенная локация сигналов АЭ, которая отражает процесс отрыва верхней полки лонжерона (рисунок 2.17).



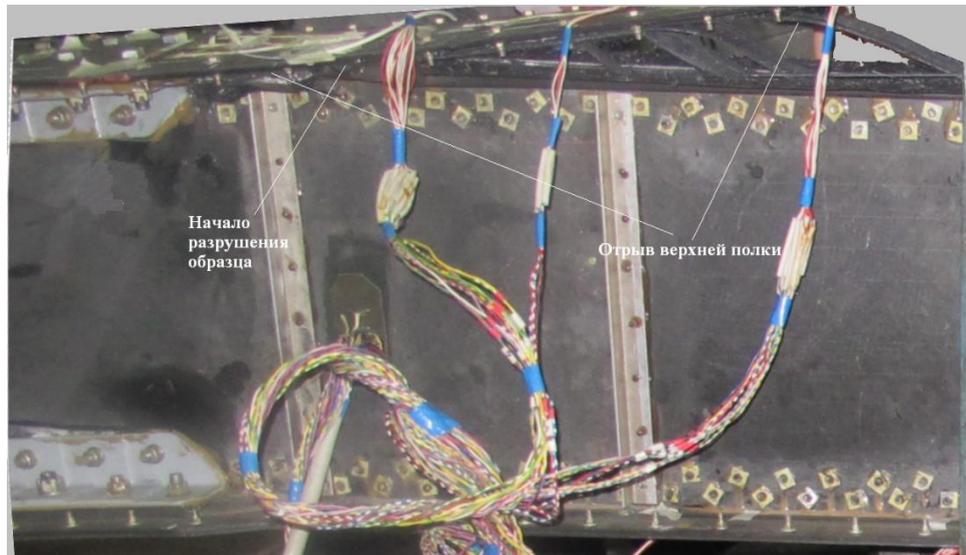


б

Рисунок 2.16 – Локационные картины полученных сигналов АЭ из очага разрушения лонжерона самолета: *а* – локация способом сравнения параметров сигнала в двух временных окнах определения времени начала сигнала АЭ; *б* – локация с применением ВП



а)



б)

Рисунок 2.17 – Лонжерон: *а* – перед нагружением; *б* – зона разрушения после окончания испытаний

Выводы по главе 2

1. Разработанная методика фильтрации сигналов АЭ на основе быстрого вейвлет-преобразования и созданное программное обеспечение использовались в процессе статических испытаний элементов авиационных конструкций. При этом осуществлялась регистрация АЭ-информации и в синхронном режиме выполнялся вейвлет-анализ сигналов АЭ. Проведен анализ влияния вейвлет-фильтрации на параметры сигналов АЭ. Показано, что при этом обеспечивается уменьшение разброса координат локации сигналов АЭ от дефектов конструкции в процессе статического нагружения. При использовании разработанного метода быстрой вейвлет-фильтрации в процессе испытаний панели самолета SSJ-100 достигнуто увеличение точности определения положения растущей трещины. Показано, что при проведении прочностных испытаний металлических и композиционных конструкций использование метода вейвлет-фильтрации позволяет осуществлять локацию сигналов АЭ с низким соотношением сигнал-шум. Получено повышение точности локации сигналов АЭ малой амплитуды, составляющих кластеры по цифровой форме.
2. Рассмотрены сигналы АЭ от источников различных типов, выполнен анализ их частотно-временной структуры с использованием непрерывного и дискретного вейвлет-преобразования. Для качественного представления результатов вейвлет-декомпозиции и локализованного источника АЭ надежно зарекомендовали себя вейвлет-скалограммы сигналов. Визуализация сигналов АЭ в виде нескольких значимых мод по энергии выполнялось с использованием синхронизированного с процессом их регистрации разработанного метода расчета структурного коэффициента сигналов АЭ и быстрого вейвлет-преобразования,. Предложен способ выделения начального момента прихода сигнала АЭ на ПАЭ по цифровой форме, восстанавливаемой с использованием единственного уровня вейвлет-преобразования.

3 РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ СИГНАЛОВ, СНИЖАЮЩИХ ПОГРЕШНОСТЬ ЛОКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ

3.1. Анализ влияния скорости волн и времени регистрации сигналов на приемниках на параметры локации источников акустической эмиссии

Важной задачей АЭ-контроля является оценка опасности дефектов, которые выявляются в процессе испытаний или эксплуатации. Для этого анализируются несущие информацию характеристики сигналов АЭ (энергия, амплитуда, скорость нарастания переднего фронта и т. п.) [2, 6, 30]. При этом для постановки диагноза необходимо знать координаты источника. Локация сигналов АЭ осуществляется пьезоантенной, которая устанавливается в зоне контроля и состоит из набора ПАЭ. При реализации локации источников на плоскости используют антенну с не менее, чем тремя приемными ПАЭ, максимальная дистанция между которыми определяется ослаблением ультразвуковых волн в материале ОК.

Расчет координат каждого из источников реализуется с учетом зафиксированных РВП между ПАЭ пьезоантенны [1, 3, 6, 96]. На схемотехническом уровне время прихода сигнала АЭ соответствует времени срабатывания компаратора измерительного канала диагностической АЭ-системы. Измерение времени содержит погрешность ΔT .

Локация источника в пределах антенны на плоском объекте, заключается в расчете времени произошедшего события и координат источника каждого акта АЭ по трем сигналам с трех приемников, решая систему уравнений [30]:

$$\begin{cases} c^2 T_c^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2; \\ c^2 (T_c + T_1)^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2; \\ c^2 (T_c + T_2)^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2, \end{cases} \quad (3.1)$$

где x, y – неизвестные координаты источника сигналов АЭ;

x_i, y_i – плоскостные координаты i -го ПАЭ;

T_c – время прохождения волнового пакета сигнала до момента его регистрации первым принявшим ПАЭ;

T_1, T_2 – РВП между первым зарегистрировавшим сигнал ПАЭ и двумя ПАЭ, принявшими сигнал позже в пределах времени пробега волны в зоне ограниченной этими приемниками;

c – скорость ультразвуковой волны в ОК.

Видно, что погрешность расчета координат источников определяется погрешностью определения скорости звука при калибровке Δc и РВП ΔT_i сигналов АЭ, регистрируемых датчиками пьезоантенны [7]. Оценка суммарной методической погрешности расчета координат находится суммированием этих видов погрешностей:

$$\begin{aligned}\Delta_x &= \Delta_x(\Delta_c) + \Delta_x(\Delta_{T_1}\Delta_{T_2}); \\ \Delta_y &= \Delta_y(\Delta_c) + \Delta_y(\Delta_{T_1}\Delta_{T_2}),\end{aligned}\quad (3.2)$$

где $\Delta_x(\Delta_c) = \frac{\partial x}{\partial c}\Delta_c$, $\Delta_y(\Delta_c) = \frac{\partial y}{\partial c}\Delta_c$ – погрешности локации координат дефекта по осям X, Y в зависимости от погрешности скорости звука;

$$\Delta_x(\Delta_{T_1}) = \frac{\partial x}{\partial T_1}\Delta_{T_1}, \quad \Delta_x(\Delta_{T_2}) = \frac{\partial x}{\partial T_2}\Delta_{T_2}, \quad \Delta_y(\Delta_{T_1}) = \frac{\partial y}{\partial T_1}\Delta_{T_1}, \quad \Delta_y(\Delta_{T_2}) = \frac{\partial y}{\partial T_2}\Delta_{T_2} \quad - \text{ погрешности локации координат дефекта.}$$

При расчете частных производных система уравнений (3.1) представляется как система трех неявных функций $x(Z)$, $y(Z)$, $T_c(Z)$. В качестве аргументов этих функций выбираются координаты ПАЭ, значения РВП сигналов АЭ на датчики пьезоантенны и скорость звука c :

$$Z = \{c, x_1, x_2, y_1, y_2, T_1, T_2\}.$$

После преобразований вклад погрешности определения скорости ультразвуковой волны Δc в суммарную погрешность при локации источников (Δ_x ; Δ_y) имеет вид:

$$\begin{aligned}\Delta_x(\Delta_c) &= \frac{\partial x}{\partial c}\Delta_c = -2c\Delta_c(A_2 + T_c A_3) - c^2\Delta_c \frac{\partial T_c}{\partial c} A_3 \\ \Delta_y(\Delta_c) &= \frac{\partial y}{\partial c}\Delta_c = -2c\Delta_c(B_2 + T_c B_3) - c^2\Delta_c \frac{\partial T_c}{\partial c} B_3\end{aligned}\quad (3.3)$$

где

$$\begin{aligned}A_1 &= \frac{x_1}{2}; \quad A_2 = \frac{T_1^2}{2x_1}; \quad A_3 = \frac{T_1}{x_1}; \\ B_1 &= \frac{y_2}{2} + \frac{x_2^2}{2y_2} - \frac{x_1 x_2}{2y_2}; \quad B_2 = \frac{T_2^2}{2y_2} - \frac{x_2 T_1^2}{2y_2 x_1}; \quad B_3 = \frac{T_2}{y_2} - \frac{T_1 x_2}{x_1 y_2}\end{aligned}$$

Частная производная $\frac{\partial T_c}{\partial c}$ рассчитывается из (3.1) [6, 48]:

$$K_2 T_c^2 - 2K_1 T_c + K_0 = 0, \quad (3.4)$$

где

$$\begin{aligned}K_0 &= A_1^2 + B_1^2 - 2c^2(A_1 A_2 + B_1 B_2) + c^4(A_2^2 + B_2^2); \\ K_1 &= c^2(A_1 A_3 + B_1 B_3) - c^4(A_2 A_3 + B_2 B_3); \\ K_2 &= c^4(A_2^2 + B_2^2) - c^2.\end{aligned}$$

Полученные уравнения показывают, что погрешность локации каждого источника сигналов АЭ имеет линейную зависимость от Δc . Коэффициент пропорциональности этой связи в свою очередь обуславливается местоположением источника в конфигурации пьезоантенны и значением c .

Доля погрешности, связанная с неточностью определения РВП ΔT_1 , ΔT_2 , определяется как:

$$\begin{aligned}\Delta_x(\Delta T_1, \Delta T_2) &= \Delta_x(\Delta T_1) + \Delta_x(\Delta T_2) = -A_4 \Delta T_1 (T_c + T_1) - T_1 A_4 \left(\frac{\partial T_c}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial T_c}{\partial T_2} \Delta T_2 \right) \\ \Delta_y(\Delta T_1, \Delta T_2) &= \Delta_y(\Delta T_1) + \Delta_y(\Delta T_2) = \\ &= -(T_1 + T_c) B_4 B_5 \Delta T_1 - (T_2 + T_c) B_4 \Delta T_2 - (T_1 B_4 B_5 + T_2 B_4) \left(\frac{\partial T_c}{\partial T_1} \Delta T_1 + \frac{\partial T_c}{\partial T_2} \Delta T_2 \right).\end{aligned}\quad (3.5)$$

Коэффициенты $A_4 = \frac{c^2}{x_1}$; $B_4 = \frac{c^2}{y_2}$; $B_5 = -\frac{x_2}{x_1}$ определяются положением ПАЭ и значениями РВП T_1, T_2 . Частные производные $\frac{\partial T_c}{\partial T_1}$, $\frac{\partial T_c}{\partial T_2}$ определяются при дифференцировании уравнения (3.4). Коэффициенты K_0 , K_1 и K_2 уравнения (3.4) записываются в виде:

$$\begin{aligned}K_0 &= \dot{A}_1^2 + \hat{A}_1^2 + \dot{O}_1^4 \frac{\dot{A}_4^2}{4} - \dot{O}_1^2 \dot{A}_1 \dot{A}_4 + T_1^4 \frac{B_4^2 B_5^2}{4} + T_2^4 \frac{B_4^2}{4} - T_1^2 B_1 B_4 B_5 - T_2^2 B_1 B_4 + T_1^2 T_2^2 \frac{B_4^2 B_5}{2} \\ K_1 &= \dot{O}_1 \dot{A}_1 \dot{A}_4 - T_1^3 \frac{A_4^2}{2} + T_1 \hat{A}_1 \hat{A}_4 \hat{A}_5 + T_2 B_1 B_4 - T_1^3 \frac{B_4^2 B_5^2}{2} - T_1 T_2^2 \frac{B_4^2 B_5}{2} - T_1^2 T_2 \frac{B_4^2 B_5}{2} - T_2^3 \frac{B_4^2}{2} \\ K_2 &= T_1^2 A_4^2 + T_1^2 B_4^2 B_5^2 + T_2^2 B_4^2 + 2T_1 T_2 B_4^2 B_5 - c^2.\end{aligned}$$

При оценке вклада ΔC в погрешность плоскостных координат дефекта Δx , Δy удобно трансформировать параметры как:

$$k_x^{(c)} = \frac{\partial x}{\partial c}; \quad k_y^{(c)} = \frac{\partial y}{\partial c}; \quad k_{xy}^{(c)} = \sqrt{(k_x^{(c)})^2 + (k_y^{(c)})^2}.\quad (3.6)$$

Тогда формулы (3.3) переписываем в виде:

$$\begin{aligned}\Delta_x &= k_x^{(c)} \Delta_c; \\ \Delta_y &= k_y^{(c)} \Delta_c = \frac{k_y^{(c)}}{k_x^{(c)}} \Delta_x,\end{aligned}\quad (3.7)$$

где $k_x^{(c)} = -2c(A_2 + T_c A_3) - c^2 \frac{\partial T_c}{\partial c} A_3$; $k_y^{(c)} = -2c(B_2 + T_c B_3) - c^2 \frac{\partial T_c}{\partial c} B_3$.

Абсолютная погрешность $R_{xy}^{(c)}$ для источника сигналов АЭ (с учетом вклада только Δc) записывается как:

$$R_{xy}^{(c)} = \sqrt{\Delta_x^2(\Delta_c) + \Delta_y^2(\Delta_c)} = |\Delta_c| \cdot \sqrt{(k_x^{(c)})^2 + (k_y^{(c)})^2} = |\Delta_c| \cdot k_{xy}^{(c)},\quad (3.8)$$

т.е. величина ошибки локации прямо пропорциональна коэффициенту $k_{xy}^{(c)}$.

На рисунке 3.1 для прямоугольной (а) и трапециевидальной (б) пьезоантенн показаны зависимости коэффициента $k_{xy}^{(c)}$ от положения источника сигналов АЭ. Минимальное значение погрешности локации источников сигналов АЭ наблюдается в центре зоны контроля. При этом для квадратной пьезоантенны полученная зависимость симметрична линии, проходящей от точки установки первого принявшего сигнал АЭ датчика к центру зоны. На этой линии значения коэффициентов по каждой координате равны [47].

В зависимости от выбора способа определения времени начала сигнала вклад погрешности расчета РВП ΔT_i будет различным. Величины погрешностей $\Delta T_1, \Delta T_2$ можно оценивать исходя из вида фронта нарастания сигналов. Если величина аргумента зафиксирована, то вид зависимости вклада слагаемых $\Delta x(\Delta T_1, \Delta T_2), \Delta y(\Delta T_1, \Delta T_2)$ из формулы (3.5) в общую величину погрешности определения координат для квадратной антенны из трех ПАЭ будет выглядеть так, как представлено на рисунке 3.1, а.

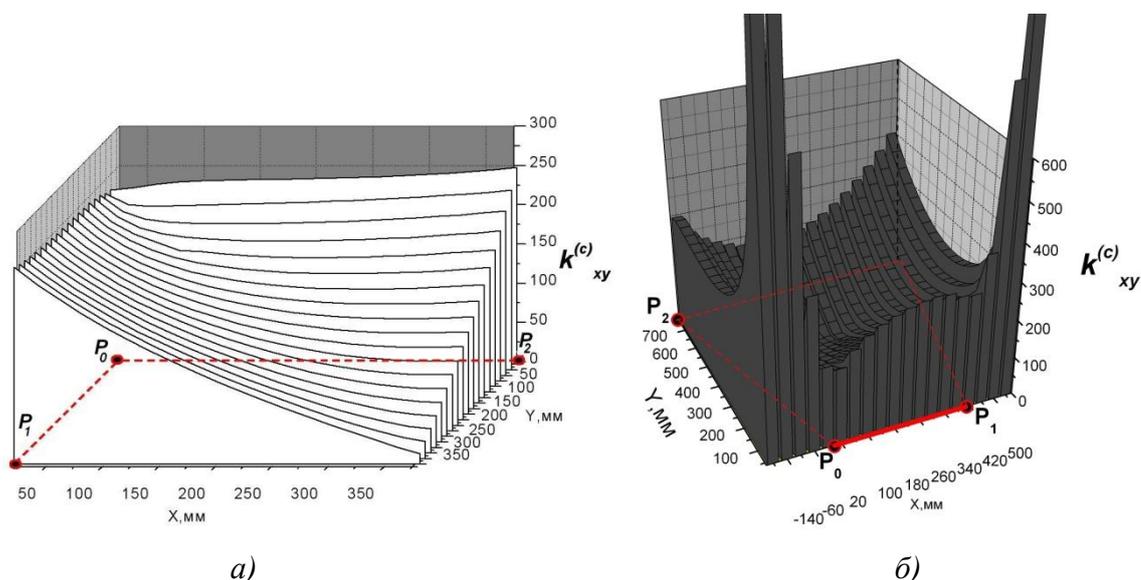
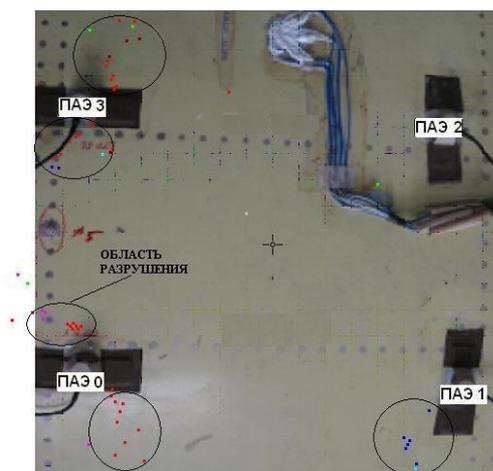


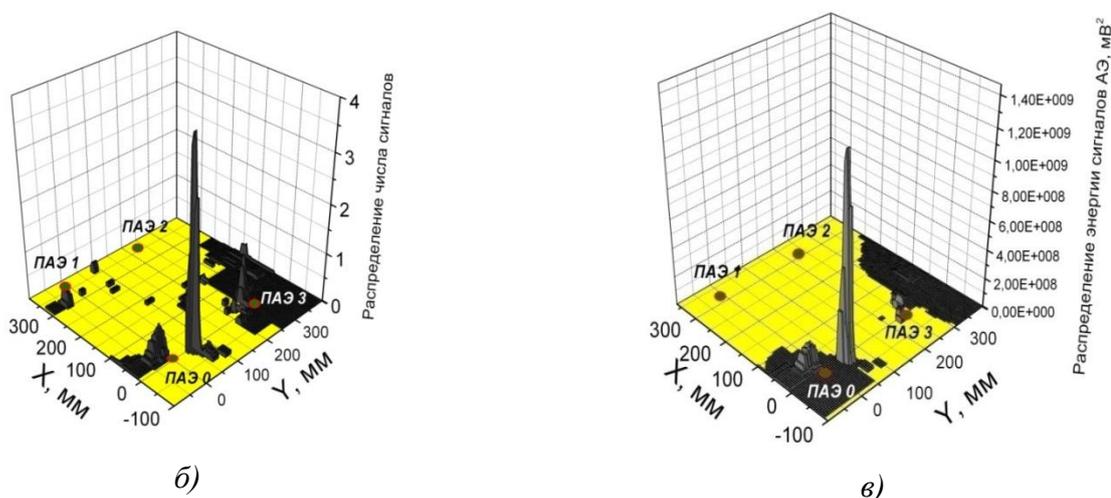
Рисунок 3.1 – Зависимость абсолютного отклонения скорости ультразвуковой волны при квадратной (а) и трапециевидальной (б) форме пьезоантенны

Проанализированы результаты АЭ-контроля, полученные при испытаниях панели самолета «SSJ-100». Если полученные координаты сигналов АЭ были пересчитаны с учетом погрешностей скорости звука Δc и РВП $\Delta T_1, \Delta T_2$ и построена трехмерная картина распределения источников (рисунке 3.1, б). По сути приведенные на рисунке 3.2 данные отображают взвешенное количество сигналов АЭ в каждой ячейке сетки S . Таким образом, учет погрешности используемого значения скорости ультразвуковых волн Δc и РВП $\Delta T_1, \Delta T_2$ позволил получить более точную картину расположения дефектов.

При оценке степени опасности более информативным графиком является трехмерное распределение энергии сигналов АЭ (рисунок 3.2, в).



а)



б)

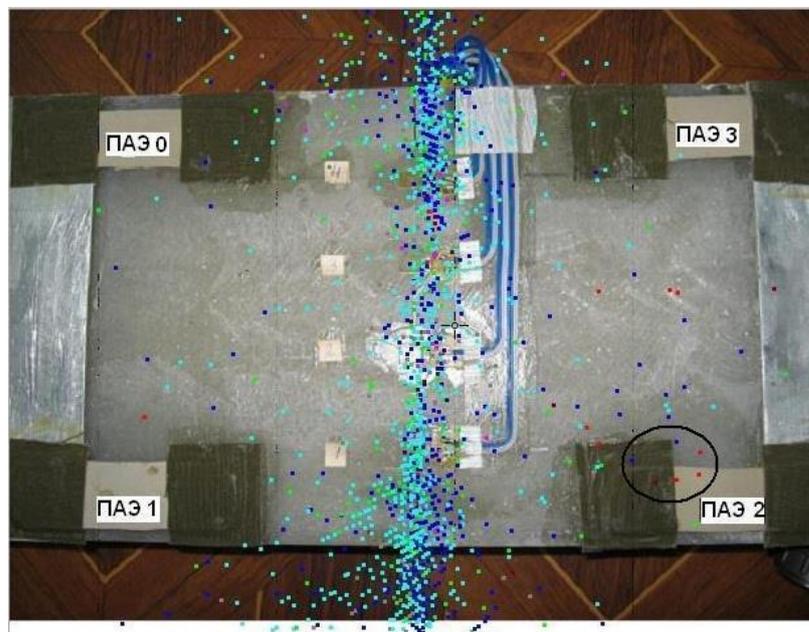
в)

Рисунок 3.2 – Плоскостная картина (а) локации сигналов АЭ на авиационной панели самолета «SSJ-100»; б – локация с учетом погрешностей определения скорости звука и РВП; в – распределение энергии с учетом погрешностей определения скорости звука и РВП

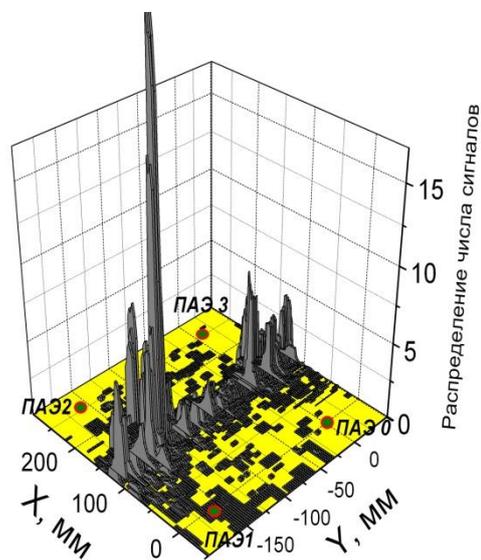
Далее были рассмотрены результаты, полученные при циклических испытаниях композиционного образца, в основе которого было стекловолокно [41]. Выполнялось нагружение с частотой равной $f = 5$ Гц, при этом нагрузка изменялась в интервале $P = (6...7) \cdot 10$ кН, а значения напряжений составили $\sigma = 20$ Н/мм². Представленный образец разрушился после приложения к нему $N = 147,75 \cdot 10^3$ циклов. При нагружении была получена картина локации источников АЭ, приведенная на рисунке 3.3, а, которая показала с достаточно высокой точностью местоположение участка последующего разрушения.

Затем, применение алгоритма коррекции с учетом погрешности по скорости ультразвука Δc и РВП ΔT_1 , ΔT_2 локализованные сигналы были представлены в виде трехмерной локации (рисунке 3.3, б) и выполнено построение трехмерного распределения энергии в области, огра-

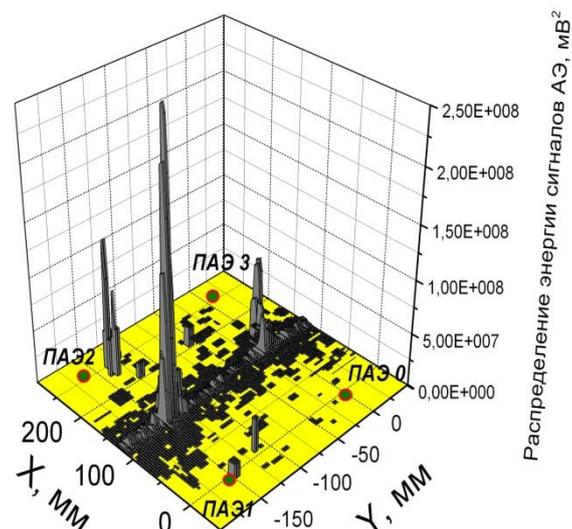
ниченной пьезоантенной (рисунке 3.3, *в*). Отмечалось, что учет погрешности, связанный с непостоянством скорости звука Δc и РВП ΔT_1 , ΔT_2 позволяет исключить из общей картины сигналы, локализованные при нагружении. Кроме того, получена более объективная картина координат источников разрушения материала. Трехмерное изображение распределения по накопленной энергии сигналов АЭ позволило наглядно оценить степень их опасности.



а)



б)



в)

Рисунок 3.3 – Визуализация картины (*а*) локации источников на плоском композитном образце; *б* – локация числа сигналов на плоскости с учетом неопределенности скорости ультразвука и РВП; *в* – локационная картина распределения энергии АЭ на плоскости с учетом неопределенности скорости ультразвука и РВП

3.2 Совершенствование табличного метода локации источников в процессе нагружения образцов из углепластика

Контроль изделий из волокнистых композитов с применением метода АЭ осложняется зависимостью скорости УЗ-волны от направления ее прихода. Если форма зоны контроля дополнительно усложнена наличием одного или нескольких концентраторов, траектория распространения УЗ-волны от источника до одного или нескольких ПАЭ отклоняется от условной прямой.

Решение данной проблемы связано с определением вероятных траекторий распространения звука в неоднородных средах. Методики полного расчета трудоемки, сложны и для практического применения нецелесообразны. В условиях проведения испытаний более удобным является использование табличного метода локации источников сигналов АЭ, модифицированного с учетом анизотропии скорости звука и нелинейности его распространения.

Перед испытаниями объект разбивают на N зон. Увеличение числа таких зон дает возможность осуществлять локацию сигнала АЭ более точно. Затем на ОК размещают пезоантенну и проводят калибровку. РВП для локационной таблицы задают исходя из результатов предварительной калибровки. При использовании табличного метода для зоны контроля, ограниченной четырьмя ПАЭ, вычисляется матрица соответствия РВП сигналов АЭ координатам ячеек зоны контроля:

$$T = \begin{pmatrix} \bar{t}_{X1,Y1} & \bar{t}_{X1,Y2} & \cdots & \bar{t}_{X1,Ym} \\ \bar{t}_{X2,Y1} & \bar{t}_{X2,Y2} & \cdots & \bar{t}_{X2,Ym} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots \\ \bar{t}_{Xn,Y1} & \bar{t}_{Xn,Y2} & \cdots & \bar{t}_{Xn,Ym} \end{pmatrix}, \quad (3.9)$$

где n – количество столбцов в таблице;

m – количество строк таблицы;

$x_1 \dots x_n$ – координаты x ячеек зоны контроля, соответствующих столбцам таблицы;

$y_1 \dots y_m$ – координаты y ячеек, соответствующих строкам таблицы;

\bar{t}_{x_k, y_l} – элемент таблицы.

Количество строк и столбцов таблицы выбирается из соотношений

$$n < \frac{y_n}{v_x \Delta_t};$$

$$m < \frac{x_n}{v_y \Delta_t},$$

где v_x, v_y – скорости распространения звука в направлении координатных осей X, Y для зоны контроля;

Δ_t – интервал дискретизации измерения времени прихода сигнала на датчик пьезоантенны.

Элемент $\bar{t}_{Xi,Yj}$ матрицы представляет собой набор РВП $(t_0^{(i,j)}, t_1^{(i,j)}, t_2^{(i,j)}, t_3^{(i,j)})$ для четырех ПАЭ (0...3) пьезоантенны. Локация зарегистрированного сигнала АЭ осуществлялась за счет подбора соответствующего ему набора РВП в таблице формулы (3.9) [13]. При этом рассчитываются величины вида:

$$\Delta_t^S = \min_{\substack{i=1\dots n \\ j=1\dots m}} \rho(\bar{t}_{Xi,Yj}, \bar{t}_S) \quad (3.10)$$

$$\rho(\bar{t}_{Xi,Yj}, \bar{t}_S) = \max_{p=0\dots 3} |t_p^{(i,j)} - t_p^S|,$$

где $\bar{t}_S = (t_0^S, t_1^S, t_2^S, t_3^S)$ – РВП сигнала АЭ на четыре ПАЭ;

$\rho(\bar{t}_{Xi,Yj}, \bar{t}_S)$ – отклонение РВП сигнала от РВП ячейки зоны контроля $\bar{t}_{Xi,Yj}$ матрицы из формулы (3.11);

Δ_t^S – погрешность локации сигнала АЭ, полученная табличным методом в единицах РВП;

t_p^S – РВП сигнала для ПАЭ с номером p .

Для расчета матрицы из формулы (3.9) проводилась калибровка. Калибровочные точки выбирались из соображений оптимального охвата площади зоны контроля для всех ПАЭ и направлений распространения звука по возможности минимальным числом точек (рисунок 3.4 а). При этом необходимо также рассчитать скорости распространения звука в различных направлениях и построить годограф, для чего вблизи одного из ПАЭ вводятся дополнительные калибровочные точки (рисунок 3.4 а, б). Координаты калибровочных точек обозначаются как $\{X_k, Y_k\}_k, k \leq M$, где k – индекс; M – количество точек.

По итогам калибровки оценивается степень анизотропии. Для этого по временам прихода сигналов имитатора на датчики пьезоантенны строится годограф скорости в виде эллиптического приближения (рисунок 3.4 б).

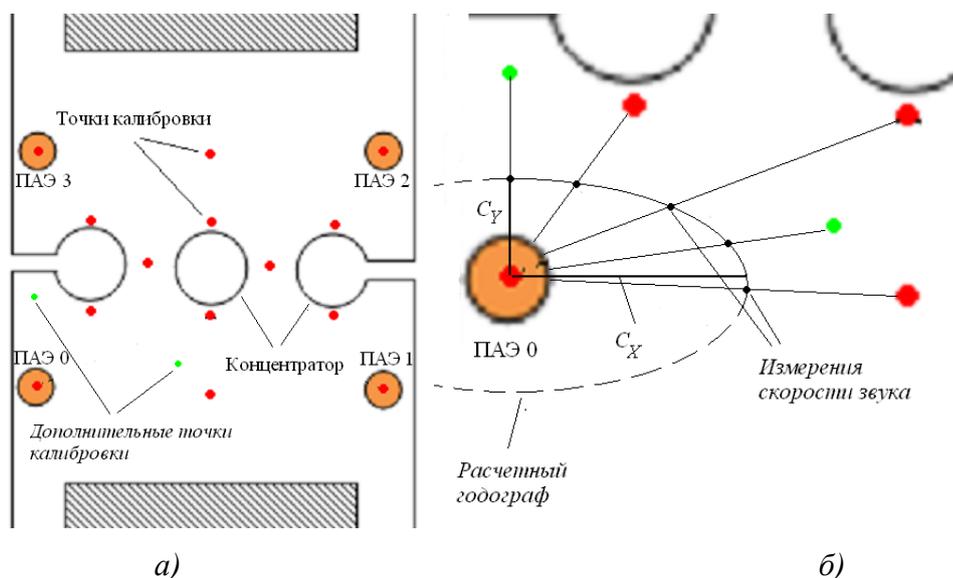


Рисунок 3.4 – Калибровка образца из КМ: *а* – выбор точек калибровки; *б* – построение годографа скоростей

Для учета анизотропности скорости распространения звука необходимо вычислить предварительные (промежуточные) наборы РВП \tilde{t}_{X_i, Y_j} , по которым далее будут вычислены элементы матрицы соответствия (формула 3.9). Формулы для расчета предварительного набора $\tilde{t}_{X_i, Y_j} = (t_0^T, t_1^T, t_2^T, t_3^T)$, используемого в дальнейших расчетах и соответствующего области на ОК с центром в точке $A_{i,j}$ (рисунок 3.5) с координатами $\{X_i, Y_j\}$, принимают вид [22]:

$$t_k^T = (\{t_k^T\}' - \min_l \{t_l^T\}')$$

$$\{t_k^T\}' = \frac{R(X_i, Y_i, X_k^D, Y_k^D)}{\sqrt{[C_X \cos(\theta_k(X_i, Y_j))]^2 + [C_Y \sin(\theta_k(X_i, Y_j))]^2}}, \quad (3.11)$$

где $\{t_k^T\}'$ – время распространения сигнала АЭ от точки $A_{i,j}$ до ПАЭ с индексом k и координатами (X_k^D, Y_k^D) ;

$R(X_i, Y_i, X_k^D, Y_k^D)$ – расстояние от точки $A_{i,j}$ до ПАЭ с индексом k ;

$\theta_k(X_i, Y_j)$ – угол между направлением от точки $A_{i,j}$ на ПАЭ с индексом k и направлением большей оси эллипса диаграммы изменения скорости звука (рисунок 3.4 б);

C_X, C_Y – коэффициенты скорости распространения УЗ-волны в материале в направлениях, параллельных осям эллипса, то есть в направлении максимальной и минимальной скорости звука, соответственно;

$\tilde{t}_{Xi,Yj}$ - промежуточное расчетное значение набора РВП $\bar{t}_{Xi,Yj}$ матрицы формулы (3.9), вычисленное с учетом анизотропии скорости звука, но без учета конфигурации ОК.

Из-за сложной конфигурации исследуемого объекта РВП точек калибровки будет отличаться от рассчитанных для соответствующих им элементов таблицы формулы (3.9). Обозначим величину этого отклонения как $\bar{\Delta}_k = \{\Delta_0^{(k)}, \Delta_1^{(k)}, \Delta_2^{(k)}, \Delta_3^{(k)}\}$ по каждому из четырех ПАЭ:

$$\Delta_p^{(k)} = T_p^{(k)} - \tilde{t}_p^{(i_k, j_k)},$$

где $T_p^{(k)}$ – РВП калибровочного сигнала с номером k на датчик пьезоантенны с номером p ;

$\tilde{t}_p^{(i_k, j_k)}$ – соответствующий элемент набора РВП, вычисленного из формулы (3.11).

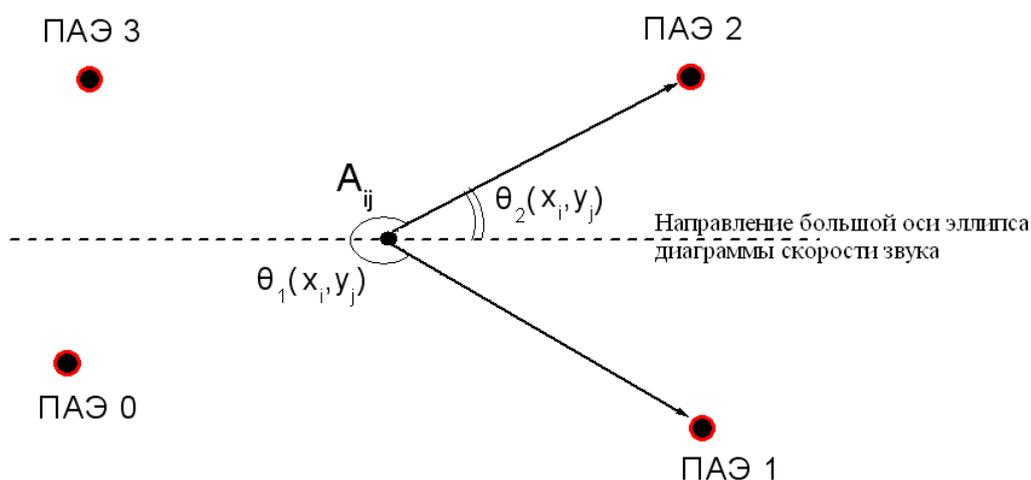


Рисунок 3.5– Расчет угла направления распространения УЗ-волны на ПАЭ для элемента матрицы соответствия

Для учета непрямолинейного распространения звука, возникающего вследствие наличия на ОК концентраторов сложной формы, для каждого элемента таблицы формулы (3.9) вводится аддитивный векторный коэффициент $\bar{\delta}_{i,j}$:

$$\bar{t}_{Xi,Yj} = \tilde{t}_{Xi,Yj} + \bar{\delta}_{i,j}. \quad (3.12)$$

Окончательное значение элемента таблицы из формулы (3.11) получается путем добавки слагаемого из формулы (3.12), компенсирующего непрямолинейное распространение звуковой волны. Элемент $\bar{\delta}_{i,j}$ таблицы представляет собой набор добавок к РВП $(\delta_0^{(i,j)}, \delta_1^{(i,j)}, \delta_2^{(i,j)}, \delta_3^{(i,j)})$ для четырех ПАЭ (0...3) пьезоантенны.

Рассмотрим метод вычисления элемента $\delta_0^{(i,j)}$ аддитивного векторного коэффициента $\bar{\delta}_{i,j}$ для произвольной текущей ячейки (рисунок 3.6) зоны контроля. Далее обозначим ее координаты через X_T, Y_T , а номер ячейки в матрице формулы (3.9) – через (i_T, j_T) соответственно. При этом базовым датчиком является ПАЭ 0 (рисунок 3.5). Расчет соответствующих элементов $\delta_1^{(i,j)}, \delta_2^{(i,j)}, \delta_3^{(i,j)}$ аддитивного векторного коэффициента $\bar{\delta}_{i,j}$ проводится с учетом изменения номера базового ПАЭ.

Для расчета элемента $\delta_0^{(i_T, j_T)}$ для зоны контроля вводится полярная система координат (ρ, φ) с центром на позиции ПАЭ0. Для каждого элемента таблицы формулы (3.9) рассчитываются полярные координаты ячейки зоны контроля (ρ_i, φ_j) , соответствующие декартовым координатам X_i, Y_j . Также вычисляются полярные координаты калибровочных точек $\{\rho_k, \varphi_k\}_k$.

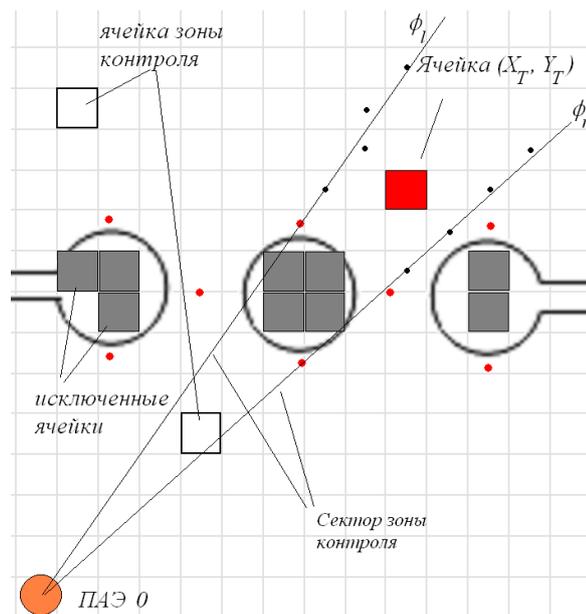


Рисунок 3.6 – Расчет элемента таблицы РВП

Далее выбираются две ближайшие калибровочные точки слева и справа для определения разницы полярного угла:

$$l = \text{index} \min_{k \leq M, \varphi_k < \varphi_T} |\varphi_T - \varphi_k|, \quad (3.13)$$

$$r = \text{index} \min_{k \leq M, \varphi_k > \varphi_T} |\varphi_T - \varphi_k|$$

где l – индекс ближайшей (по отклонению полярного угла) слева калибровочной точки к рассматриваемой ячейке зоны контроля с полярными координатами (ρ_T, φ_T) ;
 r – индекс аналогичной точки справа.

Далее необходимо проверить «условие непрерывности» концентратора на ОК между данными калибровочными точками. Концентратор сложной формы представляет собой несплошность в ОК, через которую невозможно прямое распространение акустической волны. Таким образом, в зоне контроля появляется «акустическая тень» – область, из которой прямолинейное распространение сигналов АЭ закрыто наличием концентратора. В пределах значений $\varphi_l < \varphi_j \leq \varphi_r$ не должно существовать ячейки зоны контроля с координатами (ρ_i, φ_j) , для которой линия направления на базовый датчик пьезоантенны не пересекала бы концентратор. Если такая точка находится, то она добавляется в набор калибровочных точек $\{\rho_K, \varphi_K\}_k$ в качестве дополнительной (виртуальной) точки $\{\rho_K, \varphi_K\}_{M+1}$. Для нее принимается $\bar{\Delta}_{M+1} = \{0,0,0,0\}$, поскольку «акустическая тень» для данной точки и базового датчика отсутствует. Затем число M увеличивается на единицу и процедура выбора ближайших калибровочных точек повторяется.

Для всех ячеек зоны контроля, через которые проходит прямая, соединяющая позицию базового датчика и калибровочную точку с индексом l и лежащих после создающего «акустическую тень» концентратора, величина элемента $\delta_0^{(i,j)}$ аддитивного векторного коэффициента принимается равной отклонению калибровочного РВП от расчетного значения:

$$\delta_0^{(i,j)} = \Delta_0^{(l)}. \quad (3.14)$$

Физический смысл этой поправки заключается в том, что для всех точек, лежащих на прямой, соединяющей точку калибровки и ПАЭ, величина «акустической тени» будет примерно одинаковой. Аналогично, для ячеек зоны контроля, лежащих на прямой, соединяющей позицию датчика и калибровочную точку с индексом r , запишем

$$\delta_0^{(i,j)} = \Delta_0^{(k)}. \quad (3.15)$$

Две полученные прямые ограничивают сектор зоны контроля, в котором полярные углы координат ячеек (ρ_i, φ_j) удовлетворяют неравенству

$$\varphi_l < \varphi_j \leq \varphi_r.$$

При этом величины $\delta_0^{(i,j)}$ для границ данного сектора определяются из соотношений (3.14) – (3.15). Для вычисления внутри сектора применяется сеточно-разностный метод, для которого соотношения (3.14) – (3.15) задают граничные условия. При этом величина коэффициента $\delta_0^{(i,j)}$ внутри сектора будет плавно изменяться от величины $\Delta_0^{(l)}$ к величине $\Delta_0^{(k)}$.

Чтобы рассчитать эту величину для точки (x_T, y_T) , вводится параметр s , отражающий положение данной ячейки относительно границ сектора:

$$s = \frac{\varphi_j - \varphi_l}{\varphi_r - \varphi_l}.$$

Тогда величину $\delta_0^{(i,j)}$ можно вычислить как

$$\delta_0^{(i,j)} = (\Delta_0^{(r)} - \Delta_0^{(l)})h + \Delta_0^{(l)}. \quad (3.16)$$

Вычислив аддитивный векторный коэффициент $\bar{\delta}_{i,j}$ для всех значений индексов (i,j) в пределах зоны контроля с использованием соотношений (3.14) – (3.16), по формулам (3.11), (3.12) рассчитывается таблица соответствия РВП сигналов АЭ координатам ячеек зоны контроля, учитывающая анизотропию материала ОК и его конфигурацию.

Для зон контроля малого размера табличный метод локации сигналов АЭ обладает двумя основными преимуществами перед аналитическим методом триангуляционной локации. Первым преимуществом является повышенная устойчивость табличного метода к ошибке в оценке времени прихода сигнала АЭ на один из датчиков пьезоантенны. При аналитическом (вычислительном) методе локации времена прихода сигнала на каждый датчик пьезоантенны рассматриваются независимо, и увеличение ошибки в оценке РВП неизбежно приводит к увеличению погрешности локации, а в некоторых случаях – к невозможности локации сигнала из-за отсутствия решения системы уравнений триангуляции [75, 86]. При локации сигнала АЭ табличным методом координаты его источника вычисляются методом минимизации функционала невязки:

$$\Phi_{k,l} = \sum_{i=0}^3 \frac{|s_i - t_i^{(k,l)}|}{s_i},$$

где s_i – РВП сигнала АЭ на ПАЭ с номером i и ПАЭ, принявший сигнал АЭ первым;

$t_i^{(k,l)}$ – значение РВП для ПАЭ с номером i , взятое из таблицы РВП.

Минимизация величины $\Phi_{k,l}$ достигается за счет ее вычисления для каждой ячейки зоны контроля и поиска минимального значения из вычисленных. Таким образом, при локации

табличным методом вычисленные РВП сигнала АЭ на датчики пьезоантенны учитываются одновременно, а не независимо. Поэтому ошибка оценки одного РВП не имеет такого существенного значения, как при аналитической локации. Правильный подбор табличных значений РВП позволяет локализовать большее число сигналов АЭ с большей (по сравнению с триангуляционным методом) точностью.

Выполнен сравнительный анализ порогового и табличного методов локации сигналов АЭ, зарегистрированных при статических испытаниях образцов 2 – 4 групп (таблица 3.1). В таблице 3.1 представлено число локализованных сигналов АЭ.

Анализ результатов, приведенных в таблице 3.1, показал, что число сигналов АЭ, локализованных табличным методом, выше, чем аналитическим. Другим преимуществом табличного метода при АЭ-контроле зон малых размеров является возможность более точного определения положения дефекта на локационной картине. На рисунке 3.7 показана сравнительная картина локации сигналов от концентратора напряжений табличным и аналитическим методами.

Таблица 3.1 — Сравнение числа сигналов АЭ, локализуемых аналитическим и табличным методами

Номер группы	Номер образца	Количество локализованных сигналов АЭ	
		Табличный метод	Триангуляционный метод
2	4	14689	12362
	5	13018	11034
3	1	1322	1043
	2	2075	1866
	3	8440	6627
4	1	1168	1052
	2	2989	2710
	3	1268	1125

При пороговом методе часть сигналов АЭ от отверстия на модели была расположена вне материала образца (рисунок 3.7,а). При использовании табличного метода сигналы АЭ были локализованы по кромке отверстия на модели ОК (рисунок 3.7,б), а их разброс значительно уменьшился по сравнению с результатами, полученными пороговым методом. Это позволило оценивать активность сигналов АЭ, как в области концентратора, так и в области захватов нагружающей машины *MTS-50*.

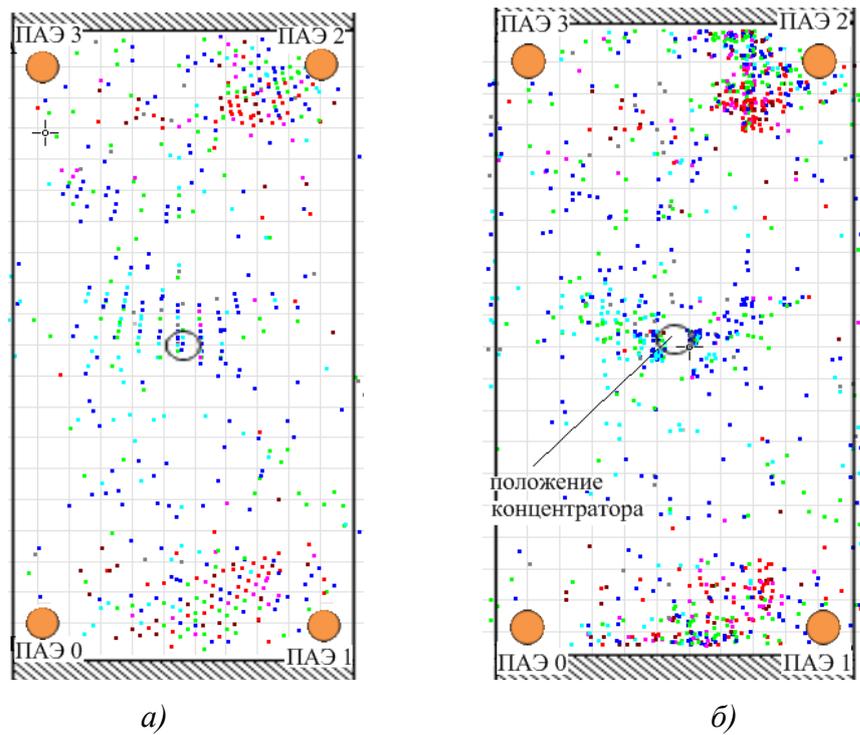


Рисунок 3.7 — Локация сигналов АЭ, зарегистрированных при испытаниях образца 1 группы 4:
а – аналитический метод локации; *б* – табличный метод локации

При контроле образца 2 группы 2 акустическая активность в центре была слабой по сравнению с активностью других частей образца (рисунок 3.8). Это соответствует тому, что концентратор напряжения не оказал существенного воздействия на механизм разрушения. При этом в области установки ПАЭ1 и ПАЭ2 выделялись участки с большим значением суммарной амплитуды (рисунок 3.8 б), что соответствовало разрушению образца.

Совершенствование табличного метода позволило повысить точность локации. Анализ полученных локационных картин, распределений суммарной амплитуды и двухинтервального коэффициента показал, что данный метод улучшает интерпретацию результатов контроля. Уменьшение разброса определенных значений координат источников дает возможность точнее устанавливать местонахождение участков с необратимыми структурными изменениями, а затем и более точно оценивать активность каждого из идентифицированных источников.

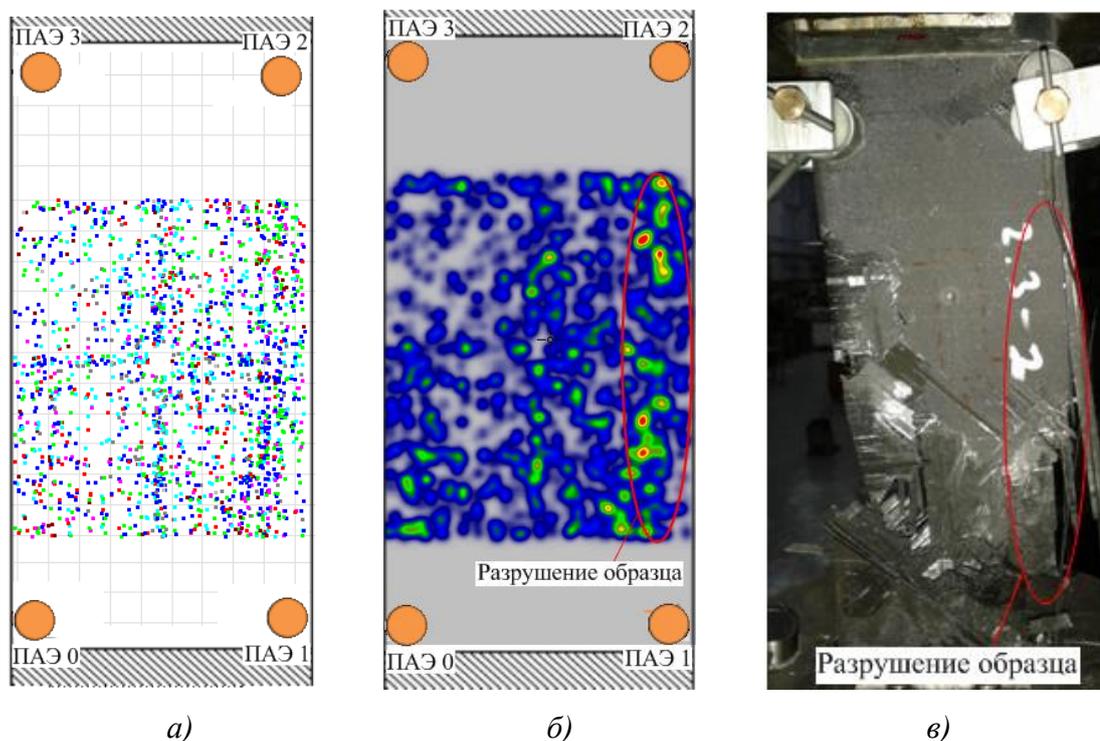


Рисунок 3.8 — Локация сигналов АЭ (а), распределение суммарной амплитуды (б) сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружения образца 2 группы 2; вид разрушенного образца 2 (в)

3.3 Классифицирование источников дискретной акустической эмиссии по параметрам кластеров

При обработке для формирования кластера в качестве объединяющего критерия применяют некоторые несущие информацию характеристики, которые характеризуют каждый сигнал АЭ. Чаще всего при анализе проводят кластеризацию по оцифрованной форме, так как форма сигнала несет в себе информацию об источнике и искажении сигнала на всем акустическом тракте до приемного ПАЭ. Кластерный анализ позволяет рассчитать максимальные коэффициенты взаимной корреляции двух сигналов $R_{i,k}$, принятых от событий в разные моменты времени на один ПАЭ, как функции по формуле [6, 7]:

$$R_{i,k} = \max_a \frac{\sum_{l=1}^N U_{m_i}^l U_k^{l+a}}{\sqrt{\sum_{l=1}^N (U_{m_i}^l)^2 \cdot \sum_{l=1}^N (U_k^{l+a})^2}},$$

где U_k^l – значение амплитуды k -того сигнала на ПАЭ;

$U_{m_i}^l$ – значение амплитуды m_i -ного сигнала на ПАЭ;

N – число точек дискретизации во временном «окне» сигналов;

a – смещение сигнала k относительно сигнала m_i .

Алгоритм кластеризации предусматривает распределение события, соответствующего сигналу k , в тот кластер i , в котором находится событие, соответствующее опорному сигналу m_i , в случае превышения $R_{i,k}$ задаваемого порогового значения, например 0,5. Такой способ разделения источников позволяет разделять даже близко расположенные источники, координаты которых могут группироваться вместе на локационной плоскости. Однако при большом объеме регистрируемой АЭ-информации обработка требует длительного времени. Поэтому для выделения наиболее опасных источников и отработки критериев их оценки корреляционный способ используется как базовый.

Для получения информации об источниках сигналов АЭ при обработке результатов испытаний образцов из углепластика *Torayca T700* выполнен кластерный анализ по оцифрованной форме. Геометрические размеры образца были равны $500 \times 100 \times 1,2$ мм, в центре было выполнено отверстие диаметром 15 мм. Нагружение образца осуществлялось ступенчато через интервал, составляющий 5 кН, на разрывной машине *MTS-50* статической растягивающей нагрузкой до величины нагрузки $P = 35$ кН.

Одной из основных целей проводимых испытаний являлось определение момента времени, при котором в материале начинают протекать активные процессы разрушения. Перед началом испытаний образец был передан на входной контроль импедансным и визуальным методами НК. При этом были отмечены небольшие растрескивания верхнего слоя образца по кромке отверстия, возникшие при высверливании концентратора напряжений.

Время нагружения образца было разделено на несколько этапов по разным типам нагружения. Первый этап нагружения образца заканчивался при нагрузке $P = 35$ кН, как только были зарегистрированы первые сигналы АЭ из зоны отверстия в центре образца. В результате проведенного импедансного и визуального контроля в образце не было обнаружено никаких дефектов.

На втором этапе образец нагружался до нагрузки $P = 60$ кН, соответствующей появлению устойчивого потока локализованных сигналов от концентратора. После снятия нагрузки на внутренней кромке отверстия было зарегистрировано расслоение. На рисунке 3.9, *а* показана локация всех сигналов АЭ на втором этапе.

Для локализованных сигналов АЭ была проведена кластеризация по их оцифрованной форме. Для кластеризации был задан пороговый коэффициент корреляции, равный 0,6. Из 488 локализованных сигналов 210 сигналов были разделены на девять кластеров. Показаны примеры кластеров 1 (рисунок 3.9, *б*) и 2 (рисунок 3.9, *в*), которые были получены после анализа.

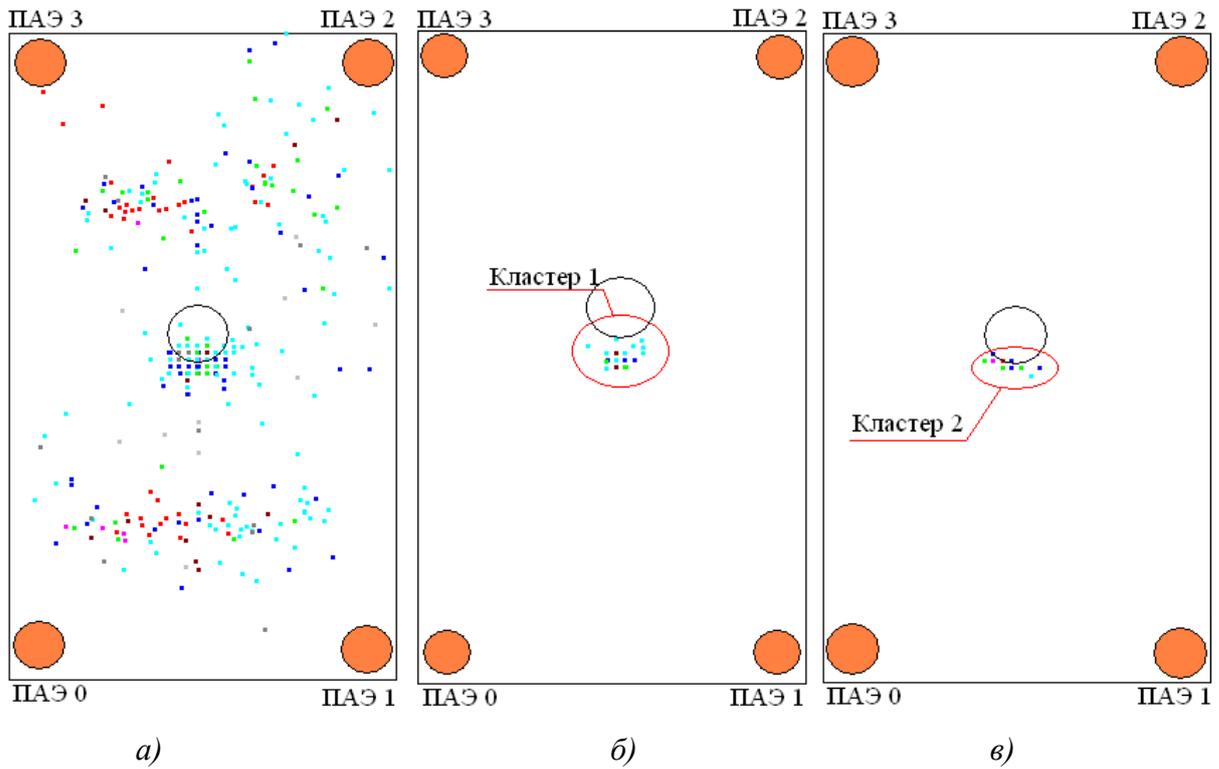


Рисунок 3.9 — Локация всех сигналов АЭ (а) и сигналов кластеров 1 (б) и 2 (в) в образце при нагрузке до $P = 60$ кН

Третий этап выполнялся до появления сигналов АЭ критического уровня. Нагружение было остановлено при нагрузке $P = 100$ кН. Сканирование образца экспресс-тестером ТЭРИ 0,4, проведенное по окончании нагружения, показало, что в нижней части концентратора напряжений образовался дефект с площадью поперечного сечения, равной 170 мм^2 . Таким образом, кластеры, полученные в нижней зоне концентратора, образованы сигналами от развивающегося дефекта.

Для полученных сигналов выполнялась кластеризация по форме сигнала. Параметры кластеризации не менялись. В процессе испытаний было получено 20 кластеров, в которые вошли 511 сигналов из 1275 зарегистрированных сигналов АЭ. Причем, 4 из них были зарегистрированы из зоны нижнего захвата, один — из зоны верхнего захвата, а остальные 15 — из зоны концентратора напряжений. Примеры полученных кластеров показаны на рисунке 3.10.

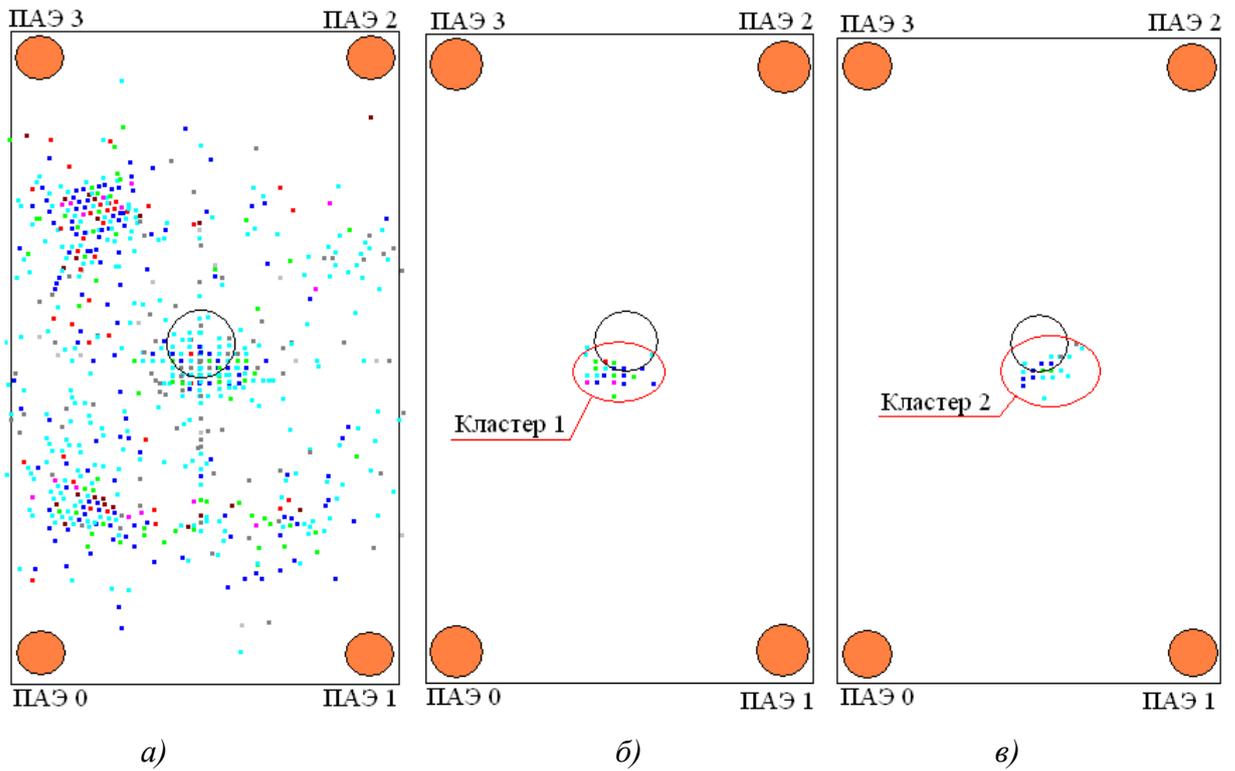


Рисунок 3.10 — Локация всех сигналов АЭ (а) и сигналов кластеров 1 (б) и 2(в) в образце при нагрузке $P = 100$ кН

На следующем этапе испытаний нагружение выполнялось до нагрузки $P = 150$ кН. При этом было локализовано 6543 сигналов АЭ (рисунок 3.11), из которых половина была сгруппирована в зоне концентратора напряжений.

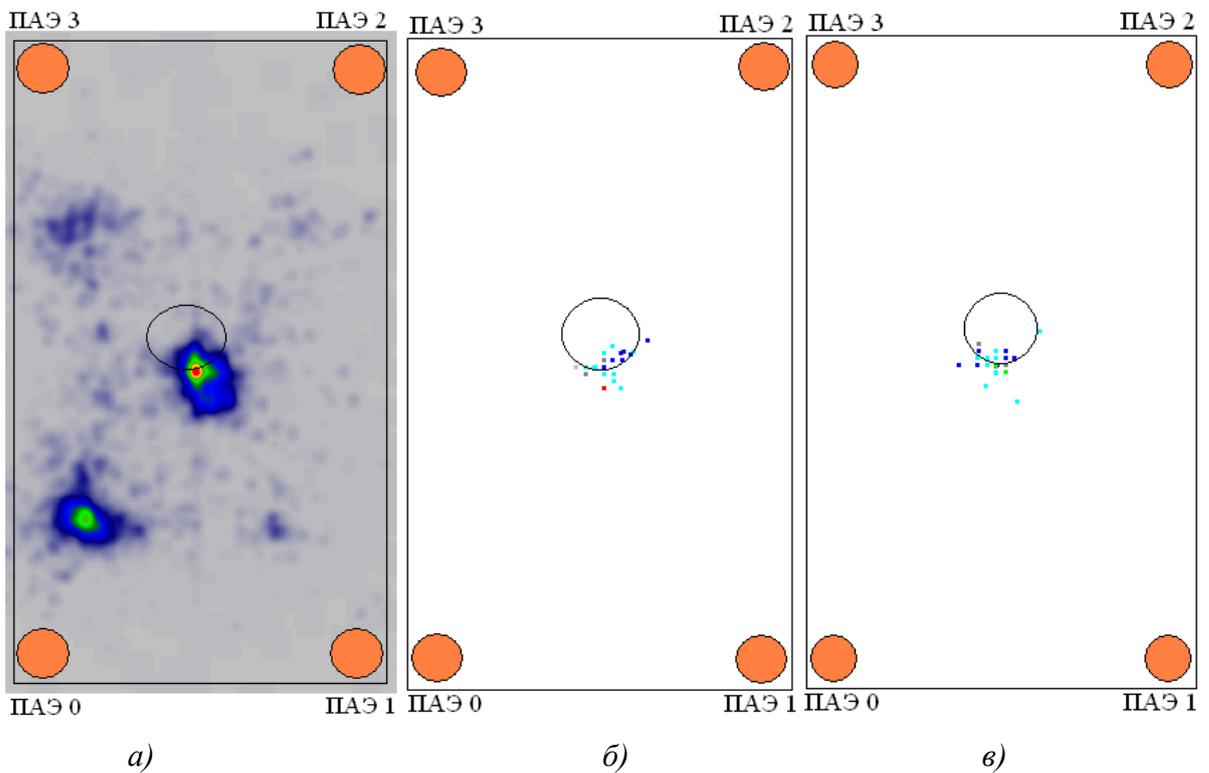


Рисунок 3.11 — Локация всех сигналов АЭ (а) и примеры кластеров, полученных при нагружении до $P = 150$ кН

Оценка качества материала образца после нагружения до $P = 150$ кН экспресс-тестером ТЭРИ 0,4 показала, что в районе концентратора напряжений образовался дефект общей площадью $2743,75$ мм². При этом дефектная область распространялась в разных направлениях от концентратора напряжений.

На последнем этапе испытаний образец нагружался до нагрузки $P = 185$ кН. Процесс разрушения данного образца сопровождался активной акустической эмиссией (рисунок 3.12, а). После испытаний отмечено наличие разрушений монослоев по всей его поверхности (рисунок 3.12, б).

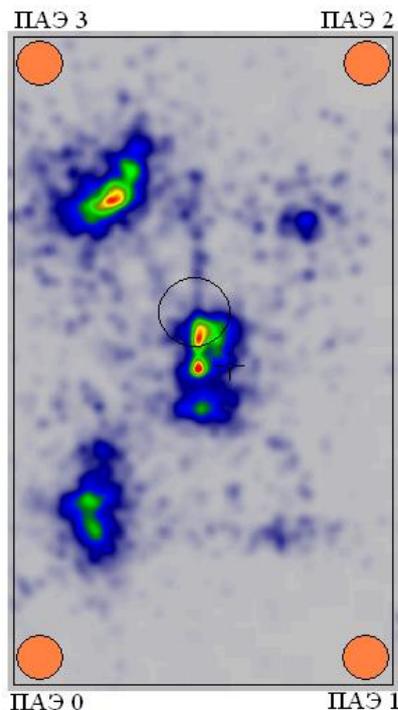
Сигналы АЭ от развивающегося дефекта сварки характеризуются высоким уровнем энергии и поэтому сигналы низкого уровня исключаются из рассмотрения при принятии решения о дефектности сварного шва. Аналогичный подход можно применить к источнику сигналов АЭ. Исходя из полученных результатов анализа информативных параметров внутри кластеров было установлено, что одним из важнейших параметров является энергия в пределах времени нарастания каждого сигнала.

Определить такую энергию сигнал АЭ можно по формуле:

$$E = \sum_{t_p}^{t_{MAX}} u_i^2, \quad (3.17)$$

где t_p – момент времени начала сигнала АЭ;

t_{max} – время, когда записанный сигнал АЭ достигает максимума.



а)



б)

Рисунок 3.12 — Локация кластеров (а) и вид образца после окончания испытаний (б)

Распространение сигнала АЭ в объекте от источника до ПАЭ вызывает уменьшение его энергии. Для сравнительного анализа сигналов АЭ по энергии необходима информация о зависимости величины энергии от расстояния между источником и ПАЭ. На рисунке 3.13 показан график, характеризующий изменение энергии сигнала АЭ при изменении расстояния между точкой его локации и принимающим датчиком.

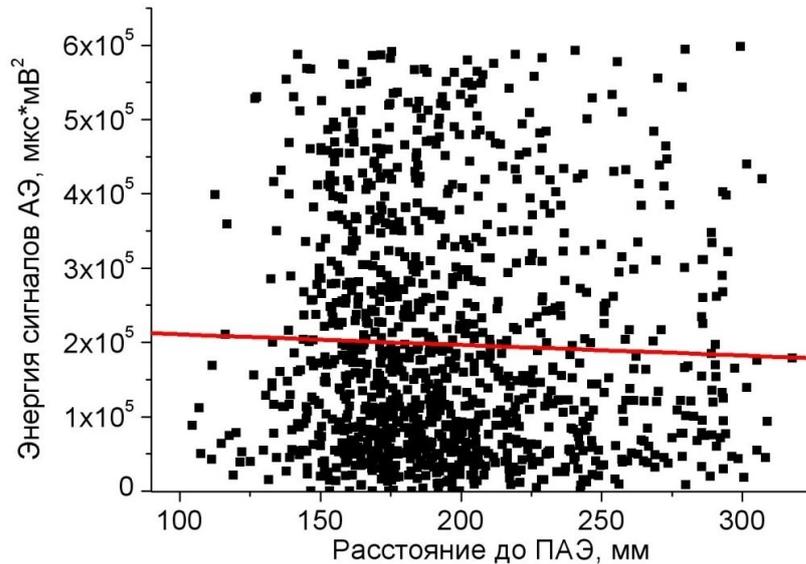


Рисунок 3.13 – Экспериментальная зависимость энергии переднего фронта сигналов АЭ от расстояния до ПАЭ

Точки на графике соответствуют величинам энергии сигналов, зарегистрированных АЭ-системой СЦАД-16.10 [30, 78]. Методом наименьших квадратов были определены исходные данные, по которым построена линейная зависимость между энергией сигнала и расстоянием до принимающего датчика (красная линия на рисунке 3.13). Получено, что для исследованных расстояний средняя энергия сигналов АЭ практически остается постоянной при удалении источника от ПАЭ.

На численную оценку энергии нарастания сигнала, которую определяем по формуле (3.17), оказывают влияние: диаграммы направленности приема и спектральные характеристики ПАЭ, качество акустического контакта с ОК, параметры фильтра и коэффициент усиления приемного канала АЭ-системы. Поэтому для анализа степени опасности каждого источника, характеризуемого идентифицированным кластером, использовали сигналы, пришедшие на один ПАЭ. Сравнивали энергию нарастания сигналов анализируемого кластера с энергией нарастания всех остальных сигналов.

Такой анализ проводили по локализованным актам АЭ, то есть актам, зафиксированным не менее чем тремя ПАЭ пьезоантенны. Это позволило сравнивать результаты анализа для разных ПАЭ и, таким образом, повысить качество оценки степени опасности источников. Для

обобщения энергии нарастания в пределах одного кластера J ввели параметр – среднюю энергию сигналов кластера M_E^J :

$$M_E^J = \frac{1}{N_J} \sum_{i=1}^{N_J} E_{i,J}, \quad (3.18)$$

где N_J – число актов, вошедших в кластер J ;

$E_{i,j}$ – энергия отдельного сигнала i кластера J , вычисленная по формуле (3.18).

Однако, как показывает опыт, влияние изменения условий в процессе испытания (например, стабильности акустического контакта), наиболее удачным параметром будет медиана такой энергии нарастания для сигналов кластера, к тому же она более «устойчива» к возможным выбросам параметров [6, 95]. Поэтому она применялась для анализа результатов АЭ-контроля.

Для непрерывной случайной величины это значение определяется по формуле:

$$(\zeta_{1/2})_J : F_J(\zeta_{1/2}) = 1/2.$$

При определении ступенчатой функции распределения по экспериментальным данным медиану определили как середину шкалы параметра, на котором функция $F_j(x)$ сохраняла значение 1/2:

$$(\zeta_{1/2})_J = \frac{X_{1/2}^{\min} + X_{1/2}^{\max}}{2}, \quad (3.19)$$

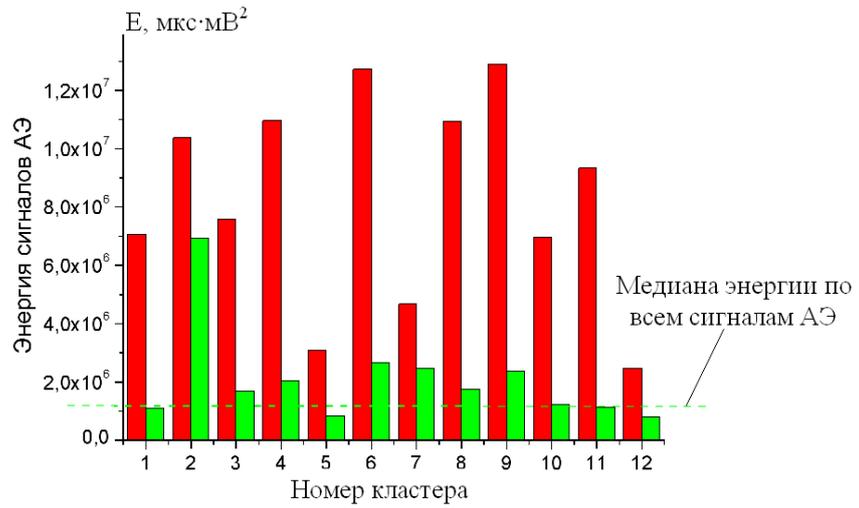
$$X_{1/2}^{\min} = \min_X (F_J(X) = 1/2), \quad X_{1/2}^{\max} = \min_X (F_J(X) > 1/2),$$

где $(\zeta_{1/2})_J$ – медиана распределения энергии сигналов в кластере J ;

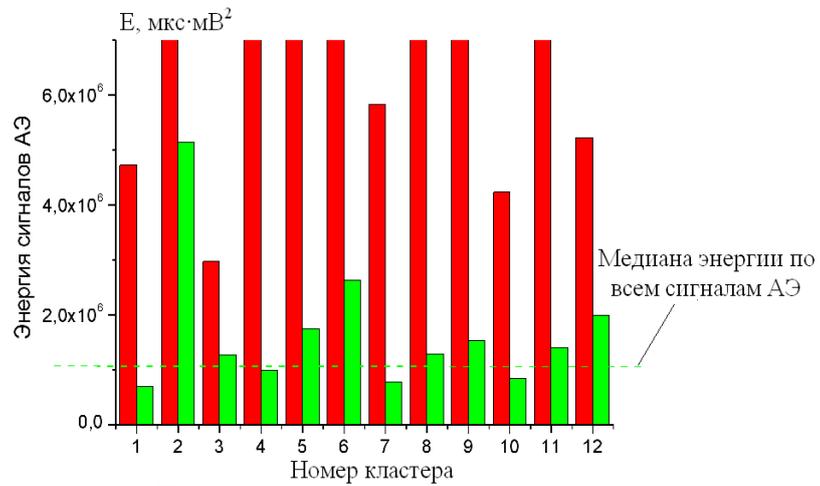
$F_j(x)$ – оцениваемая по значениям $E_{i,j}$ функция распределения энергии сигналов в кластере J ;

X_{min}, X_{max} – минимальная и максимальная граница интервала, на котором функция $E_j(X)$ сохраняет значение 1/2.

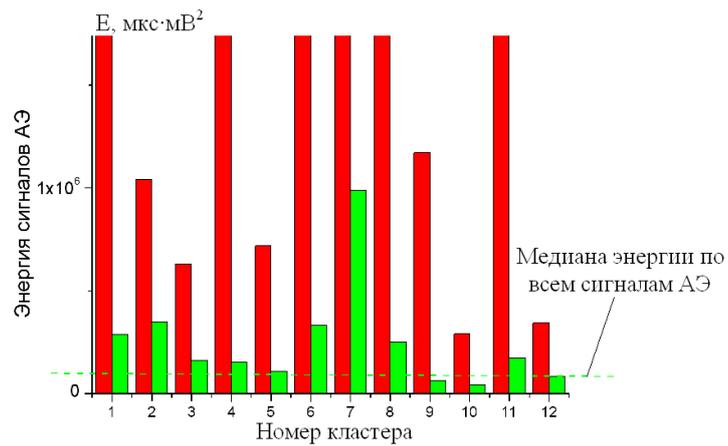
Возможность применения метода браковки по энергетическим характеристикам кластера рассматривалась на материале результатов АЭ-контроля процесса сварки стального образца с титановыми вставками, имитирующими дефект. На рисунке 3.14, *a–в* приведены энергетические характеристики различных кластеров, полученных кластеризацией по форме сигналов АЭ от ПАЭ 0 (*a*), ПАЭ 1 (*б*), и ПАЭ 2 (*в*). На рисунке 3.14 величина выборочного среднего энергии сигналов кластеров обозначена красным цветом, а медианы распределения – зеленым. Штриховой зеленой линией обозначена медиана энергии нарастания для всех идентифицированных кластеров из локализованных сигналов АЭ.



а)



б)

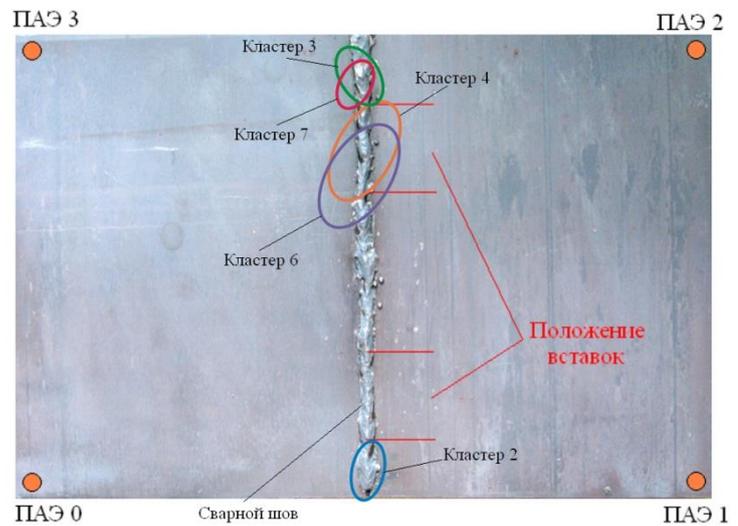


в)

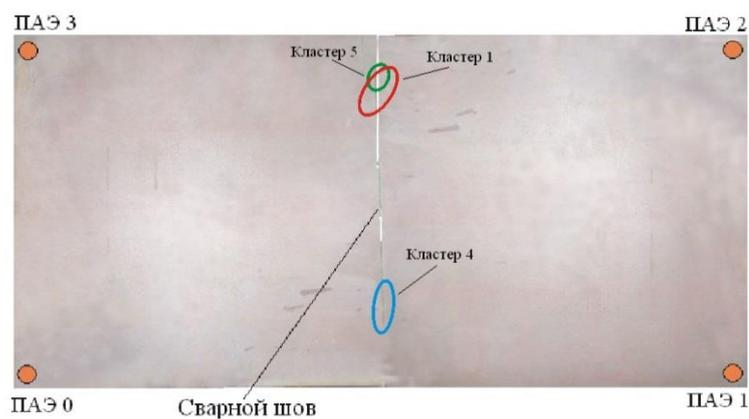
Рисунок 3.14 – Распределение энергии нарастания идентифицированных кластеров для образца из стали Ст3 с титановыми вставками: а – оценка по ПАЭ0; б – оценка по ПАЭ1; в – оценка по ПАЭ2

Анализ энергии кластеров (рисунок 3.14, *a – в*) показал, что оценка медианы по формулам (3.11), (3.12) более устойчива к наличию «ложных» сигналов от шумов, вызванных механическими воздействиями на образец во время сварки. Поэтому в качестве энергетической характеристики всей совокупности зарегистрированных сигналов АЭ выбрана медиана $\zeta_{1/2}^0$ общего распределения энергии. Отдельные кластеры (рисунок 3.14, *a*) содержат высокоэнергетические сигналы АЭ. Энергия этих кластеров значительно превышает значение медианы распределения энергии всех зарегистрированных сигналов АЭ.

На рисунке 3.15, *a* показано положение ПАЭ (0...3), расположение на сварном шве выделенных кластеров и титановых вставок. Выбранные кластеры состоят из сигналов, локализованных в местах введения титановых вставок. Наличие же непровара при испытаниях было определено при локации, представленной на рисунке 3.15, *б*.



a)



б)

Рисунок 3.15 – Положение выделенных кластеров относительно сварного шва с титановыми вставками (*a*) и непроваром (*б*)

Анализ энергетического уровня кластеров был проведен для образца с обнаруженным в сварном шве непроваром и усталостной трещиной. После расчетов энергетического уровня выделены три кластера (рисунок 3.16). Непровар и трещина в корне сварного шва были обнаружены в местах локализации сигналов АЭ, входящих в кластеры 1, 4 и 5 (рисунок 3.17,б), что было подтверждено методами фрактографии (рисунок 3.17,а, б).

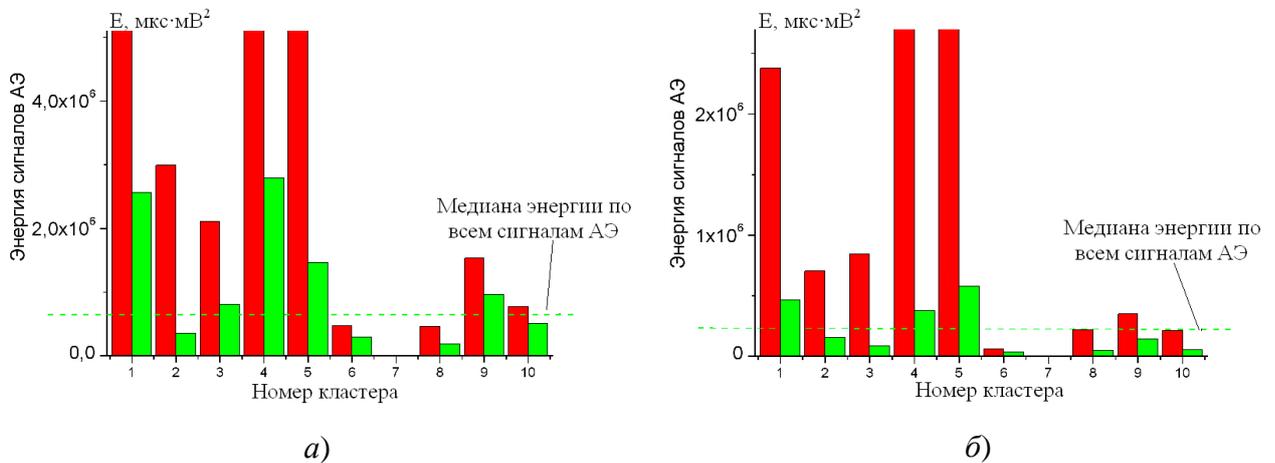


Рисунок 3.16 – Энергия кластеров при испытании образца с непроваром: *а* – оценка по ПАЭ0; *б* – оценка по ПАЭ 2

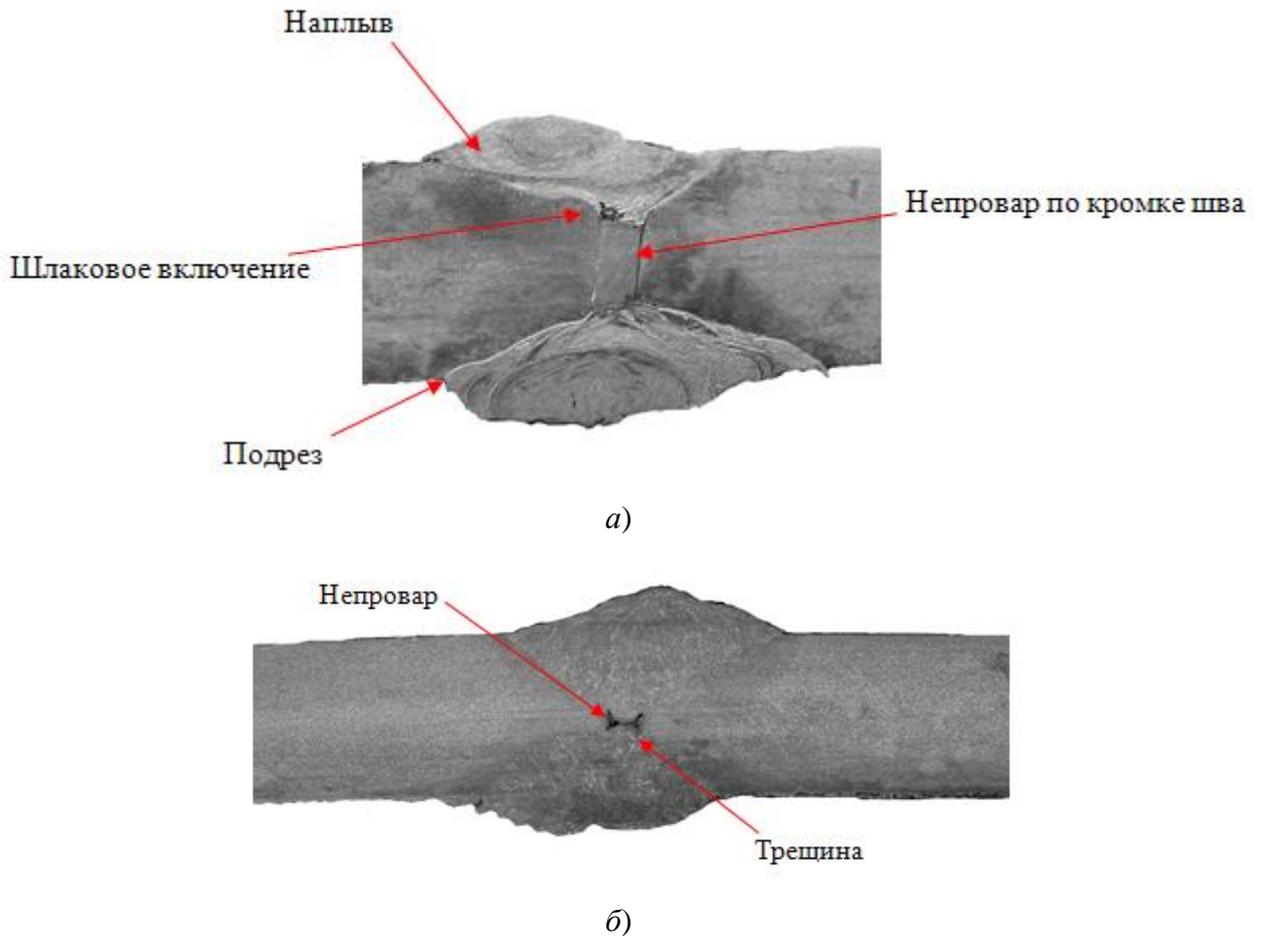
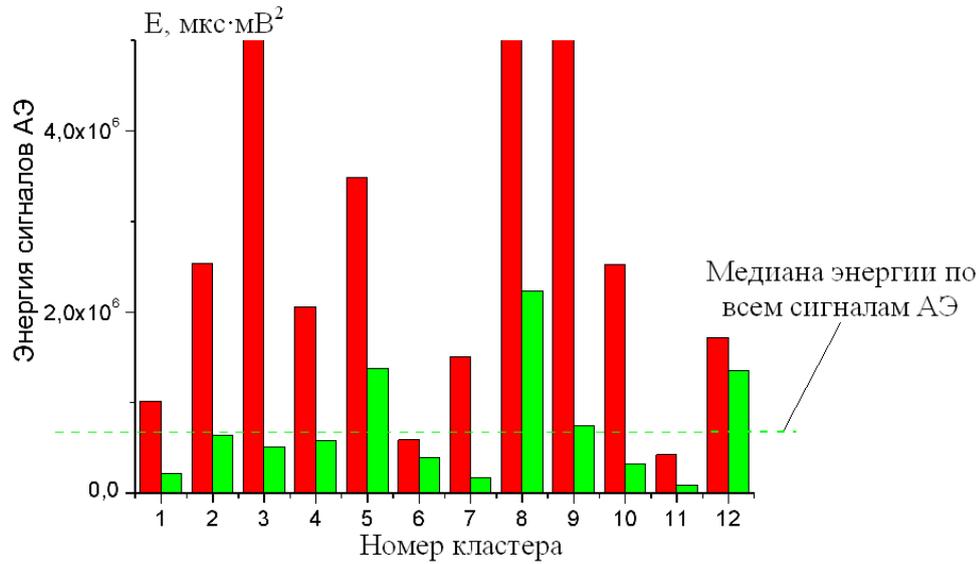
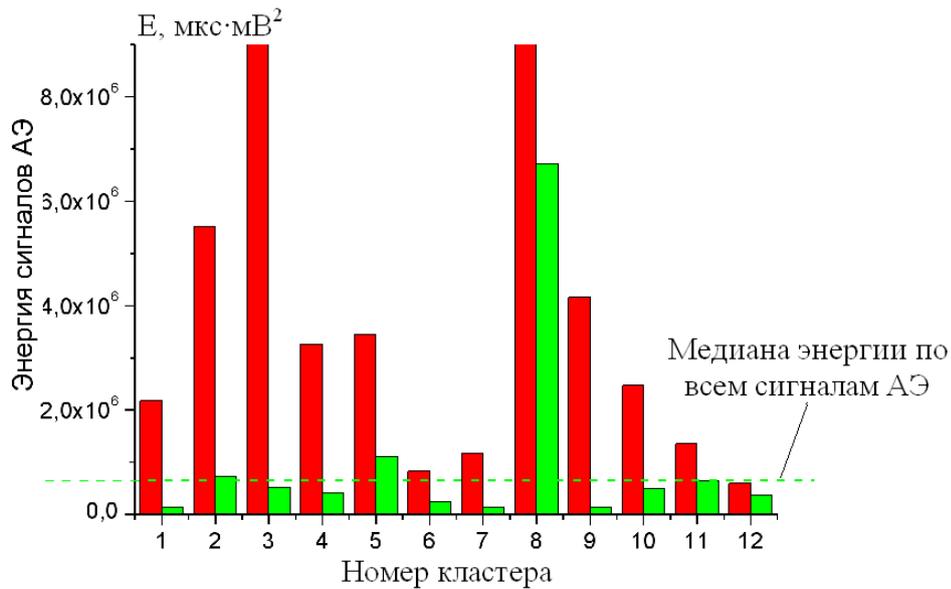


Рисунок 3.17 – Фрактография образца с титановыми вставками (*а*) и с трещиной в корне сварного шва (*б*)

Для проверки метода анализировалась АЭ-информация с образца, в котором в последующем не было выявлено несплошностей (рисунок 3.18). При этом оценивалась энергия сигналов АЭ, зарегистрированная двумя различными датчиками [95].



а)



б)

Рисунок 3.18 – Распределение энергии сигналов по кластерам для образца, не имеющего дефектов сварки: а – данные с ПАЭ 1; б – данные с ПАЭ 1

Для кластера 8 (рисунок 3.18, а, б) было обнаружено значительное превышение уровня энергии $\zeta_{1/2}^0$, т.е. в данном месте сварного шва необходим дополнительный контроль. Поэтому был проведен УЗ-контроль дефектоскопом УД2-70. Для ультразвукового контроля пользовались наклонным пьезоэлектрическим преобразователем с резонансной частотой 5 МГц и углом ввода 50° . Чувствительность ультразвукового контроля была установлена соответствующая

предельной чувствительности $S=2,4 \text{ мм}^2$. Ультразвуковой контроль показал, что на расстоянии 60 мм от края сварного шва находится дефект, соответствующий месту локации кластера 8 (рисунок 3.19). Предположительно это шлаковое включение с площадью отражающей поверхности 6 мм^2 .



Рисунок 3.19 – Положение кластера, подтверждающего наличие внутреннего дефекта в сварном шве

В итоге применения кластерного анализа для идентификации опасных источников АЭ можно сказать о том, что этот вид анализа позволяет более точно выделять дефектные участки в теле испытываемых образцов как стальных, так и сделанных из композиционных материалов.

3.4 Анализ структуры кластеров сигналов акустической эмиссии для оценки степени опасности дефектов

При решении задач АЭ-контроля важным этапом становится применение способов обработки информации, позволяющих отличать сигналы от дефектов, возникающих при сварке от акустических сигналов, которые являются паразитными и не содержат информацию о разрушении (сигналы, возникающие в процессе сварки от сварочной дуги и растрескивания окисной пленки, а также при остывании сварного шва). При этом метод обработки информации должен позволять надежно идентифицировать полезные сигналы (от искомых дефектов) на фоне помех, которые неизбежны при реализации сварочного процесса. Наибольший эффект такого контроля возможен тогда, когда выявление опасных источников происходит параллельно процессу регистрации АЭ.

При выполнении кластеризации оценку источников регистрируемых сигналов АЭ можно осуществлять за счет статистического анализа распределений параметров сигналов внутри кластеров. Сходство по основным параметрам сигналов, формирующих кластер, служит признаком его соответствия реальному дефекту.

Для выбора набора параметров сигналов АЭ, характеризующих кластеризацию, был проведен корреляционный анализ результатов АЭ-контроля сварки стальных образцов по параметрам: энергия, двухинтервальный коэффициент, *MARSE* (площадь под огибающей сигнала) [80, 101], угол наклона переднего фронта, длительность и число осцилляций сигнала АЭ в промежуток времени от момента его прихода до достижения максимального значения.

Для анализа изменений в форме каждого зарегистрированного сигнала АЭ можно воспользоваться двухинтервальным коэффициентом $K(t)$, описанным в работе [3]:

$$K(t) = \frac{A(t) - A(t - T)}{A(t - T)}, \quad (3.20)$$

где $A(t)$ – структурный параметр сигнала АЭ;

T – временной интервал, который устанавливается эмпирически.

В качестве параметра структуры сигнала АЭ выбрана величина [3]:

$$A(t) = \int_t^{t+T} |U(t)| \cdot dt, \quad (3.21)$$

где $U(t)$ – сигнал АЭ.

Матрица корреляций параметров сигналов АЭ приведена в таблице 3.2. Величина модуля элемента матрицы отражает взаимосвязь между соответствующими параметрами. Для удобства анализа было выполнено приведение корреляционной матрицы к порогу 0,4, после чего из нее были удалены все элементы, меньшие по модулю порогового значения, а также диагональные элементы.

Анализ результатов в таблице 3.2 показывает, что энергетические параметры сигналов АЭ связаны между собой для любого принимающего датчика пьезоантенны. Поэтому возможно сформировать комбинированный энергетический параметр по всем датчикам пьезоантенны.

Для энергии сигналов АЭ отсутствует значимая корреляция с параметрами формы и длительности переднего фронта. Параметры, вычисляемые по форме переднего фронта сигнала АЭ, связаны между собой для каждого ПАЭ в отдельности. Однако при этом не наблюдается взаимосвязи между идентичными параметрами, вычисляемыми по форме и регистрируемыми разными ПАЭ. Объясняется это тем, что форма сигнала АЭ при его распространении в материале конструкции существенно искажается прежде, чем доходит до датчиков. Следовательно, эти параметры необходимо рассматривать по отдельности для каждого датчика.

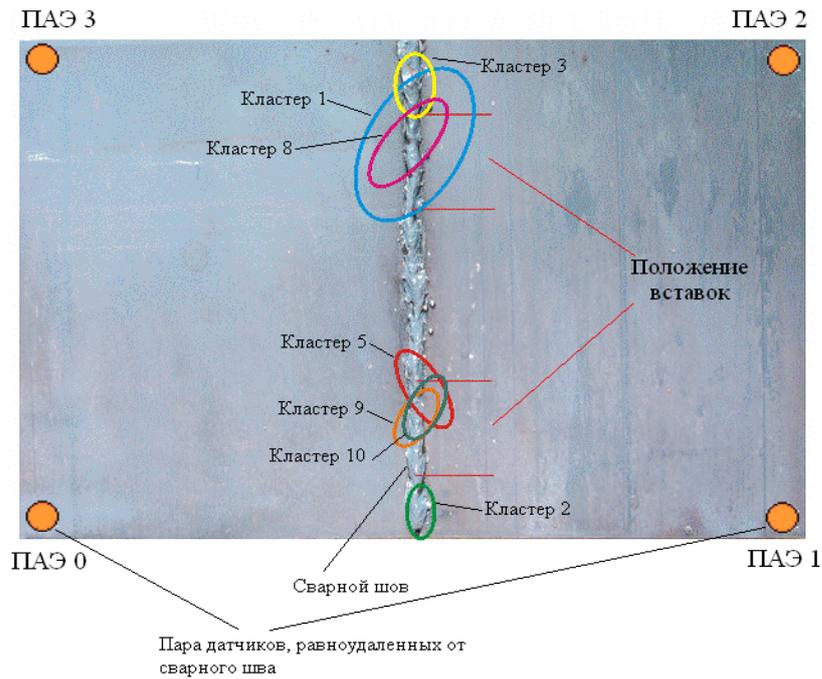
Таблица 3.2 – Пример использования матрицы корреляций разных параметров сигналов АЭ

		Коэффициенты корреляций:												
Параметр:		Оценка энергии			MARSE	Угол наклона переднего фронта			Длительность переднего фронта			Число осцилляций		
	ПАЭ:	0	1	2		0	1	2	0	1	2	0	1	2
Оценка энергии	0		0.70	0.62	0.76									
	1	0.70		0.65	0.77									
	2	0.62	0.65		0.78									
MARSE		0.76	0.77	0.78										
Угол наклона переднего фронта	0						0.45		-0.68				-0.74	
	1					0.45					-0.64			-0.70
	2											-0.66		-0.73
Длительность переднего фронта	0					-0.68							0.90	
	1						-0.64							0.89
	2							-0.66						0.89
Число осцилляций	0					-0.74			0.90					
	1						-0.70			0.89				
	2							-0.73			0.89			

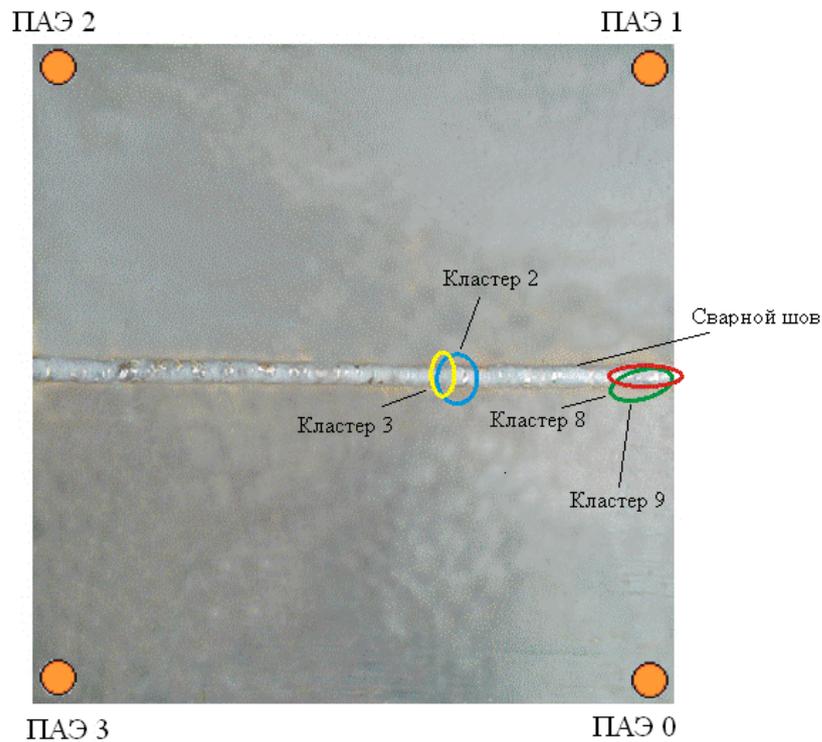
В условиях АЭ-контроля сварки датчики размещались так, что расстояния от первых двух ПАЭ, принявших сигнал, до источника в сварном шве равны. Поэтому при анализе параметров формы и длительности переднего фронта сигнала АЭ осуществляется группировка данных по парам датчиков, равноудаленных от источника в сварном шве (рисунок 3.20, а, б).

По параметрам «MARSE» и «максимум двухинтервального коэффициента $K(t)$ » были построены зависимости соотношения этих параметров внутри кластера с медианой (формула (3.19)) и средним значением всех зарегистрированных при АЭ-контроле сварки образца с выявленными дефектами сигналов АЭ. Дефекты были найдены в местах локации кластеров 2, 3, 8, 9 (рисунок 3.21). Дефект, соответствующий кластерам 8, 9, был обнаружен методом анализа

энергии сигналов АЭ. Дефект, относящийся к кластерам 2, 3, по медиане распределения энергии обнаружен не был.



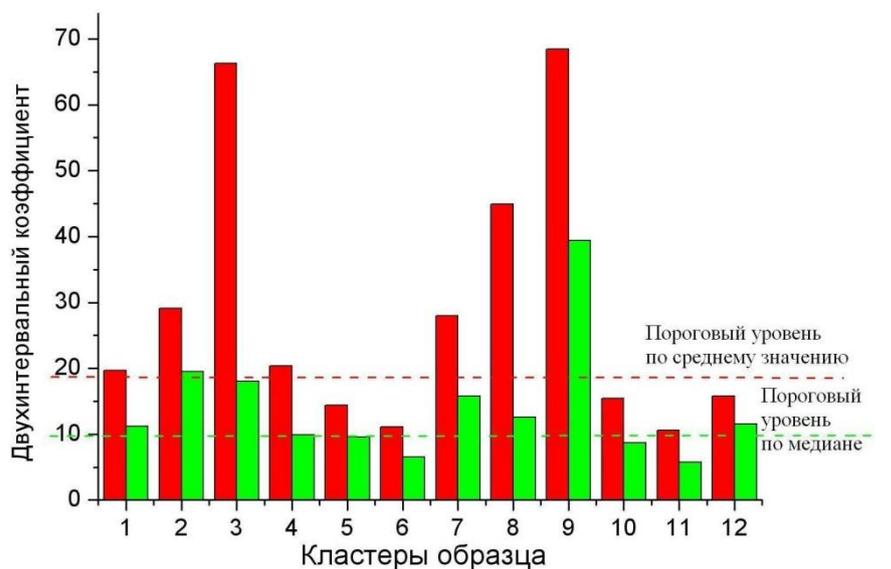
а)



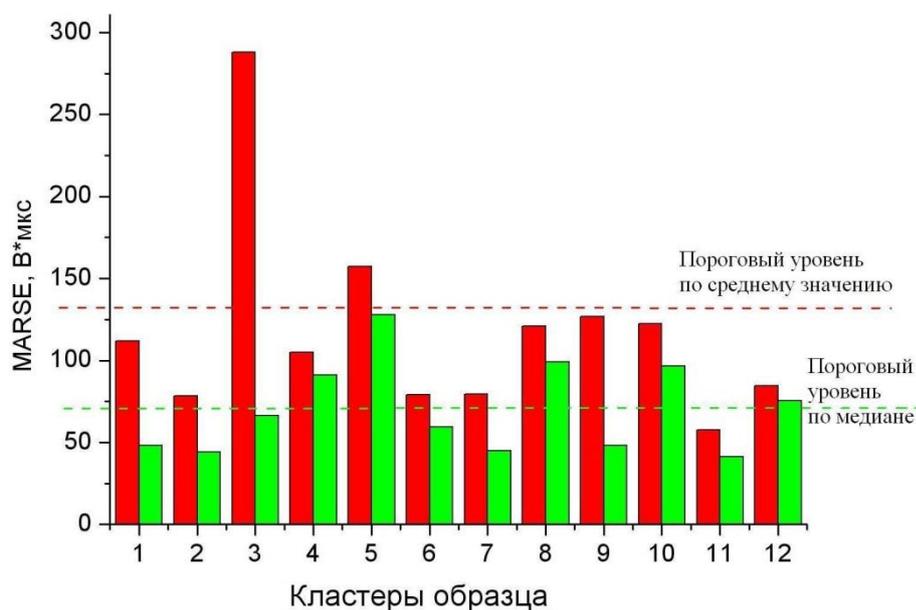
б)

Рисунок 3.20 – Расположение кластеров локализованных сигналов АЭ относительно сварного шва: а- образец с титановыми вставками; б- образец с дефектами, обнаруженными УЗ-методом

На рисунке 3.21 приведены распределения медианы, среднего значения двухинтервального коэффициента $K(t)$ (а) и распределения $MARSE$ (б) в зависимости от номера кластера. Из рисунка 3.21,а видно, что кластеры 2, 3, 8, 9 превосходят пороговые уровни по среднему значению (красные столбцы диаграммы) и медиане (зеленые столбцы). Однако при использовании параметра $MARSE$ (рисунок 3.21,б) кластеры, соответствующие реальным дефектам, практически не выявляются.



а)



б)

Рисунок 3.21 – Зависимость медианы и среднего значения внутрикластерных распределений параметров сигналов АЭ от номера кластера для двухинтервального коэффициента $K(t)$ (а) и распределения $MARSE$ (б)

Для получения максимальной информации из базы распределений параметров сигналов АЭ были вычислены дополнительные статистики. Для 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 $\zeta_{1/4}, \zeta_{3/4}$ – это величины, вычисляемые аналогично медиане, но при значениях функции распределения параметра p в кластере $JF_J^{(p)}(x) = 1/4$ и $F_J^{(p)}(x) = 3/4$, соответственно.

По этим величинам вычислялись статистики «эксцесс» и «интерквартильная широта». Эксцесс γ служит мерой однородности составляющих кластер сигналов. С помощью эксцесса экспериментальная функция плотности распределения сравнивается с плотностью нормального распределения:

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

Если локальный максимум функции плотности выражен более явно, чем у нормального распределения (т.е. наблюдаемая величина хорошо сгруппирована в области локального максимума), то эксцесс положителен.

Интерквартильная широта E характеризует разброс параметров сигналов в кластере [6]:

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

Сравнение интерквартильной широты с СКО характеризует степень однородности значений каждого рассматриваемого параметра в кластере.

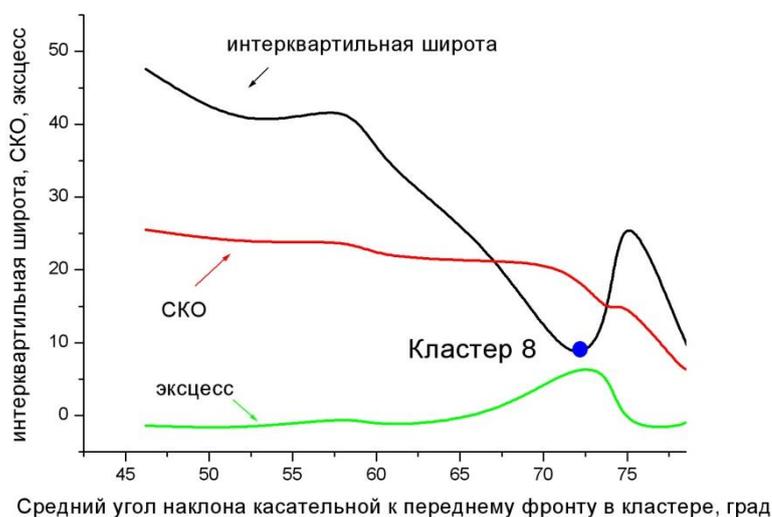
Для стального образца с обнаруженными УЗ-методом дефектами сварки выполнялось построение зависимостей внутрикластерных величин, таких как эксцесс, СКО и интерквартильная широта от среднего значения угла наклона касательной к переднему фронту сигнала АЭ, длительности и числа осцилляций сигнала АЭ (рисунки 3.20, 3.21, 3.22). На кривых интерквартильной широты выделены кластеры, для которых выполняются следующие условия:

$$\begin{cases} \gamma \geq 0 \\ E \leq \sigma \end{cases} . \quad (3.22)$$

Одновременное выполнение условий (3.15) полагалось признаком того, что сигналы АЭ, входящие в данный кластер, однородны по рассматриваемому параметру и кластеры могут быть соотнесены с возможными дефектами исследуемого объекта.



а)

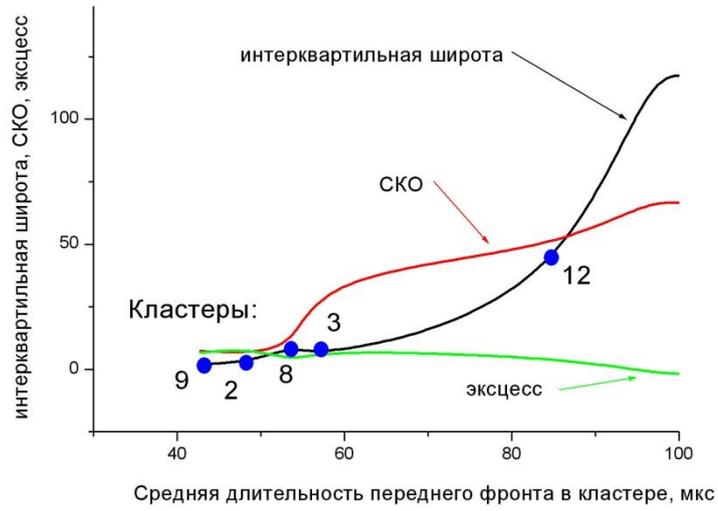


б)

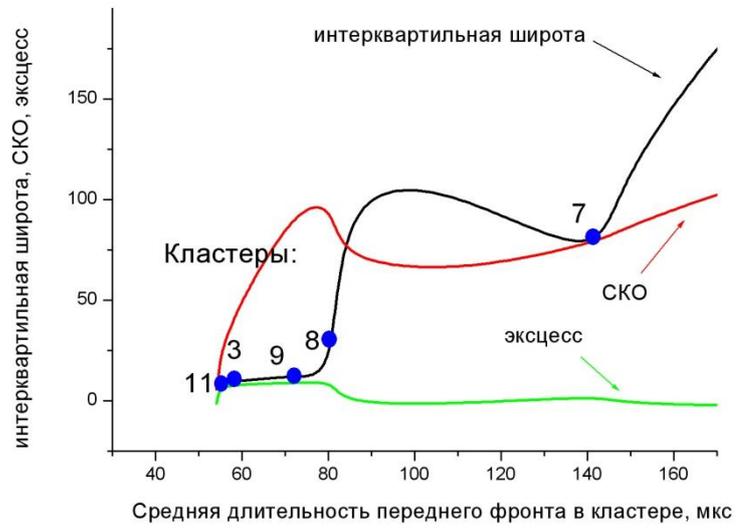
Рисунок 3.22 – Параметры распределений угла наклона касательной к переднему фронту в кластере: а- для ПАЭ 0; б- для ПАЭ 1

Анализ полученных зависимостей позволяет сформулировать следующее правило. Однородными по какому-либо параметру формы переднего фронта сигнала АЭ можно считать кластеры, для которых условия однородности выполняются одновременно по двум ближайшим к месту локации сигналов датчикам пьезоантенны (например, ПАЭ 0 и ПАЭ 1).

Таким образом, однородным по углу наклона переднего фронта считаем кластер 8 (рисунок 3.22, а, б), по длительности переднего фронта – кластеры 3, 8, 9 (рисунок 3.23, а, б), по числу осцилляций – кластеры 3, 9 (рисунок 3.24, а, б).

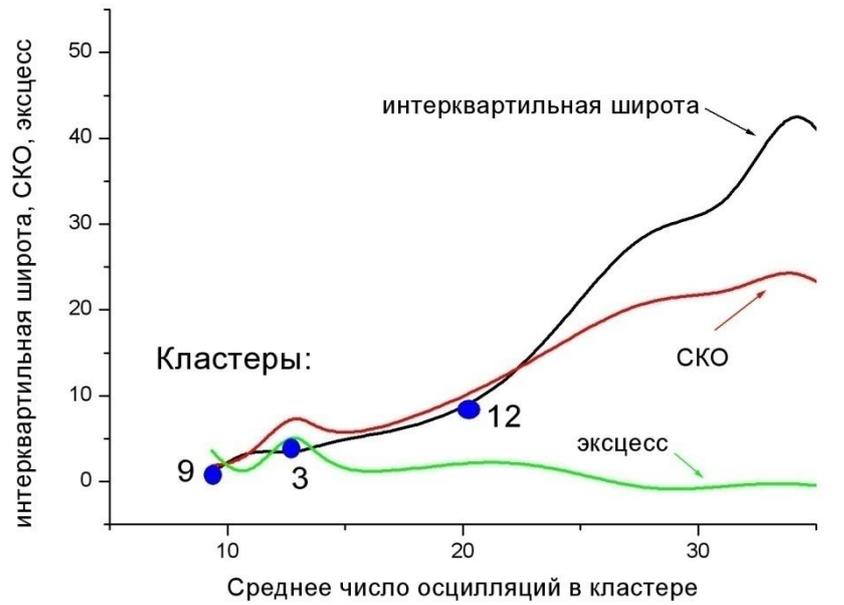


а)

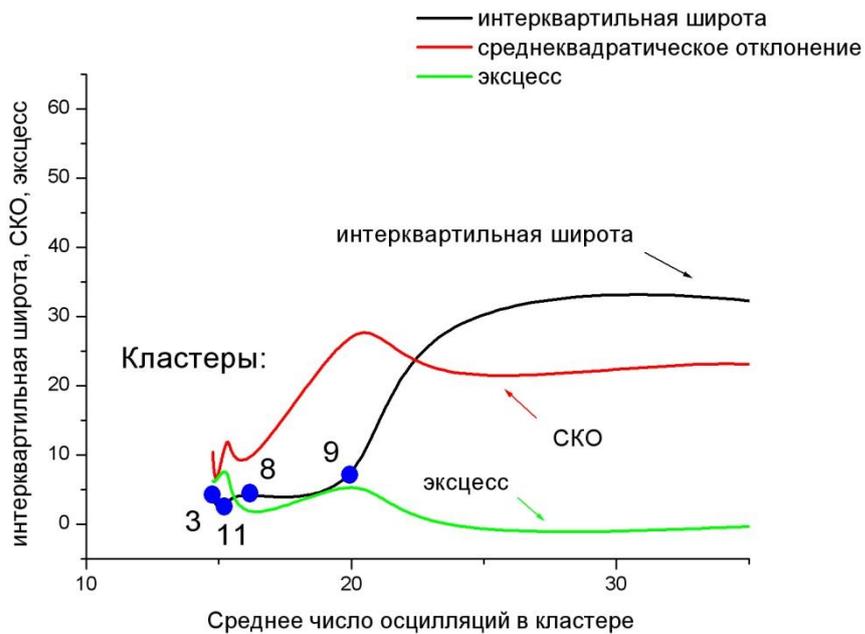


б)

Рисунок 3.23 – Распределение СКО, эксцесса, интерквартильной широты от длительности переднего фронта сигнала АЭ в кластере: а- для ПАЭ 0; б- для ПАЭ 1



а)



б)

Рисунок 3.24 – Распределение СКО, эксцесса, интерквартильной широты от среднего числа осцилляций в кластере: а- для ПАЭ 0; б- для ПАЭ 1

Для образца на рисунке 3.22,а проведен металлографический анализ макроструктуры сварного шва с титановыми вставками (рисунок 3.25,а, б). Полученные результаты фрактографии на рисунке 3.25 подтвердили наличие дефектов в зонах расположения кластеров на рисунке 3.20,а.

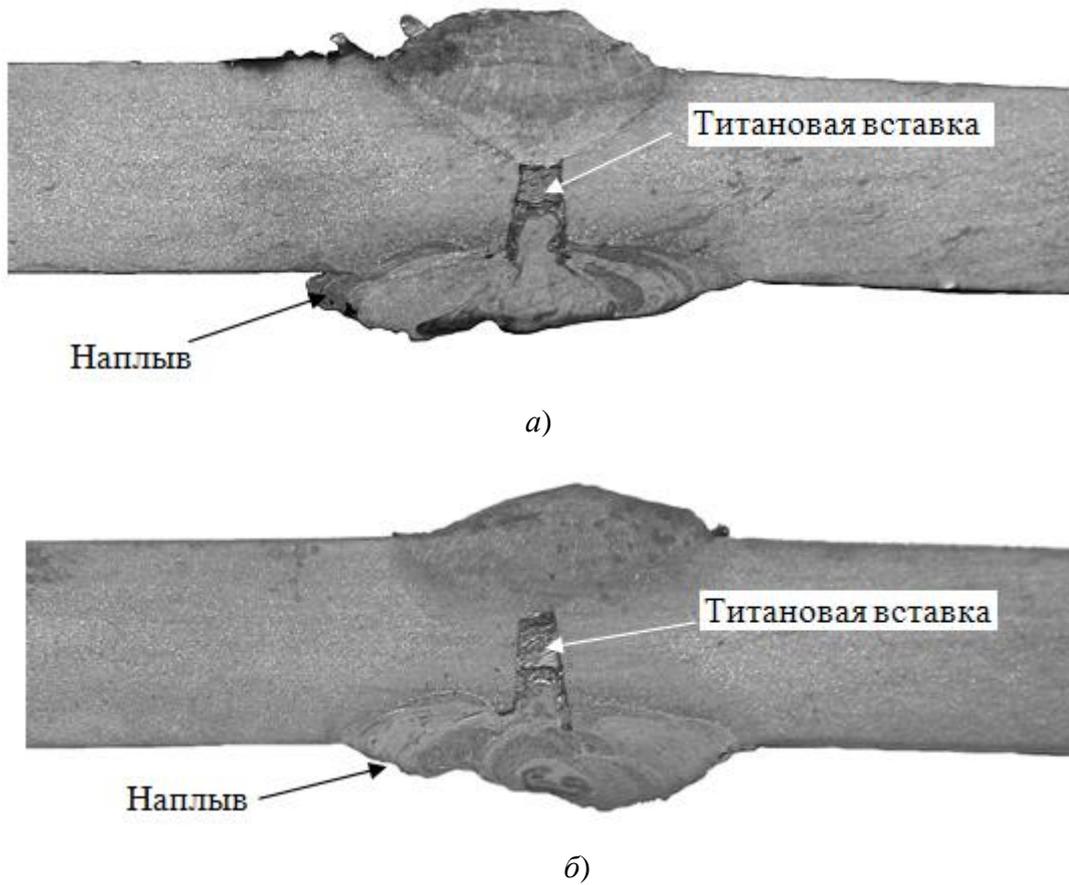


Рисунок 3.25 – Макроструктура сварных швов образцов с титановыми вставками

Описанный метод обобщается на произвольный набор параметров сигналов АЭ следующим образом. При анализе результатов кластеризации по набору параметров $\{p_j\}$, где индекс $j \leq N_p$, (N_p – число используемых параметров сигналов АЭ) по каждому из параметров определяется множество кластеров Y_j , по которому рассматривается множество $Y = \bigcup_j Y_j$, образованное объединением множеств выделенных кластеров по всем анализируемым параметрам сигнала АЭ. Используя этот способ обработки к рассмотренным параметрам АЭ, на рисунках 3.20–3.22 можно увидеть выделяемые кластеры (например, 3, 8, 9), которые находятся как раз в местах обнаруженных ультразвуковым методом дефектов стыкового сварного соединения.

Таким образом, за счет вычисления статистических характеристик внутрикластерных распределений метод проверки параметров сигналов АЭ в кластерах на однородность может быть применен для анализа данных АЭ-контроля процесса сварки.

3.5 Исследование применения методики динамической кластеризации для контроля дефектов в режиме контроля, совмещенного с процессом сварки

Приведенные в предыдущих разделах результаты показывают эффективность кластеризации при определении местоположения и опасности источников АЭ. Однако, повышение качества контроля можно обеспечить за счет параллельности обработки процесса регистрации сигналов АЭ в ходе испытаний. Однако для качественного кластерного анализа необходимо в процедуры обработки встраивать алгоритмы обработки, которые выполняют достаточно много вычислений, что увеличивает время контроля [89, 90, 97].

Методики кластеризации, которые выделяют кластеры на основе сравнения отдельных единичных параметров сигналов АЭ или их групп, позволяют существенно снизить время обработки и повысить быстродействие такой обработки [95, 97, 98]. Для кластеризации по набору параметров необходимо расположить их в вариационный ряд (от меньшего к большему) и разбить каждый из них на задаваемое число интервалов n . Если значения выбранных характеристик для разных сигналов попадают в заданный диапазон, принимается, что акты АЭ входят в один кластер. Однако применение этих методов возможно только после окончания регистрации сигналов АЭ, а дополнительные расчеты увеличивают время контроля. Поэтому необходим метод, который бы основывался на параллельной регистрации сигналов. В этом случае время обработки значительно сокращается за счет одновременного выполнения записи сигналов АЭ и их кластеризации.

Набор несущих информацию характеристик при динамической кластеризации был выбран аналогично кластеризации по тем же параметрам, которые были проанализированы после регистрации. Среди таких параметров для исследований были такие параметры как рассчитанные координаты источников, число осцилляций в пределах заданного порога, доминирующая частота, время и скорость нарастания сигнала АЭ до максимальной амплитуды [89, 90, 97]. Использование для кластеризации отдельных параметров позволяет существенно сократить время обработки.

Алгоритм выполнения был представлен в виде блок-схемы на рисунке 3.26. При этом АЭ-система автоматически рассчитывает для каждого регистрируемого сигнала значение перечисленных параметров. При локации каждого сигнала система выполняет также расчет погрешности определения координат его источника. Первый зарегистрированный сигнал принимается в качестве базового и начинает формировать первый кластер.

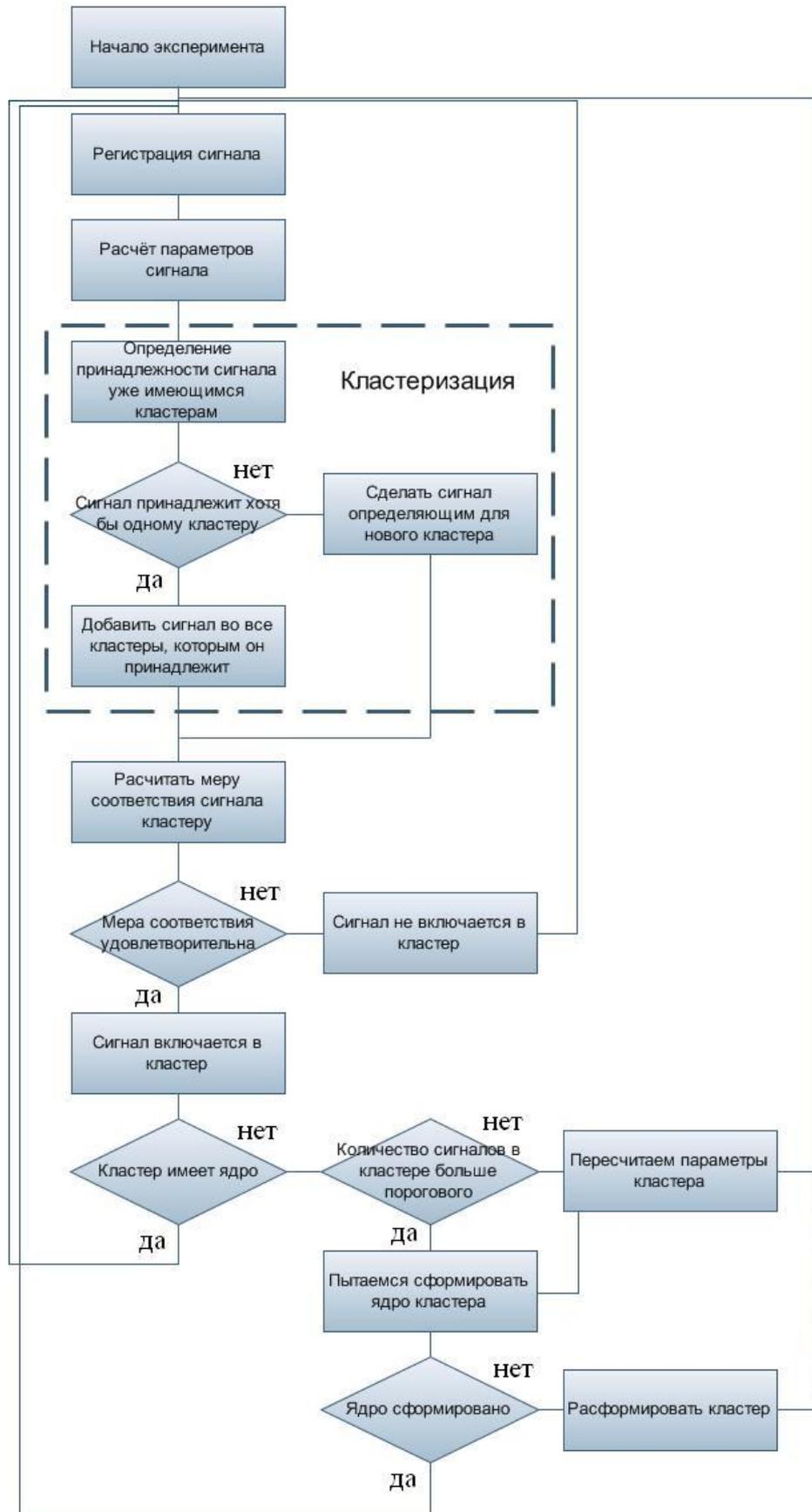


Рисунок 3.26 – Блок-схема работы алгоритма динамической кластеризации

В процессе локации каждого последующего сигнала определяется, можно ли соотнести данный сигнал с какими-либо из имеющихся кластеров. В противном случае происходит формирование нового кластера. При этом применение разработанного способа обработки параллельной записи кластеризации позволяет по конкретному набору характеристик сигнала приводить к формированию нескольких координатных осей кластеризации. Для принятия решения о возможности включения сигнала в кластер рассчитывается мера соответствия P_s исследуемого сигнала уже имеющимся кластерам:

$$P_s = \frac{P_1 + P_2}{2}, \quad (3.23)$$

где $P_1 = \frac{S_s \cap c}{S_s}$ – геометрическая оценка, основанная на отношении площадей;

$S_s \cap c$ – площадь зоны пересечения области локации сигнала с зоной образа кластера;

S_s – площадь зоны локации сигнала;

P_2 – параметрическая оценка, основанная на значениях параметров сигнала АЭ и образа кластера.

С учетом погрешности зона локации сигнала может быть представлена в виде эллипса с центром в точке B (рисунок 3.27), координатами $(X_s; Y_s)$ и полуосями dX_s и dY_s , где, dX_s, dY_s – погрешности локации по координатам X, Y .

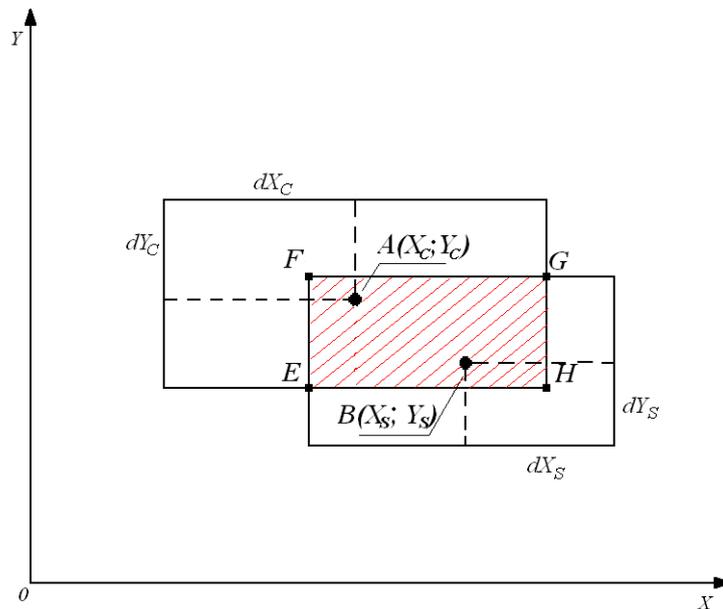


Рисунок 3.27 – Пересечение области локации сигнала АЭ с геометрическим образом кластера

Для уменьшения вычислительной сложности алгоритма используется приближенная прямоугольная зона локации сигнала АЭ (рисунок 3.27). Для определения меры соответствия P_s вычисляется отношение площади пересечения зоны локации сигнала с зоной образа кластера.

Зона образа кластера с учетом принятого упрощения представляется в виде прямоугольника с центром в точке A с координатами $(X_C; Y_C)$ и сторонами $2 \cdot \overline{(dX)}_C$ и $2 \cdot \overline{(dY)}_C$, где $\overline{(dX)}_C$, $\overline{(dY)}_C$ – медианы набора погрешностей локации по координатам X , Y всех сигналов, уже включенных в кластер.

Координаты $(X_C; Y_C)$ рассчитывают как медиану координат точек локации сигналов, включенных в кластер. Следовательно, каждый вновь включаемый в кластер сигнал участвует в формировании образа кластера.

С учетом прямоугольного приближения величина $S_{S \cap C}$ равна площади прямоугольника $EFGH$ (рисунок 3.27), представляющего собой область пересечения зоны локации сигнала с зоной образа кластера. Эти зоны могут занимать разное положение друг относительно друга. Для расчета площади прямоугольника $EFGH$ находятся координаты угловых точек зоны пересечения (точки F и H на рисунке 3.27). Для этого достаточно проверить все точки с координатами вида:

$$(X_C \pm dX_C; Y_C \pm dY_C); (X_S \pm dX_S; Y_S \pm dY_S); (X_C \pm dX_C; Y_S \pm dY_S); (X_S \pm dX_S; Y_C \pm dY_C).$$

Площадь зоны локации S_S с учетом прямоугольного приближения рассчитывается как:

$$S_S = 4 \cdot dX_S \cdot dY_S.$$

Параметрическую оценку P_2 сигнала и образа кластера осуществляют по формуле:

$$P_2 = \begin{cases} \min_{j=1..4} \left\{ 1 - \frac{|p_j^{(S)} - p_j^{(C)}|}{l_j^{MAX}} \right\}, & |p_j^{(S)} - p_j^{(C)}| < l_j^{MAX} \\ 0, & |p_j^{(S)} - p_j^{(C)}| \geq l_j^{MAX} \end{cases}, \quad (3.24)$$

где j – индекс параметра сигнала АЭ;

$p_j^{(S)}$ – значение параметра для исследуемого сигнала;

$p_j^{(C)}$ – параметры образа кластера, рассчитываемые по медиане набора параметров сигналов АЭ, входящих в кластер;

l_j^{MAX} – предельно допустимое отклонение по параметру с индексом j , определяемое по результатам оценки разброса данного параметра, граничные условия для которого получены на этапе предварительных испытаний.

При реализации алгоритма динамической кластеризации формируется кластер, который состоит из двух составляющих: внешней области и ядра (рисунок 3.26). А мера соответствия P_S кластеру рассчитывается по формуле (3.23). При выполнении неравенства $P_S > P_{обол}$, анализируемый сигнал распределяют в определенный кластер. После этого, в соответствии с алго-

ритмом (рисунок 3.28), выполняется оценка ядра (сформировано оно или нет). Отличие сигналов АЭ, попадающих во внешнюю область, от сигналов, которые попадают в ядро, определяется мерой соответствия параметра P_s сигнала «портрету» кластера, который формируется непосредственно при обработке.

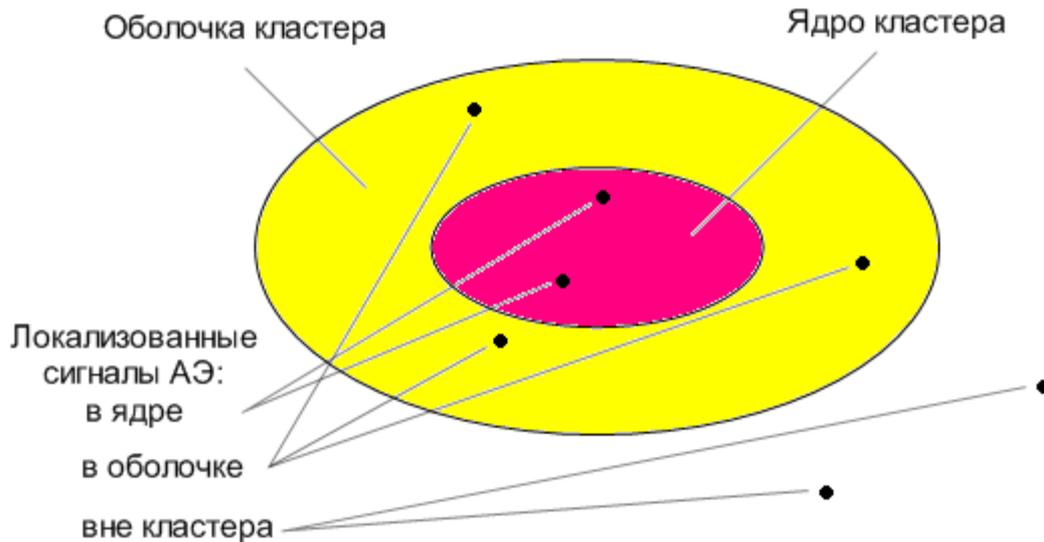


Рисунок 3.28 – Структура динамического кластера

В этом случае получается, что наиболее близкие по заданному параметру сигналы формируют ядро кластера. Формирование кластера завершается при превышении числа сигналов, включенных в данный кластер, больше критического порога $M_{форм}$, заданного заранее. При этом увеличение данного порога приводит к повышению надежности динамической кластеризации и делает вероятность попадания в кластер статистически более значимым событием. Однако на первом этапе, когда ядро еще не сформировалось, его образ постоянно меняется, а время анализа увеличивается.

Для повышения качества кластеризации и снижения ошибок для идентификации источников АЭ сигналов в каждом сформированном кластере вычисляется величина, которая характеризует его «уникальность»:

$$K_i = \frac{N'_i}{N_i},$$

где K_i – коэффициент «уникальности» кластера i ;

N'_i – количество сигналов АЭ, попавших только в кластер i .

Затем определяется индекс $I_{МАХ}$, который включает наибольшее количество «уникальных» сигналов:

$$I_{MAX} = \arg \max_i (\kappa_i).$$

И каждый значимый кластер формируется окончательно только после удаления сигналов АЭ, отнесенных к этому кластеру из остальных кластеров. Это приводит к изменению значений N_i, N'_i для всех остальных кластеров и необходимости пересчета коэффициентов «уникальности» κ_i . Для этого в алгоритме анализа первоначально определенных кластеров, для предотвращения пропуска вновь появляющихся в процессе испытания источников сигналов АЭ, встраивается дополнительный параметр – активность сигналов АЭ. Величина активности кластера i вычисляется как:

$$A_i = \frac{N_i}{T_{i,N_i} - T_{i,1}},$$

где A_i – характеризует активность кластера i , который соотносится с отдельным источником сигналов АЭ;

T_{i,N_i} – время приема последнего сигнала, отнесенного к кластеру i ;

$T_{i,1}$ – время приема первого сигнала отнесенного к кластеру i .

Для активности формируемого кластера устанавливается пороговое значение, которое рассчитывается как медиана распределения активностей уже сформированных кластеров:

$$A_{порог} = \{\overline{A}_{M/2}\},$$

где M – количество уже сформированных кластеров сигналов АЭ;

$\{\overline{A}\}$ – набор активностей всех идентифицированных кластеров.

Если выполняется неравенство $A_i > A_{порог}$ (рассчитанная активность больше порогового значения), то рассматриваемый кластер становится одним из идентифицированных источников АЭ в ОК.

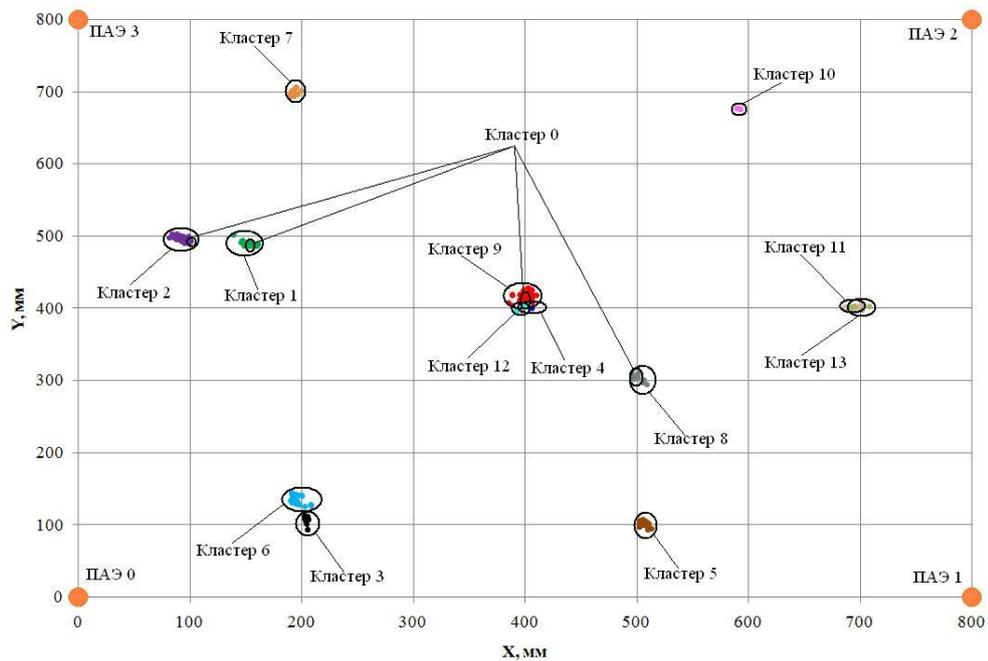
Кроме того, операции по дополнительному анализу данных, полученных при динамической кластеризации могут использоваться в процессе постобработки. На этом этапе наиболее целесообразно применять следующие алгоритмы:

- верификация идентифицированных кластеров, направленная как на объединение близких по параметрам кластеров, так и на раздел по статистическим признакам;
- проверка кластеров на однородность по параметрам сигналов АЭ [89].

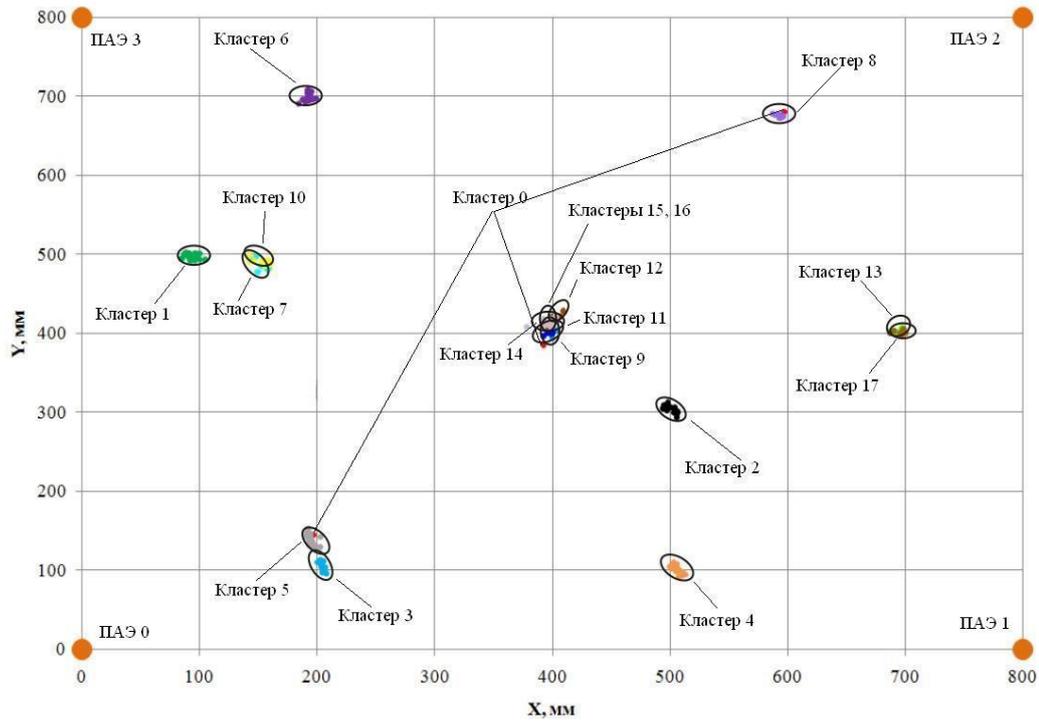
Апробацию разработанной методики осуществляли с помощью имитатора, который характеризуется одинаковыми параметрами в момент излучения, и для излучения устанавли-

вали в различные точки на стальном листе с размерами $1000 \times 1000 \times 8$ мм. Всего точек установки было девять, в каждой из которых в разные моменты излучения амплитудное значение выходного сигнала варьировалось в диапазоне 14 дБ.

Всего в этом опыте было зарегистрировано 384 сигнала АЭ. Сначала проводили кластеризацию по оцифрованной форме сигналов АЭ. При кластеризации идентифицировали 13 кластеров и на рисунке 3.29, а представлена локация этих кластеров. Нулевой кластер был сформирован из 18 сигналов, которые не принадлежали ни одному из 13 кластеров. Таким образом, при кластеризации по форме сигналов АЭ в каждой точке нахождения ПАЭ имитатора были идентифицированы кластеры. При этом некоторые кластеры были идентифицированы в пределах близких по координатам значениям.



a)



б)

Рисунок 3.29 – Результаты кластеризации сигналов от электронного имитатора на стальном плоском параллелепипеде: *а* – по оцифрованной форме сигнала АЭ; *б* – динамическая кластеризация

При реализации динамической кластеризации зарегистрированных сигналов было получено 17 кластеров (рисунок 3.29,б). При этом в нулевой кластер попало 9 сигналов АЭ. Получено, что при динамической кластеризации каждому источнику соответствовал только один кластер. Таким образом, использование динамической кластеризации позволило разделять сигналы на кластеры по определенной комбинации несущих информацию характеристик уже при их регистрации.

Выводы по главе 3

1. Проведены исследования влияния таких параметров как неопределенность скорости ультразвуковой волны и погрешность определения времени начала сигналов АЭ на погрешность определения координат источников АЭ. Численно определен вклад неопределенности скорости ультразвуковой волны и погрешностей, связанных с неточностью определения времени начала сигнала в погрешность определения координат для плоских и сводящихся к ним пьезоантенн. На основе проведенных исследований разработана методика локации сигналов АЭ, учитывающая и неопределенность скорости ультразвуковых волн при распространении от

источника до приемников и неточности оценки РВП сигналов на приемные ПАЭ. Выполнена оценка влияния формы пьезоантенны на локацию источников сигналов АЭ.

2. Разработан модифицированный пороговый метод определения РВП сигналов АЭ на приемные ПАЭ с параллельной оценкой погрешностей их определения. Показано, что при использовании предложенного метода осуществляется уменьшение погрешности локации за счет разброса координат сигналов АЭ в кластерах при статических испытаниях авиационных конструкций и при контроле процесса сварки стальных образцов.

3. Для идентификации реальных источников развития дефектов в процессе испытаний предложены способы обработки типа кластеризации по различным характеристикам и основным параметрам сигналов АЭ с последующей оценкой суммарной энергии полученных кластеров. Такая обработка позволяет снизить опасность испытаний и повысить производительность АЭ метода контроля.

4. Разработана методика совершенствование табличного метода определения координат источников сигналов АЭ при статических испытаниях образцов с неоднородной структурой типа углепластиков, что привело к повышению точности локации участков, в которых происходят необратимые изменения, связанные с разрушением элементов композитного материала. Уменьшение разброса определенных значений координат источников дает возможность точнее устанавливать местонахождение участков с необратимыми структурными изменениями и более точным оцениванием активности каждого из идентифицированных источников.

5. Разработаны алгоритмы динамической кластеризации, которые позволяют реализовать разделение сигналов на кластеры параллельно их регистрации. Результаты такой кластеризации исследованы с помощью электронного имитирования сигналов на листовом материале. Результаты этих исследований показали достаточно быструю и достоверную картину локации источников в кластеры по комбинации выбранных информационных параметров сигналов АЭ. В качестве параметров локализации были использованы расчетные координаты для сигналов, основная несущая частота сигнала, число осцилляций внутри сигнала, время и скорость увеличения фронта сигнала от момента времени начала сигнала до времени, соответствующего максимуму амплитуды.

4 АНАЛИТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ

4.1 Разработка методики двухэтапной кластеризацией сигналов

Повышение надежности распознавания потенциально дефектных участков при осуществлении сварки конструкций возможно, в первую очередь, за счет повышения скорости и оптимизации процессов обработки АЭ информации [2, 4, 32]. При использовании метода АЭ следует выполнять регистрацию сигналов и их обработку в режиме реального времени до остывания металла. Обработка сигналов АЭ, зарегистрированных при сварке, выполнялась с использованием кластерного анализа.

Существующие методы кластеризации обладают как преимуществами, так и недостатками. Кластеризация по цифровой форме сигналов АЭ дает возможность разделить источники с наивысшей точностью. Однако для ее осуществления необходимо время до нескольких десятков минут при большом объеме информации. При осуществлении параллельной записи кластеризации по выбранным характеристикам каждого сигнала время, затрачиваемое на такую операцию, занимает не более 0,1 с при обработке массива, в который входят, например, тысяча сигналов АЭ. Однако результаты распознавания источников как отдельных кластеров в этом случае будут существенно хуже, чем те, которые получаются при кластеризации по цифровой форме сигналов АЭ, что описано в работе [36].

Проиллюстрировать это можно вероятностной оценкой способов кластеризации, представленной на рисунке 4.1. Приведенные зависимость достоверности кластеризации (как процентного выражения вероятности) от величины шумовой составляющей, на фоне которой находится сигнал в абсолютных значениях показывают, что способ кластеризации по оцифрованной форме сигналов АЭ оказался наиболее устойчивым к такому шуму.

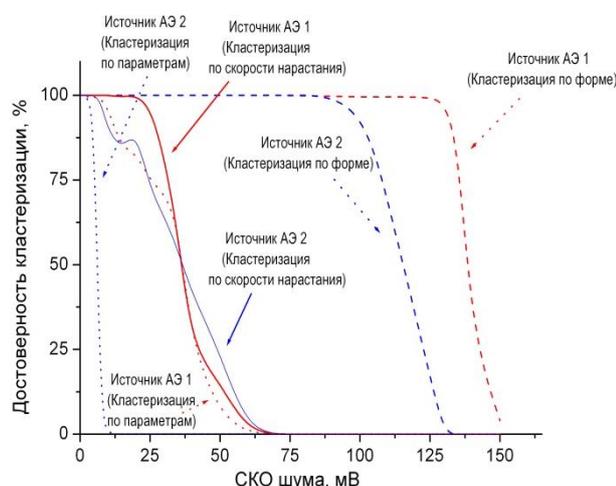


Рисунок 4.1 - Зависимость достоверности выявления всех источников при кластерном анализе от абсолютных значений уровня шума

Однако способ кластеризации по оцифрованной форме сигналов АЭ невозможно использовать в режиме реального времени, так как этот способ отнимает много времени на обработку и существенно снижает надежность регистрации всех актов АЭ, приходящих на приемные ПАЭ.

Двухэтапная кластеризация представляет собой совместное применение данных методов анализа. В соответствии с предлагаемой методикой на первом этапе проводится кластеризация по основным параметрам, на втором – результаты кластеризуют по цифровой форме. При обработке АЭ данных, зарегистрированных при испытаниях образцов и элементов конструкций, было получено, что при выполнении анализа в такой последовательности повышается точность (по сравнению с выполнением только параметрической кластеризации) и сокращается время обработки (в сравнении с кластеризацией, осуществляемой по цифровой информации о сигналах).

На рисунке 4.2,*а* приведена локационная картина актов АЭ при контроле стыкового сварного шва стали, где видно, что большой поток сигналов АЭ не позволяет выделять источники, в которых начинают развиваться дефекты. После же кластерного анализа по цифровой форме сигналов АЭ, представленного на рисунке 4.2,*б*, можно выделить кластеры, связанные с процессами формирования напряженного состояния в области наличия вставок из титана и дюралюминия, имитирующих дефект сварки.

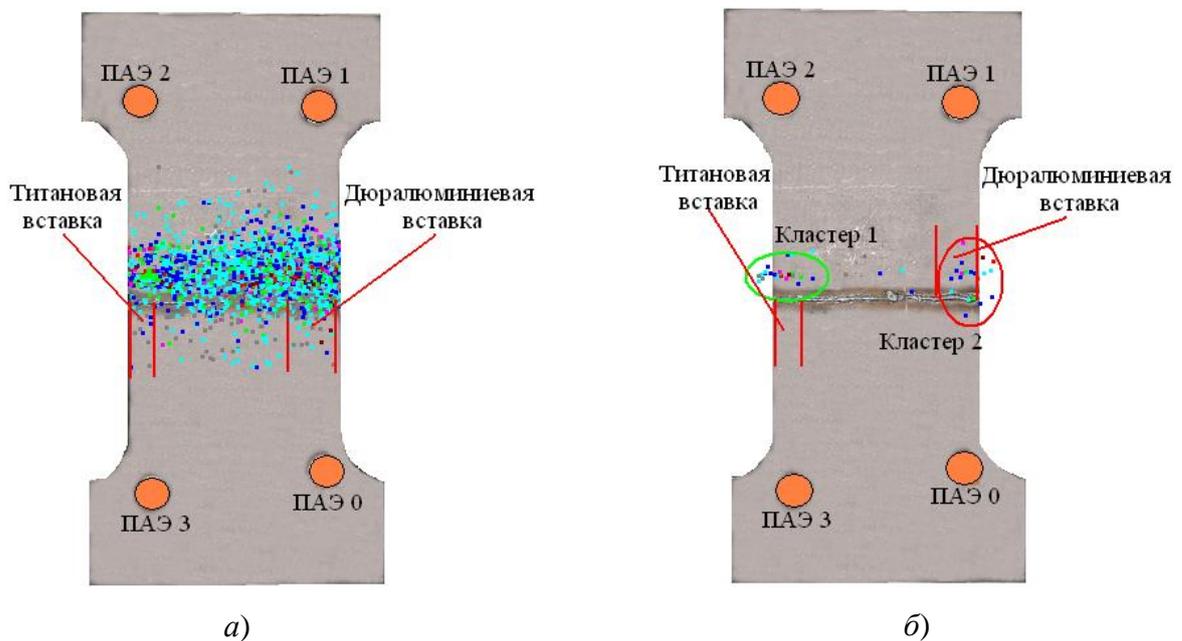


Рисунок 4.2 – Локация кластеров сигналов АЭ разными способами в образцах с внедрением в участок сварки титановых и дюралюминовых вставок: *а* – до кластеризации;

б – после кластеризации

Анализ применения кластеризации показывает, что использование в качестве критерия основных несущих информацию характеристик приводит к повышению числа кластеров в несколько раз, по сравнению с кластеризацией по оцифрованной форме сигналов. Это, в какой-то степени приводит к повышению риска ошибки первого рода при реакции системы на совокупность полученных данных об источниках АЭ в сварном соединении без дефектов.

Повышение надежности определения потенциальной опасности источников, выявленных кластеризацией по оцифрованной форме, применяет принцип сравнения медианы $(\zeta_{1/2})_0$ распределения энергии сигналов АЭ с медианой распределения энергии внутри каждого кластера $(\zeta_{1/2})_J$ [36]. Тогда условие обнаружения опасного источника формулируется в виде, приведенном в [79]:

$$(\zeta_{1/2})_J > (\zeta_{1/2})_0.$$

В случае же оценки состояния объекта при кластеризации по основным информативным параметрам правило обнаружения потенциально опасных источников формулируется как:

$$(\zeta_{1/2})_J > M \cdot (\zeta_{1/2})_0, \quad (4.1)$$

где M – изменяемый коэффициент для порогового уровня по энергии сигналов АЭ.

Величина коэффициента M оценивалась по экспериментальным данным, полученным при сварка четырех образцов из стали Ст3. Два из четырех образцов сваривались с имитацией дефектов за счет внедрения в сварной шов вставок из титана и дюралюминия. Количество кластеров характеризует отношение $N = n_{нар}/n_{об}$ числа идентифицированных кластеров по параметрам сигналов АЭ ($n_{нар}$), для которых выполняется условие (4.1), к числу идентифицированных кластеров ($n_{об}$) во всем образце за все время испытания.

Зарегистрированные АЭ сигналы с каждого образца со сварным швом подвергли кластеризации по основным параметрам сигналов. Для всех образцов были получены кривые связи числа кластеров с коэффициентом порогового уровня K (рисунок 4.2). Образцы, в которых не было обнаружено дефектов сварки другими методами контроля, имели связь между числом кластеров и параметром K по кривым 1 и 2 на рисунке 4.3.

Внедрение в сварное соединение в процессе сваривания закладок из титана и дюралюминия повлияло на кривые связи числа кластеров с параметром K (кривые 3 и 4 на рисунке 4.3) и привело к их смещению. Анализ показал, что в кластерах, полученных при кластеризации по основным информативным характеристикам сигналов, не получается исключить часть ложных кластеров при сравнении их по формуле (4.1). Однако значительная часть таких кластеров была исключена из рассмотрения в данном диапазоне значений коэффициента порогового уровня M .

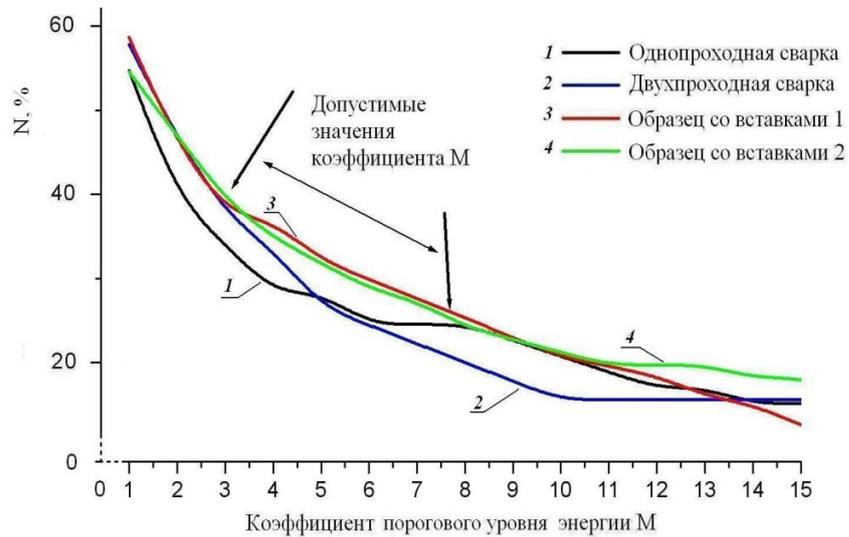


Рисунок 4.3 – Зависимость числа выделенных кластеров от изменяющегося коэффициента порогового уровня энергии M при однопроходной (1) и двухпроходной (2) сварках

На рисунке 4.4,*а* представлена локационная картина идентифицированных кластеров, которые были получены при кластеризации по основным параметрам сигналов АЭ, а на рисунке 4.4,*б* – локационная картина кластеров по оцифрованной форме.

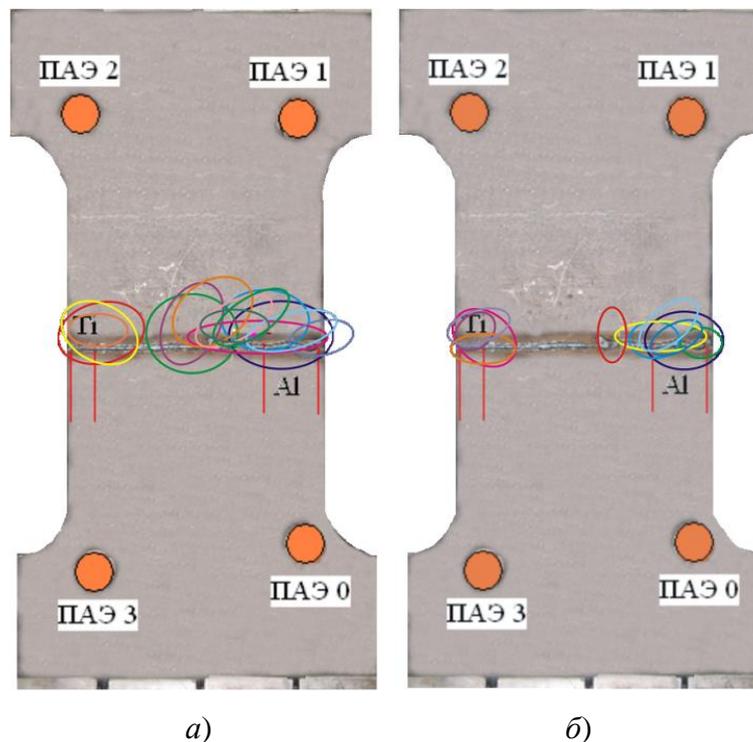


Рисунок 4.4 – Вид кластеров сигналов АЭ на образце с инородными вставками: *а*– после кластеризации по информативным параметрам; *б* – после кластеризации по оцифрованной форме сигналов

Для повышения надежности идентификации опасных источников АЭ была предложена методика двухэтапной кластеризации. На рисунке 4.5 схема описывает реализацию алгоритма анализа по данной методике. Повышения качества идентификации дефектных участков было экспериментально подтверждено при проведении записи информации в процессе полуавтоматической сварки образцов размером 600x495x8 мм, выполненных из стали Ст3.

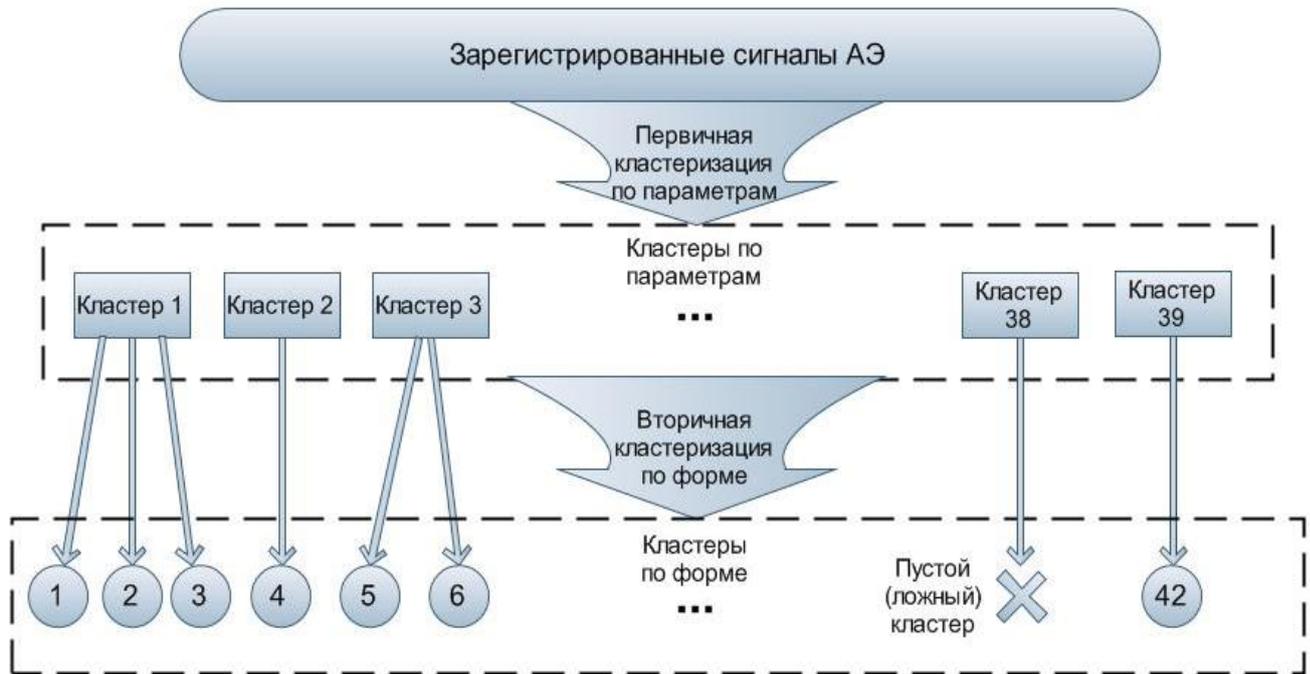


Рисунок 4.5 – Структурная схема двухэтапной кластеризации

При кластеризации по цифровой форме для образца, в котором имитировался непровар за счет уменьшением силы сварочного тока, было обнаружено 56 кластеров, содержащих 708 сигналов АЭ. Время обработки составило 118 минут (таблица 4.1).

При кластеризации по цифровой форме для образца с введенными вставками из титана и дюралюминия потребовала 107 мин. В процессе анализа выделено 134 кластера, содержащих 1670 сигналов АЭ. Затем эта же информация обрабатывалась с использованием двухэтапной кластеризации. При первичной кластеризации по основным информативным параметрам было сформировано 39 кластеров, содержащих 1451 сигнал, а время обработки сократилось до 34 с. Затем после вторичной кластеризации по цифровой форме было получено 17 кластеров, причем, в каждом из них находилось от 1 до 4 кластеров по цифровой форме.

При выполнении двухэтапной кластеризации для АЭ-сигналов, зарегистрированных при выполнении сварки с непроваром, за счет уменьшения силы тока при сварке и было получено 44 кластера по цифровой форме, содержащих 369 сигналов АЭ, локализованных в зоне сварного шва (таблица 4.1). Суммарное время двухэтапной кластеризации составило 37 с.

Исключение составили четыре кластера, в которых были сигналы с большой погрешностью локации [36].

В половине кластеров, образованных в процессе кластеризации по информативным параметрам, не обнаружено кластеров по цифровой форме. Почти все подобные «ложные» кластеры были локализованы в зонах, сваренных с соблюдением технологии сварки. Три кластера (3, 10, 14), полученных при обработке сигналов АЭ по основным параметрам, локализовались в области сварного шва в стороне от вставок и при этом содержали источники сигналов АЭ, выявленные вторичной кластеризацией.

Таблица 4.1 – Обобщенные результаты реализации разных схем кластеризации при идентификации дефектов сварки

Способ кластеризации	Количество кластеров	Количество сигналов АЭ	Время обработки, с
По цифровой форме для образца с введенными вставками.	134	1670	6420,0
По цифровой форме для образца с непроваром.	56	708	7080,0
Двухэтапная кластеризация для образца с введенными вставками.	39	1451	34,0
Двухэтапная кластеризация для образца с непроваром.	44	369	37,0

Проверка на однородность для результатов кластеризации по основным параметрам выделила 10 кластеров, из них 8 локализовались в месте образования непровара. Три из этих кластеров также прошли проверку по формуле (4.1) на уровень энергии сигналов АЭ. Время регистрации сигналов из этих кластеров совпадало со временем сварки участка шва с имитацией непровара. Сигналы из остальных кластеров, прошедших проверку на однородность, регистрировались во время остывания участка сварного шва, сваренного пониженной силой тока.

Рассмотрены данные, полученные при АЭ-контроле образцов из углепластика. Для анализа были выбраны сигналы АЭ зарегистрированные в начале испытаний (N_1), при появлении видимых расслоений монослоев (N_2) и в момент их активного разрушения (N_3). При кластеризации по оцифрованной форме в расчетах были использованы только локализованные сигналы АЭ. Это позволило сократить время выполнения анализа. Однако и при данных параметрах время кластеризации по оцифрованной форме сигнала в среднем в 100 раз больше, чем при двухэтапной кластеризации. При этом число полученных кластеров сокращается в 10 раз.

Для анализа результатов двухэтапной кластеризации были выбраны сигналы АЭ, соответствующие нагружению образца 1 группы 3 до 3000 циклов. На первом этапе кластеризации было получено 49 кластеров, в которые были помещены 3944 сигналов из 14600 (рисунок

4.6). Полученные кластеры были расположены в области верхнего и нижнего захвата и в области отверстия, являющегося концентратором напряжения. При этом сигналы от отверстия были локализованы близко и распространялись в вертикальном направлении.

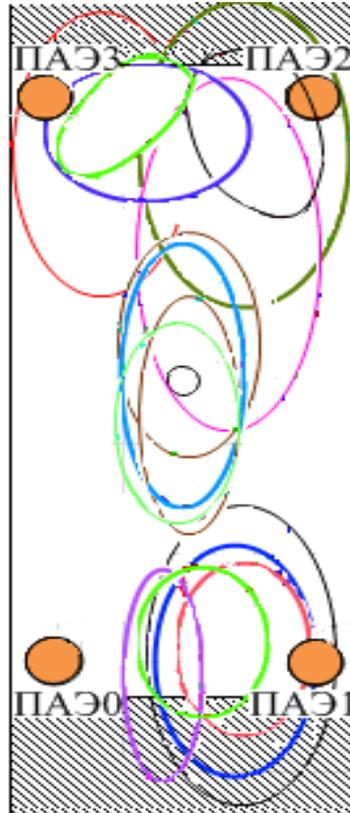


Рисунок 4.6 – Расположение кластеров сигналов АЭ при испытании образца 1 группы 3 после первого этапа кластеризации

В результате первого этапа кластеризации были определены группы сигналов АЭ, объединенных по локации и ряду параметров. На следующем этапе выполнялась кластеризация по оцифрованной форме сигнала с коэффициентом взаимной корреляции 0,6 формы сигналов, и обработка выделила 82 кластера. После завершения второго этапа кластерного анализа, кластеры, выделенные на основании анализа основных параметров, были разделены на несколько более мелких. Двухэтапная кластеризация уменьшает полное время выполнения анализа в несколько раз по сравнению с кластеризацией по оцифрованной форме.

Самое большое число сигналов было кластеризовано от отверстий под захваты. При кластеризации на первом этапе сигналы из области отверстия были введены в кластеры 5, 6, 7. В этих кластерах соответственно было идентифицировано 193, 184 и 176 сигналов. После второго этапа обработки по оцифрованной форме сигналов дополнительно были идентифицированы кластеры 4 (из кластера 5), 10 (из кластера 6) и 13 (из кластера 7), представленные на рисунке 4.7. Появление нескольких кластеров из области захвата логично, так как в ней происходит несколько различных процессов деформирования, например, пластическая деформация сжатия

в месте давления захвата на отверстие, пластическая деформация растяжения сбоку от отверстия, трение захватного валика об образец и т.п.

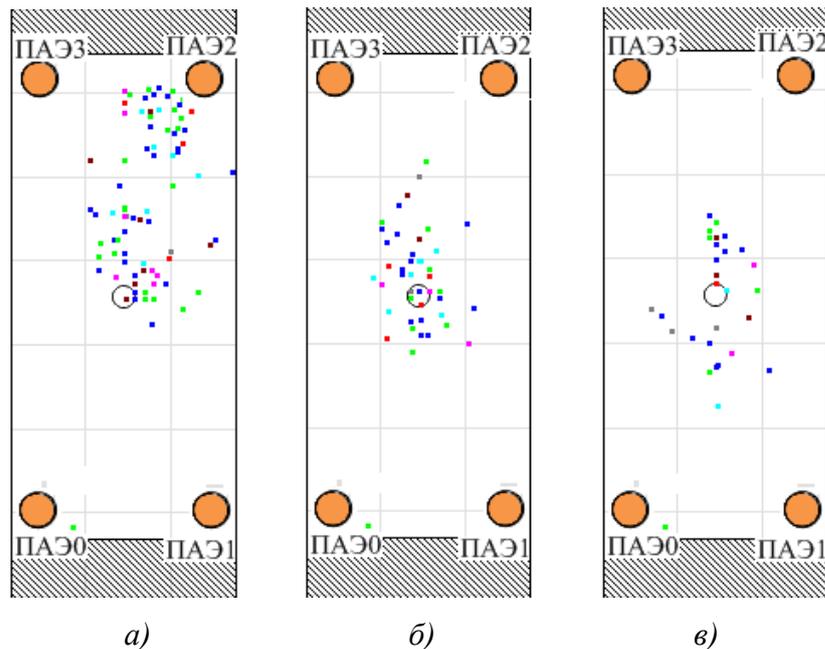


Рисунок 4.7 – Локация сигналов АЭ кластеров 4 (а), 10 (б) и 13 (в) после двухэтапной кластеризации

Анализ накопления сигналов в процессе испытаний приведен на рисунке 4.8. Рост суммарного счета сигналов разных кластеров стартовал в разные моменты времени. Например, сигналы, принадлежащие кластеру № 4, генерировались источником в течение всего времени циклических испытаний, а сигналы кластера № 10 начали генерироваться примерно через 1250 циклов после начала испытаний и продолжали регистрироваться также до конца испытаний. После 1500 циклов нагружения стал активным кластер № 13. Такое поведение источников во времени может свидетельствовать о различных механизмах разрушений образца. Следует заметить, что после нагружения 1500 циклами было обнаружено расслоение в зоне кромки отверстия на образце.

После нагружения 3000 циклов появились новые кластеры, всего 72, при этом 40 из них отнесены к области отверстия. На рисунке 4.9 показано изменение суммарного счета сигналов первых четырех кластеров. При этом регистрация сигналов из кластеров № 1-4 наблюдали с начала временного интервала.

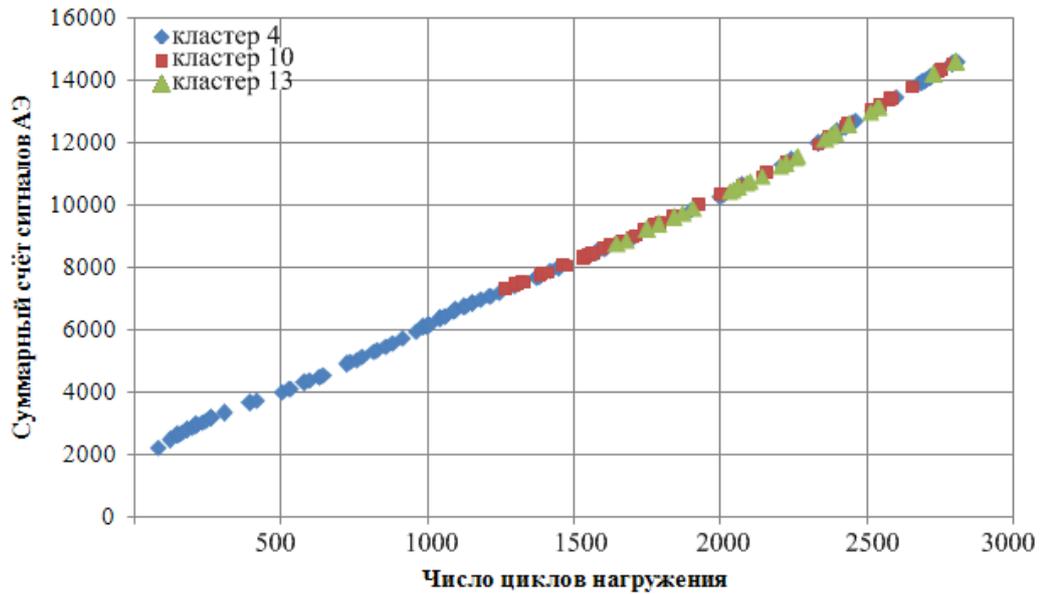


Рисунок 4.8 – Суммарный счет сигналов АЭ кластеров 4, 10 и 13 ($N_1=(0\dots3000)$)

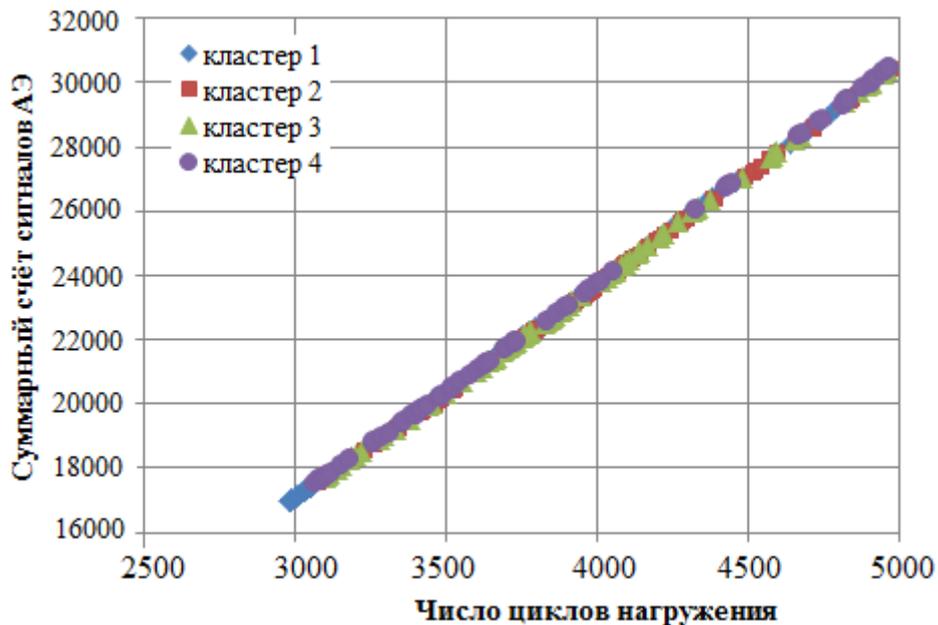


Рисунок 4.9 – Суммарный счет сигналов АЭ 1 – 4 кластеров ($N_2=(3000\dots5000)$)

Анализ кластеризованных сигналов показал, что они были локализованы в области (рисунок 4.10), соответствующей распространению расслоения в данном образце от отверстия вертикально вверх. При этом особенностью кластеров 1 и 2 являлось наличие большого числа сигналов с максимальной амплитудой и их близкой локацией к отверстию. В то время как сигналы кластеров 3 и 4 имели меньшую амплитуду и соответствовали распространению расслоения.

Третий рассматриваемый интервал соответствовал моменту перед полным разрушением образца. Число циклов нагружения составляло $N_3=(23500\dots25500)$. На данном этапе испытаний наблюдались расслоения по всей длине образца, а также были слышны трески. Анализ

результатов кластеризации показал, что в кластеры 1, 3, 4 было отнесено наибольшее число сигналов АЭ, локализованных в области отверстия.

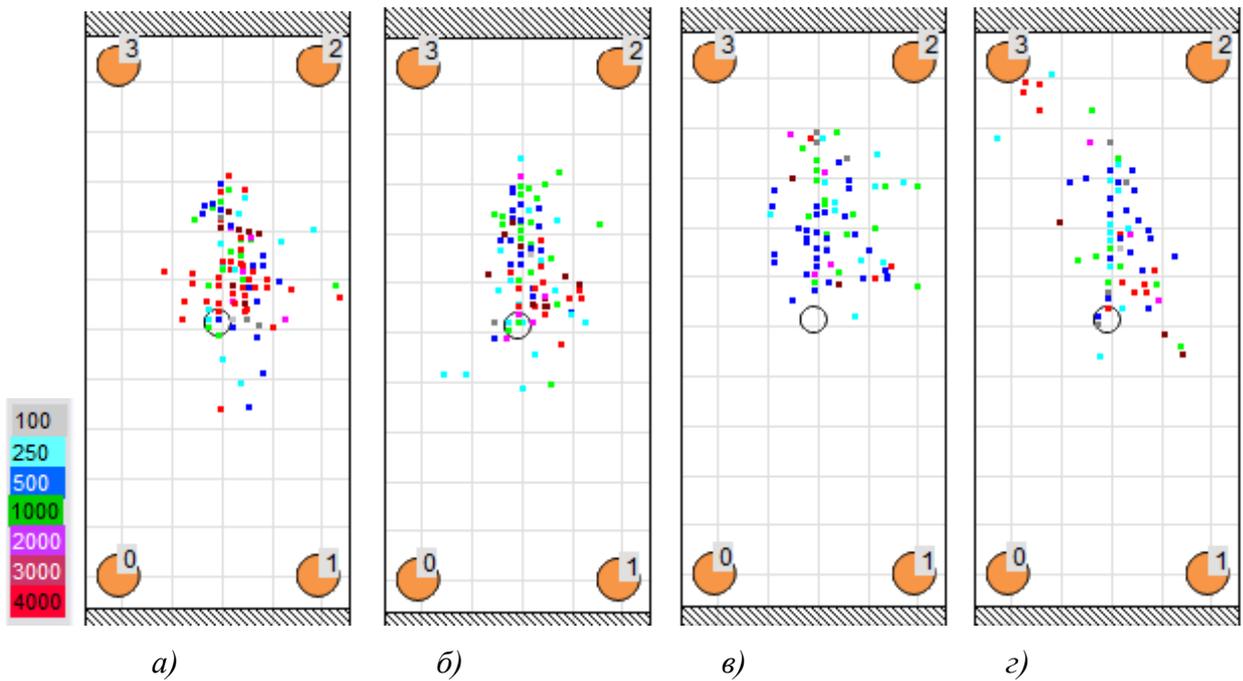


Рисунок 4.10 – Локация сигналов АЭ кластеров 1 (а), 2 (б), 3 (в) и 4 (г) после двухэтапной кластеризации

Сигналы кластера 1 были зарегистрированы в процессе всего рассматриваемого интервала (рисунок 4.11). Двухэтапная кластеризация позволяет разделять сигналы АЭ по источникам, соответствующим развитию дефектного участка в области концентратора, выполненного в виде отверстия и из области взаимодействия образца с захватом. При этом время, затраченное на двухэтапный кластерный анализ, существенно сократилось, а точность локации источников уменьшилась незначительно.

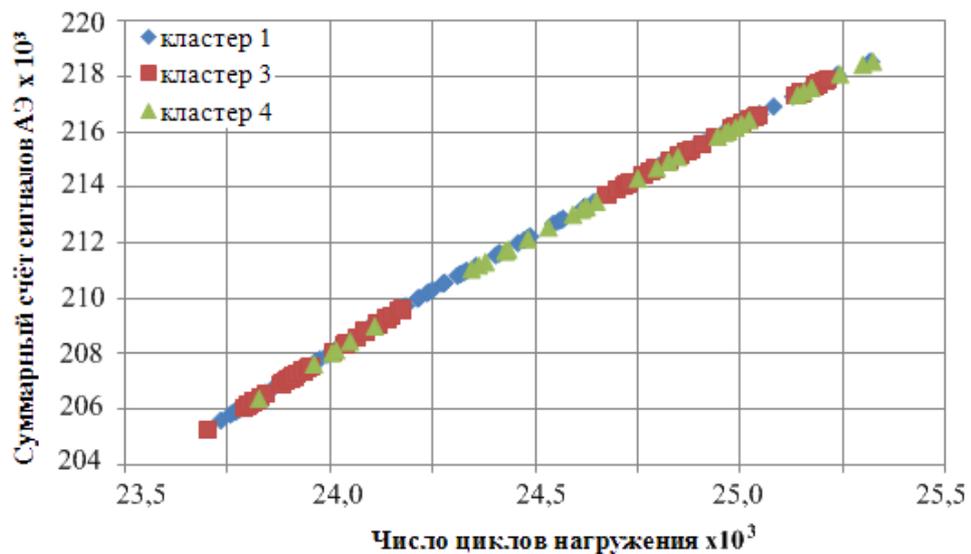


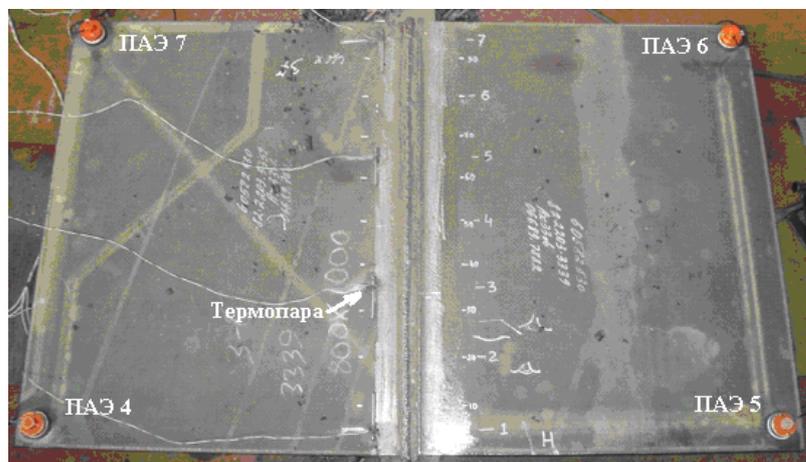
Рисунок 4.11 – Суммарный счет сигналов АЭ кластеров 1, 3, 4 (число циклов $N_3=(23500\dots25500)$)

4.2 Методика выявления дефектов в процессе многопроходной сварки

Для повышения надежности и достоверности контроля дефектов сварки необходимо проводить разработку более совершенных методик фильтрации и обработки результатов измерения регистрируемой информации. В ОАО «ПО «Севмаш» была проведена многопроходная сварка образцов из стали для обшивки судов размерами 1000x800 мм с V-образной разделкой [2, 6]. Использовалась АЭ-система СЦАД-16.10 с реализацией «плавающего» порога выделения сигналов из шумов. Частота оцифровки сигналов АЭ изменялась программно от 1 до 8 МГц, а включение режима «плавающих» порогов существенно снижает вероятность работы системы в насыщенном режиме. Порог чувствительности каналов определялся с использованием встроенного электронного имитатора. Для записи сигналов АЭ использовали широкополосные ПАЭ типа ПК 02-05, имеющие полосу пропускания (0,2 - 0,5) МГц и подключенные к соответствующим предварительным усилителям измерительных каналов АЭ-системы.

В этом эксперименте дефектные участки получали путем внедрения в сварной шов тугоплавких металлических вставок (титан, вольфрам), а также за счет формирования шлаковых включений и непровара, полученных при нарушениях режимов сварки. В процессе сварки образца было выполнено 35 проходов. При этом АЭ-информация непрерывно записывалась системой, как в процессе сварки, так и при остывании сварного шва.

На рисунке 4.12, *а* изображен вид образца, подвергнутого сварке. На рисунке 4.12, *б* приведена локация сигналов АЭ во время выполнения третьего прохода. Локация была получена в режиме реального времени при внедрении в сварной шов непосредственно в процессе сварочного процесса первой титановой вставки, эту операцию произвели на участке, находящемся в 50 мм от края образца. На рисунке 4.12, *в* приведен источник сигналов АЭ с, определенный системой СЦАД-16.10 координатой максимума, равной 53 мм [4].



а)

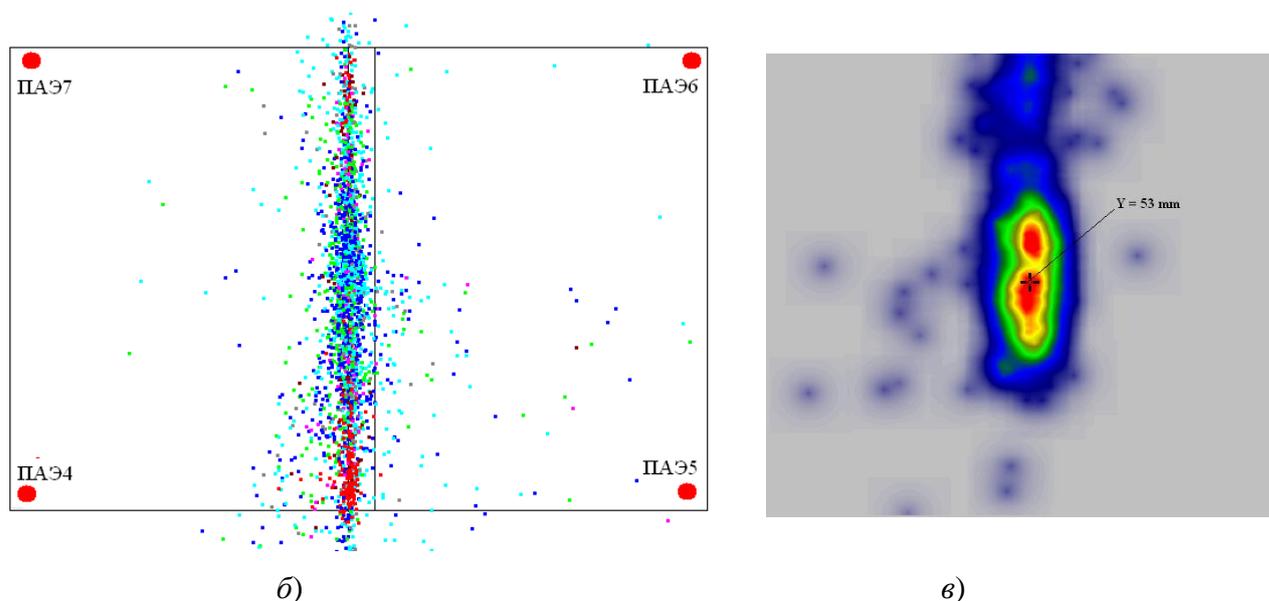


Рисунок 4.12 – Стальной образец перед испытаниями с установленными ПАЭ (а); локация сигналов АЭ во время выполнения третьего прохода (б) и координаты расположения первой титановой вставки (в)

В таблице 4.2 приведены основные информативные параметры сигналов АЭ, зарегистрированных при различных вставках.

Таблица 4.2 – Основные несущие информацию характеристики сигналов АЭ, зарегистрированные при различных вставках в процессе сварки

№ про-хода	Вид дефекта	Число сигналов АЭ от источника	Средняя амплитуда, мВ	Координата по длине шва, определенная методом АЭ, мм	Основная частота, кГц	Скорость нарастания переднего фронта, мкс
3	Первая титановая вставка	590	104,5	53	90	95
6	Вольфрамовая вставка	488	76,0	213	125	95
9	Шлаковая вставка	620	103,0	322	130	(80-170)
12	Непровар	352	102,6	491	100	(40-180)
16	Вторая титановая вставка	328	84,1	653	130	120
20	Контрольная титановая вставка	395	85,8	809	125	(100-150)

Анализ данных таблицы 4.2 позволяет отметить, что координаты локации максимумов, полученные методом АЭ, достаточно близки к зонам реального расположения вставок в сварном шве. Минимальное отклонение максимума локации первого дефектного участка (в отличие

от реального местоположения) отличается в пределах от 3 до 47 мм. Наибольшее отклонение вызвано особенностями локации сигналов АЭ при оценке различными методами определения времени прихода сигналов АЭ.

При выполнении двенадцатого прохода на расстоянии 500 мм была заложена вставка, имитирующая непровар. На рисунке 4.13, *а* показана локационная картина, полученная во время этого прохода. На месте этой вставки проявился источник сигналов АЭ с координатой максимума амплитуды, равной 491 мм (рисунок 4.13, *б*). Максимум суммарной амплитуды составил более 36 000 мВ.

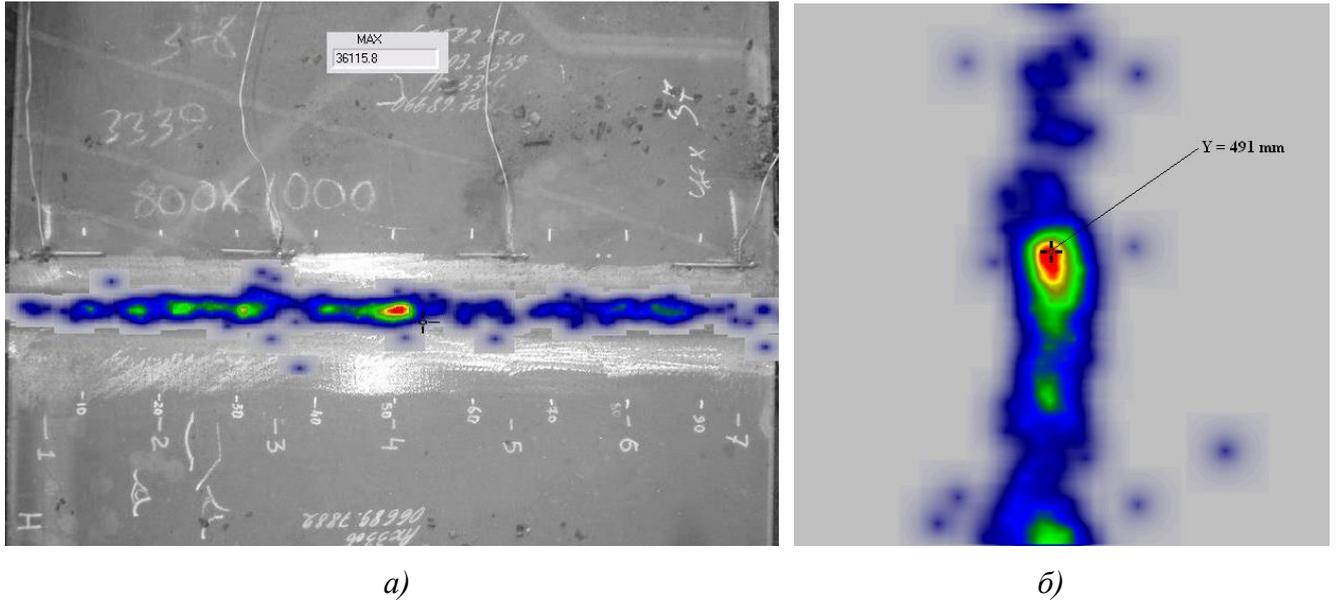


Рисунок 4.13 – Локация сигналов АЭ с отображением распределения суммарной амплитуды вдоль сварного шва после прохода № 12 (*а*) увеличенная область локации с указанием координаты расположения непровара (*б*)

Во время шестнадцатого прохода на расстоянии 750 мм была заложена вторая титановая вставка. Локационная картина показана на рисунке 4.14, *а*. Область локации с указанием координаты максимума амплитуды протяженного источника, равной 653 мм, приведена на рисунке 4.14, *б*. Максимум суммарной амплитуды составил более 27 587 мВ.

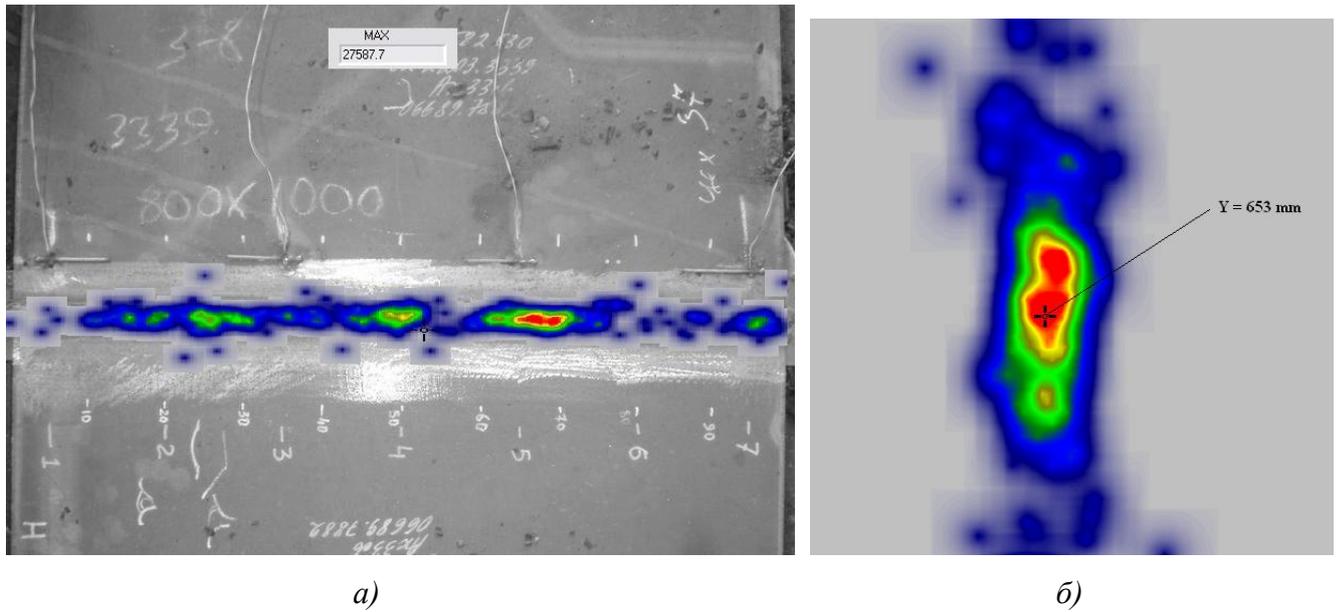


Рисунок 4.14 – Локация сигналов АЭ с отображением распределения суммарной амплитуды вдоль сварного шва после прохода № 16 (а) и выделенная область локации с указанием координаты расположения второй титановой вставки (б)

На проходах 13-15 сварного шва, также проявлялись незначительные источники сигналов АЭ в районе имитации непровара и в конце шва на расстоянии 915 мм. На проходах 17-19 сварного шва проявлялись незначительные источники сигналов АЭ в районе второй титановой вставки.

Во время двадцатого прохода была заложена неизвестная вставка. На рисунке 4.15 показана локационная картина, полученная во время этого прохода. На месте этой вставки проявился протяженный источник сигналов АЭ с координатой максимума амплитуды, равной 809 мм. Максимум суммарной амплитуды составил более 33909 мВ.

Следует отметить, что на проходах 21-28 сварного шва этот источник проявлялся на локационных картах с параметрами, указанными в таблице 4.2. После проведения УЗ-контроля процесс сварки на последующих проходах с 21 по 35 выполнялся без внесения вставок в сварной шов. Следует отметить повторение появления источников с малой амплитудой на расстоянии около 250 мм от начала сварного шва.

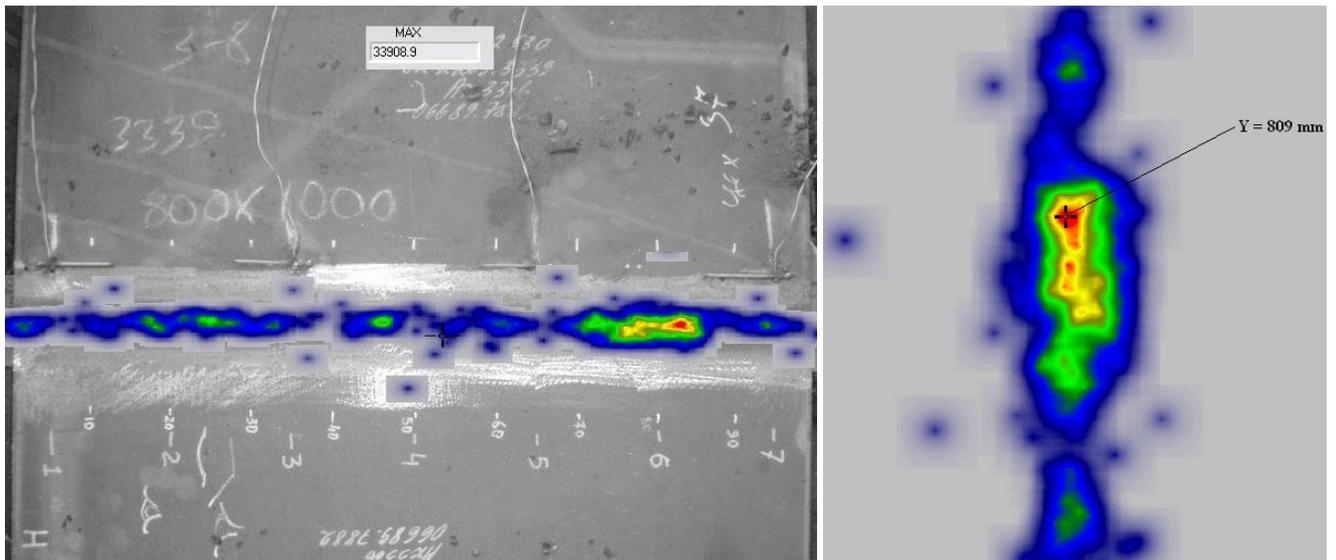


Рисунок 4.15 – Локация сигналов АЭ с отображением распределения суммарной амплитуды вдоль сварного шва после прохода № 20 (а) и область локации с указанием координаты расположения «неизвестной» вставки (б)

Модифицированный пороговый метод определения времени прихода сигналов АЭ основан на подсчете числа превышений сигналом установленного порогового уровня $A_{пор}$ в следующем диапазоне:

$$T_{OK}^0 < t < T_{OK}^0 + \Delta T_{OK},$$

где T_{OK}^0 – начало скользящего по оцифрованной форме сигнала временного «окна»;

ΔT_{OK} – ширина временного «окна».

Пороговый уровень $A_{пор}$ рассчитывался с учетом уровня шума в предыстории сигнала АЭ. Если число переходов через этот уровень в «окне» превышает заданную величину ξ , то время прихода сигнала полагается равным T_{OK}^0 . При использовании способа сравнения параметров сигнала в двух временных окнах начало сигнала может определяться с запаздыванием, а пороговый метод [6, 79, 96], напротив, часто приводит к ошибке первого рода, когда за начало сигнала принимается отдельный шумовой выброс в области его предыстории. Метод определения СКО во временном «окне» основан на вычислении величины СКО сигнала от среднего значения. За момент начала сигнала принималось время превышения этой величиной установленного порогового уровня $A_{пор}^{СКО}$.

На рисунке 4.16 приведена локация сигналов АЭ в области расположения первой титановой вставки с использованием различных методов определения их времени прихода. Модифицированный пороговый (рисунок 4.16, а) и способ сравнения параметров сигнала в двух временных окнах показали одинаковую точность в определении координаты первой

титановой вставки. Применением способа расчета координат по СКО в «окне» (рисунок 4.16, б) получена максимальная погрешность. Следует отметить, что использование способа сравнения параметров сигнала в двух временных окнах (рисунок 4.16, в) привело к разделению области локации от первой титановой вставки на две отдельные части.

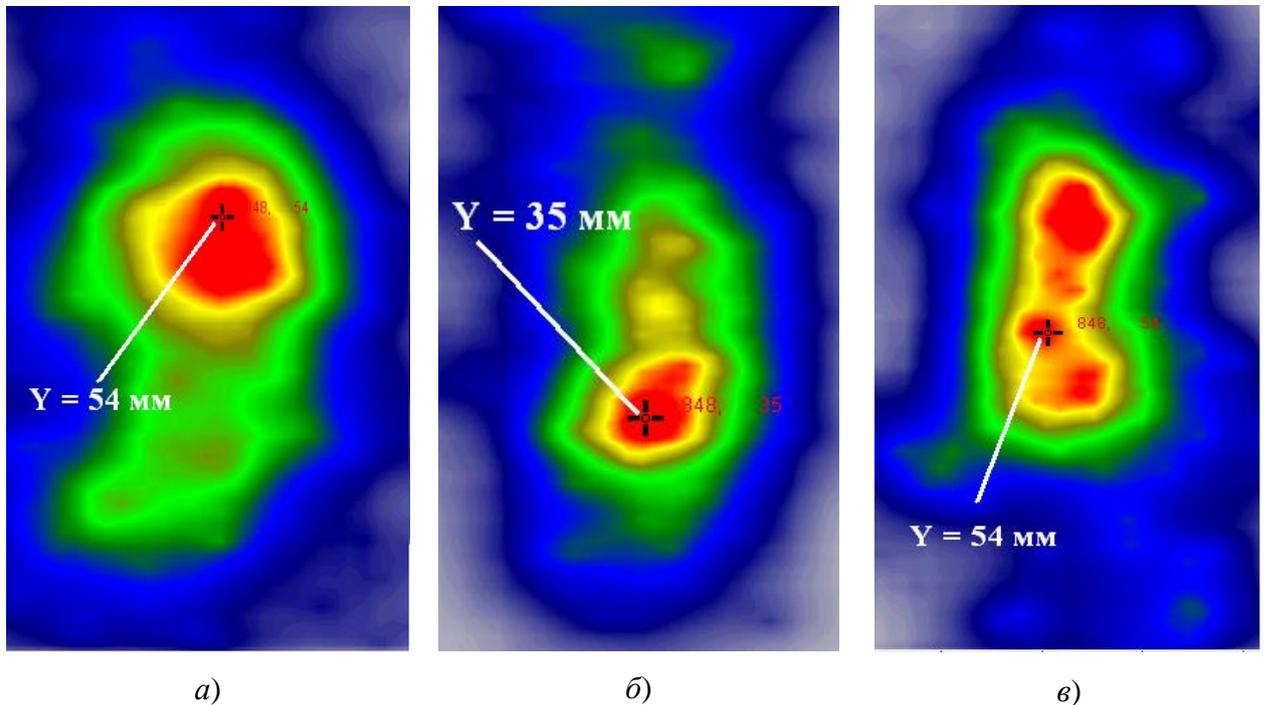
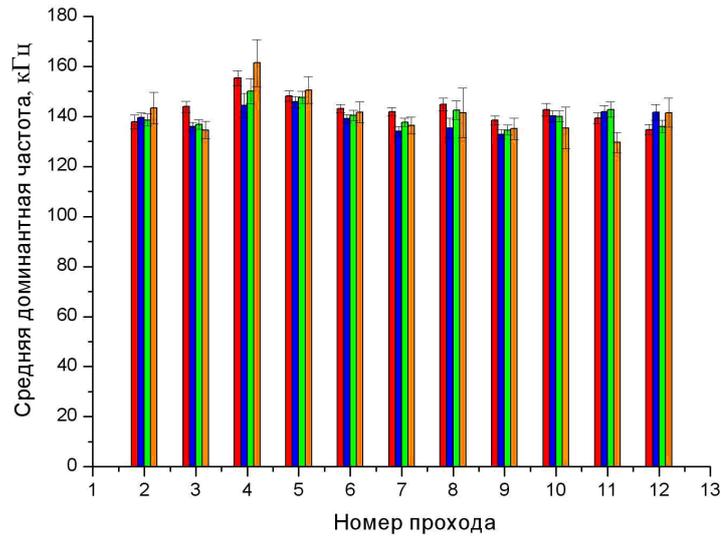


Рисунок 4.16 – Локация сигналов АЭ в области расположения первой титановой вставки пороговым способом (а); оконным способом расчета СКО (б); способом сравнения параметров сигнала в двух временных окнах (в)

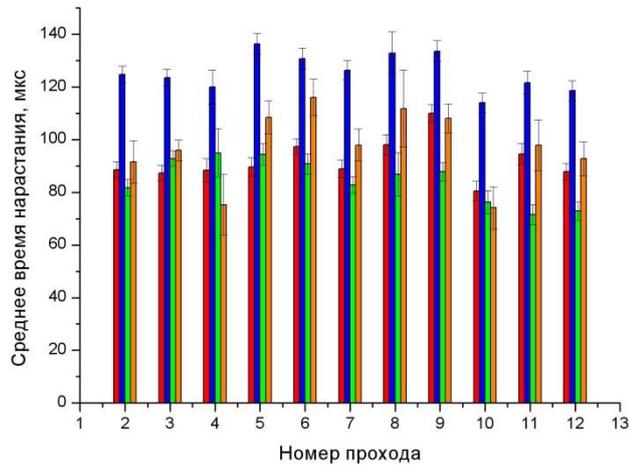
При проходе 2 в сварной шов вставки не вводились. Поэтому он был принят за эталонный, а параметры сигналов АЭ, зарегистрированных в процессе сварки, считались параметрами, характеризующими качественную сварку.

Во время 3 прохода в сварной шов была введена первая титановая вставка. Рассматривались сигналы, локализованные различными методами в месте расположения первой титановой вставки во время наложения проходов (3...12), что позволило изучить картину ее влияния на изменения состояния сварного шва во времени (рисунок 4.16).

Для этого использовали сигналы, от локализованных источников, применяя три способа определения времени прихода сигнала АЭ (рисунок 4.17, рисунок 4.18). На всех диаграммах первый столбец соответствует двухинтервальному способу, второй – пороговому способу, третий – способом изменения СКО во временном окне конечного размера, четвертый – сигналам, локализованным в соответствующей зоне сварного шва с комбинированием трех перечисленных способов определения времени прихода для каждого сигнала АЭ.



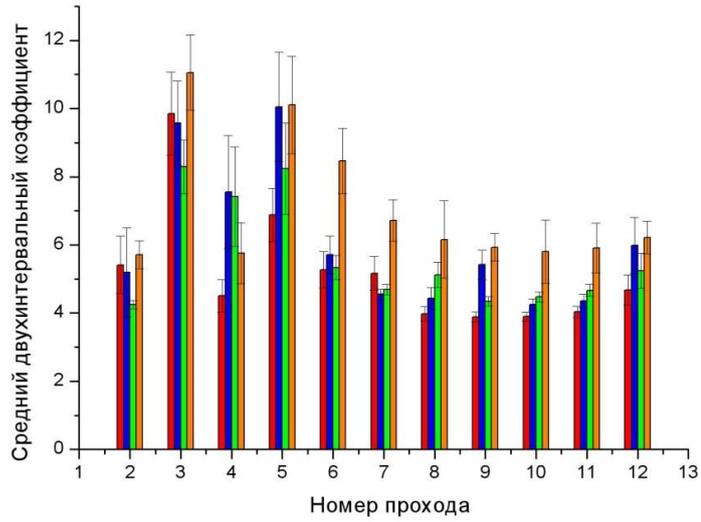
а)



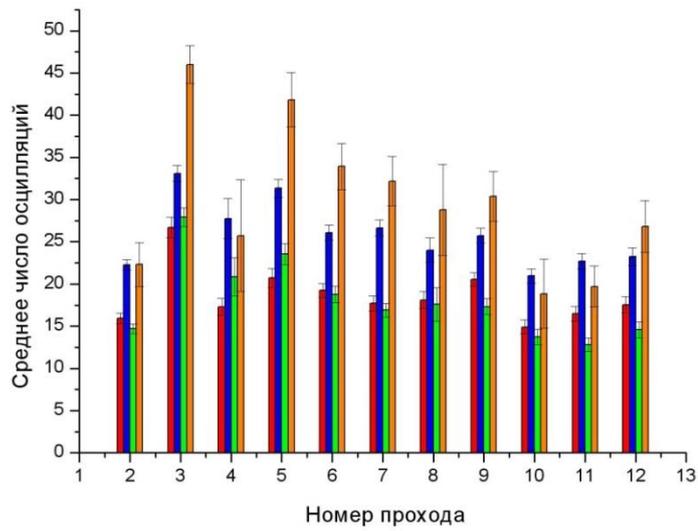
б)

Рисунок 4.17 – Зависимость средней доминантной частоты (а) и времени нарастания переднего фронта (б) сигналов АЭ от номера прохода сварки, не отразившие наличие дефекта

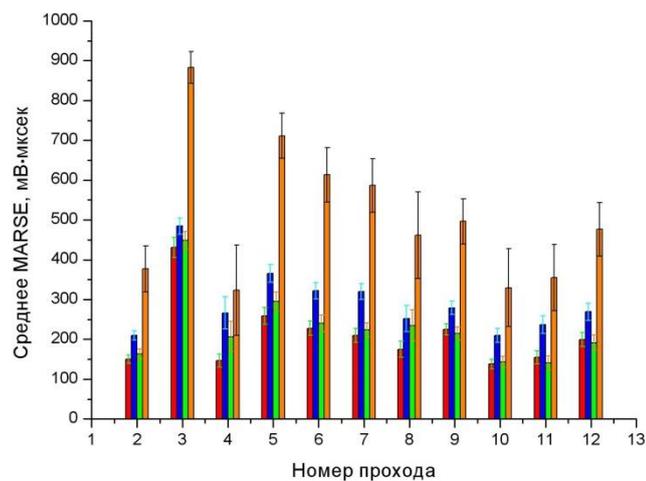
Параметры «доминантная частота» и «среднее время нарастания сигнала АЭ» практически не изменились (рисунок 4.17). Поэтому в дальнейшем при диагностике дефектов многопроходной сварки эти параметры не использовались. Параметры «двухинтервальный коэффициент», «число осцилляций» и энергетический параметр «MARSE» существенно увеличились (рисунок 4.18).



а)



б)



в)

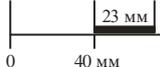
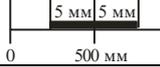
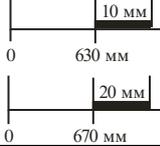
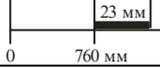
Рисунок 4.18 – Зависимость двухинтервального коэффициента (а), числа осцилляций переднего фронта (б), коэффициента $MARSE$ (в) от номера прохода, отразившие наличие дефекта

Больше всего изменились средние значения для сигналов, локализуемых в зоне введения первой титановой вставки с использованием всех методов определения времени прихода сигналов АЭ. Они отличались высоким уровнем энергии регистрируемого сигнала АЭ.

При выполнении последующих проходов сварного шва сигналы от первой титановой вставки вновь характеризовались высокой энергией и высоким уровнем трех отмеченных выше «значимых» параметров. Отличия значений параметров сигналов от зарегистрированных на проходе 2 постепенно уменьшались. Параметры сигналов АЭ во время 10 и 11 проходов при формировании сварного шва близко совпадали с параметрами сигналов во время второго прохода. При семи последовательных проходах накладываемого шва регистрировали сигналы из области внедрения первой титановой вставки. При этом сигналы от дефектного участка выделяются по «двухинтервальному коэффициенту», «числу осцилляций» и «MARSE».

Контроль качества многопроходной сварки осуществляют ультразвуковым или радиографическим методами. Однако эти методы можно реализовать только на уже остывших сварных соединениях, в то время как АЭ метод позволяет выявлять дефекты непосредственно в момент сварки, что очень важно при контроле многопроходной сварки. Для оценки возможности реализации методики браковки дефектов в процессе многопроходной сварки АЭ методом сопоставляли результаты АЭ и традиционных методов (таблица 4.3) за счет формирования в сварном шве некоторых типовых дефектов, присущих сварным соединениям [75].

Таблица 4.3 – Определение координат дефектов методами АЭ, УЗ и радиографического контроля (РГК)

Номер прохода	Вид вставки	Координаты дефектов, определенные методами НК, мм			
		Число сигналов АЭ	Ультразвуковой контроль		Радиографический контроль
			Эскиз расположения дефекта	Результаты контроля	
3	Первая титановая	53		ДБ-22-24-23	2Ш8×2; Ш30×4,2;Тр8÷20
6	Вольфрамовая	213		Д-24-26-5	3П1÷2
9	Шлаковая	322		А-32-24-5	В20×4
12	Непровар	491		А-32-24-5 А-34-13-5	5Ш1÷7;2П1,5; 2Н4÷7
16	Вторая титановая	653		А-34-10-10 А-30-12-20	12П0,6÷1,5; 3Ш2÷6
20	Контрольная титановая вставка	809		Б-34-10-23	3Тр7÷20

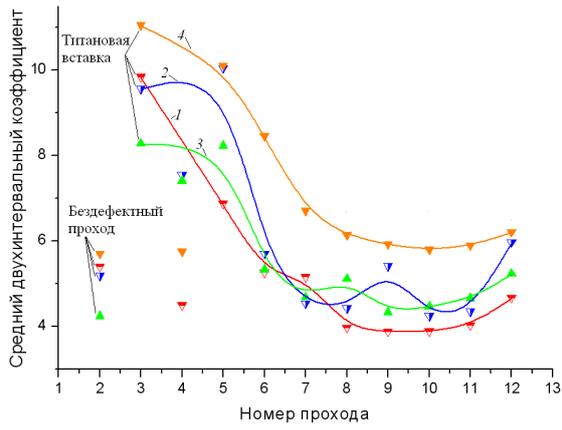
4.3 Определение дефектов сварки по распределению характеристик сигналов акустической эмиссии

Как показано в работе [75], формирование некоторых дефектов сварки приводит к повышению амплитудных параметров сигналов дискретной АЭ. Однако использовать эти параметры как надежные нельзя, тем более на этот счет нет адекватной модели. Поэтому для отработки методики обнаружения дефектов, формируемых непосредственно в процессе многопроходной сварки, использовали статистические методы обработки зарегистрированных сигналов АЭ [91, 98, 103].

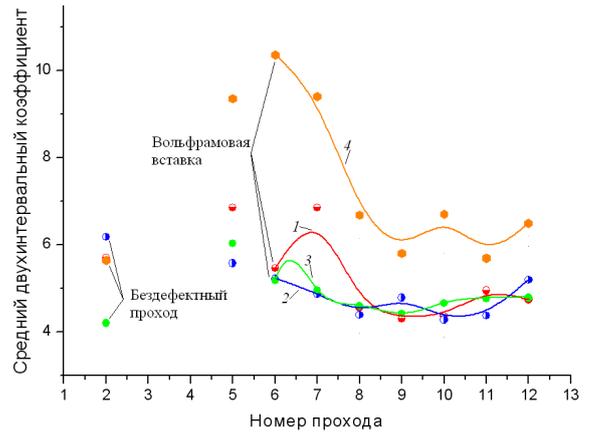
Локацию сигналов АЭ осуществляли также при помощи определения двухинтервального коэффициента $K(t)$, а время прихода сигнала на приемный ПАЭ в этом случае принимали равным моменту времени, в который этот коэффициент достигал максимального значения, при этом $K(t)$ рассчитывали по формуле (3.13) [30].

В процессе испытаний было установлено, что коэффициент $K(t)$ сигналов АЭ изменяется при прохождении сварочной дуги в области вольфрамовой и титановой вставок. Но наиболее чувствительными к появлению дефектов в формирующемся сварном шве были среднее число осцилляций по переднему фронту и $MARSE$. Энергетический параметр $MARSE$ сигналов АЭ наиболее явно увеличился во время 6 прохода сварочной дуги, когда вводили вольфрамовую вставку.

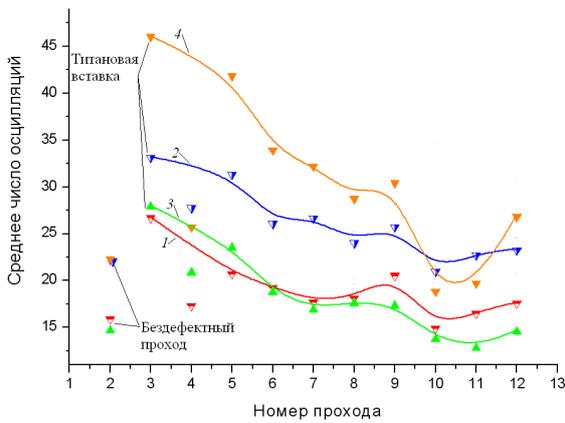
Число осцилляций заметно возросло при следующем проходе сварочной дуги, когда зона нахождения вставки перегревалась в интервал времени наложения верхнего шва на этот участок. Сильнее всего приведенные параметры изменялись для сигналов с координатами в области расположения вставки. На рисунке 4.19 приведены данные об изменении оцененных параметров потока сигналов АЭ в области введения титановой ($a-e$) и вольфрамовой ($z-e$) вставок в процессе формирования сварного шва. При затвердевании участка с титановой вставкой средние значения всех приведенных параметров изменялись сильнее всего на проходе, при котором осуществляли внедрение вставки и, соответственно, при формировании дефектного участка. Наиболее сильное отличие усредненных значений исследованных параметров наблюдалось для тех из них, которые устойчиво локализовались в области формирования дефектных участков при любом из использованных способов определения времени прихода сигналов АЭ (на рисунке 4.19 кривые с номером 4).



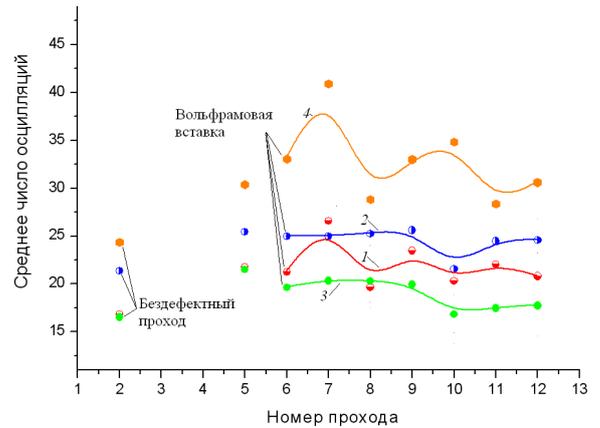
а)



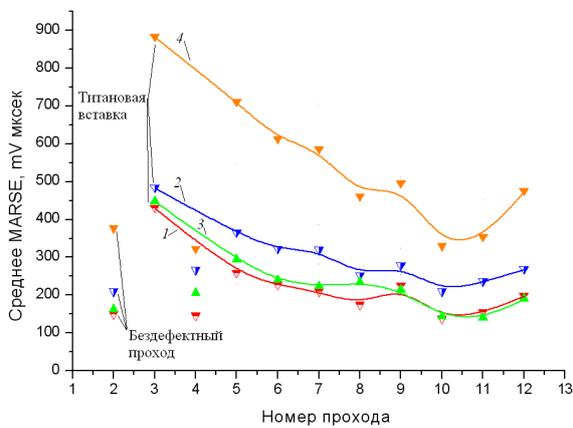
з)



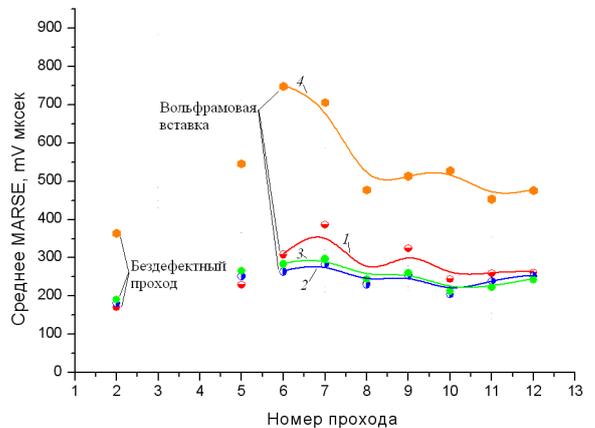
б)



д)



в)



е)

Рисунок 4.19 – Динамика изменения параметров сигналов АЭ при разных проходах формирования сварного шва: а, з – коэффициент $K(t)$; б, д – среднее число осцилляций в переднем фронте; в, е – параметр $MARSE$

В таблицу 4.4 сведены данные о динамике изменения энергетической характеристики $MARSE$ сигналов АЭ в местах установки вставок, имитирующих дефекты во время наложения слоев в сварочную ванну. Во время наложения первых двух слоев искусственно дефектных

участков не формировали. Поэтому в первой строке таблицы 4.4 приведены результаты *MARSE* с наложения второго слоя, которые приняты за характеристику АЭ реализации бездефектной сварки. Следующая строка характеризует *MARSE* при наложении сварного шва на этапе, предшествующем введению искусственного дефекта. Кроме того, приведенные данные по *MARSE* рассчитаны при локации и определении огибающей относительно порога при анализе пороговым методом и после определения огибающей по методу СКО.

Таблица 4.4 – Распределение энергетического параметра *MARSE* при сварке на дефектных участках

Проход сварки			Первая титановая вставка		Вольфрамовая вставка		Шлаковое включение		Непровар	
			Пороговый метод	Метод СКО	Пороговый метод	Метод СКО	Пороговый метод	Метод СКО	Пороговый метод	Метод СКО
Второй (эталонный)	параметры распределения	Кол-во сигналов	475	384	672	409	896	683	1464	1125
		Среднее	209,9	163,3	181,2	190,8	147,4	183,1	122,6	155,7
		Медиана	98,44	81,03	102,6	98,47	87,71	107,5	76,91	103,7
		Эксцесс	5,088	8,297	8,397	6,217	12,82	7,649	23,66	13,49
Перед локацией дефекта	параметры распределения	Номер прохода	-	-	5		8		11	
		Кол-во сигналов	-	-	324	291	356	266	868	694
	параметры распределения	Среднее	-	-	251,2	266,0	187,6	214,3	127,1	159,6
		Медиана	-	-	133,8	131,8	92,43	115,7	74,31	95,17
		Эксцесс	-	-	4,608	3,529	7,580	5,779	23,46	15,84
Локация дефекта	параметры распределения	Номер прохода	3		6		9		12	
		Кол-во сигналов	491	438	451	344	965	789	945	807
	параметры распределения	Среднее	484,4	448,6	263,0	283,0	279,7	296,0	156,2	183,3
		Медиана	286,7	169,6	138,3	118,5	142,1	154,0	83,56	103,2
		Эксцесс	-0,85	-0,78	4,179	2,909	3,289	2,991	10,16	8,681

Продолжение таблицы 4.4

Проходы после локации	Пер- вый	Номер прохода	4		7		10		12(Остывание)		
			Кол-во сигналов	73	80	437	395	550	449	131	241
		параметры распре- деления	Среднее	266,4	206,6	282,6	296,7	159,3	197,2	138,2	138,9
			Медиана	132,2	59,37	130,0	138,1	89,77	112,5	66,07	72,42
			Эксцесс	3,417	4,672	3,487	2,652	11,99	6,984	15,75	24,40
	Вто- рой	Номер прохода	5		8		11		13		
			Кол-во сигналов	284	234	166	126	532	424	734	606
		параметры распре- деления	Среднее	365,9	295,0	230,0	243,8	166,6	188,6	131,0	174,0
			Медиана	193,9	100,8	117,8	129,5	90,08	97,11	80,49	107,0
			Эксцесс	0,390	1,045	4,750	3,647	11,17	8,958	17,85	11,72
	Тре- тий	Номер прохода	6		9		12		14		
			Кол-во сигналов	310	264	498	357	648	486	779	654
		параметры распре- деления	Среднее	322,1	240,7	253,8	260,0	188,2	219,6	120,0	157,9
			Медиана	162,1	80,93	130,5	147,7	98,15	112,0	73,89	101,0
			Эксцесс	1,581	3,671	3,940	2,829	8,211	5,936	20,72	14,54
	Чет- вер- тый	Номер прохода	7		10		12(Остывание)		15		
			Кол-во сигналов	309	327	345	280	215	168	722	598
		параметры распре- деления	Среднее	320,0	223,8	204,2	213,1	101,9	146,0	129,0	166,1
			Медиана	143,9	88,67	105,8	107,6	51,86	75,41	79,96	98,26
			Эксцесс	1,325	5,469	5,776	4,571	48,43	28,56	19,51	13,05
Пя- тый	Номер прохода	8		11		13		16			
		Кол-во сигналов	85	80	247	208	430	309	782	601	
	параметры распре- деления	Среднее	252,4	234,6	239,2	221,8	190,1	222,2	144,5	190,8	
		Медиана	137,5	68,91	126,7	86,06	94,59	109,3	77,02	103,5	
		Эксцесс	3,730	4,102	3,885	3,837	7,835	6,149	11,84	7,485	

Анализируя данные, приведенные в таблице 4.4, можно отметить, что при появлении дефектного участка фиксируется и изменение в распределении энергии АЭ. Например, всегда

происходит увеличение среднего значения параметра $MARSE$, и разница между этой величиной и медианой распределения $MARSE$. В то же время уменьшался эксцесс распределения $MARSE$. Более глубокий анализ сигналов позволяет определить, что вместо сравнительно однородных энергии и ее распределению, записанных при втором проходе (бездефектном), появляются сигналы с высокой амплитудой и, соответственно, с относительно большой энергией.

Учитывая, что количественное изменение распределения $MARSE$ существенно, то этот параметр можно использовать для идентификации дефектных участков, что в свою очередь приводит к повышению качества контроля с автоматическим распознаванием дефектов непосредственно в ходе сварочного процесса.

Во всех случаях формирования дефектных участков наблюдали относительную однородность распределение $MARSE$ сигналов АЭ в процессе остывания по сравнению с поведением тех же параметров в процессе сварки. При обработке АЭ информации с заданным пороговым способом определения момента времени прихода сигналов АЭ получали большее число сигналов из зоны сварного шва по сравнению со способом расчета СКО. При этом пороговый способ имел большую погрешность локации значимых источников, что может приводить к ошибкам при идентификации дефектов. Для решения этой проблемы и повышения надежности выявления дефектов сварки целесообразно исключать сигналы АЭ, координаты которых определены с существенной погрешностью.

На рисунке 4.20 представлено распределение числа сигналов в зависимости от $MARSE$ для АЭ при формировании дефектного участка, обусловленного внедрением первой титановой вставки.

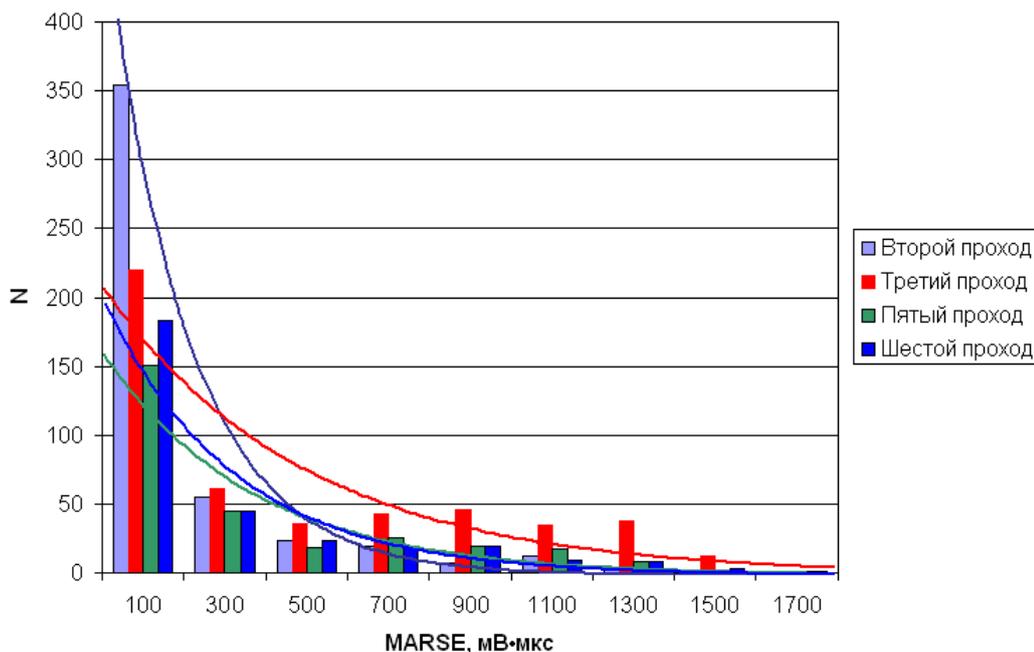


Рисунок 4.20 – Распределение числа сигналов в зависимости от $MARSE$, при формировании разных слоев многопроходного шва в зоне введения титановой вставки

Идентификацию дефектов в сварном стыке в процессе сварки можно проводить АЭ методом и критериями оценки целесообразно использовать сравнение функции распределения энергетических параметров потока сигналов, с эталонным распределением, получаемом при наложении сварного шва без формирования дефектов. Анализ возможности такого сравнения проводили с использованием t -критерия Стьюдента [79, 90, 93, 103]. Подход был основан на сравнении математического ожидания и дисперсии для потока параметров сигналов (такие как *MARSE*, двухинтервальный коэффициент, число осцилляций), регистрируемых при наложении разных слоев многопроходного сварного шва.

В проведенном эксперименте были обнаружены значимые расхождения в распределениях для наложения третьего и пятого слоя (появление дефекта) и от бездефектного наложения слоя сварного шва. Например, значительно отличается число осцилляций по переднему фронту при наложении слоев с внедренным дефектом от числа осцилляций, полученных на этапе, когда дефектов в сварном шве еще не было (второй проход). Поэтому для оценки состояния сварного шва при анализе результатов по параметрам сигналов АЭ предложено использовать t -критерия Стьюдента и его изменение относительно значений на бездефектном участке. Тогда браковочный уровень можно задать как:

$$\sum_i q_i^{(t)} \chi_i^{(t)} = P_t^{(m)}, \quad (4.2)$$

где $P_t^{(m)}$ – собственно браковочный уровень t -критерия для прохода сварки с номером m ;

i – индекс рассматриваемой характеристики сигналов АЭ (например, число осцилляций);

$q_i^{(t)}$ – коэффициенты, полученные на этапе предварительных исследований и показывающие вклад информативного параметра сигнала АЭ в браковочный уровень $P_t^{(m)}$;

$\chi_i^{(t)}$ – индикаторные булевы функции вида $\chi_i^{(t)} = \begin{cases} 0, \alpha_t > \alpha_{\text{крит}} \\ 1, \alpha_t \leq \alpha_{\text{крит}} \end{cases}$,

где α_t – уровень значимости по t -критерию Стьюдента для гипотезы о существенном отличии распределения рассматриваемого параметра для прохода с номером m от эталонного прохода сварного шва;

$\alpha_{\text{крит}}$ – критический уровень значимости.

При использовании критерия (4.2) с использованием уровня значимости $\alpha_{\text{крит}} = 0,05$ и весах $q_i^{(t)}$, равных единице, максимальный браковочный уровень будет равен числу используемых несущих информацию характеристик сигналов АЭ (двухинтервальный коэффициент,

число осцилляций, *MARSE*). Величины полученных при расчетах браковочных уровней показали существенное отклонение распределений параметров АЭ для проходов 3, 5, 6 от эталонного прохода 2, при использовании любого из методов локации сигналов АЭ.

Поскольку из распределений *MARSE* (рисунок 4.20) и анализа параметров видно, что условие нормальности не выполнено, то результаты применения критерия *t*-Стьюдента нельзя считать абсолютно надежными. Для дополнительной проверки гипотезы о различии распределений параметров сигналов АЭ при сравнении дефектных и бездефектных участков сварного шва следует использовать другие методы математической статистики.

Одним из наиболее чувствительных методов является критерий Колмогорова –Смирнова, применение которого не зависит от вида анализируемого распределения. При его использовании сравниваются две выборочные функции распределения.

Статистика критерия Колмогорова – Смирнова имеет вид [83, 98]:

$$\lambda = \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} \cdot \max |F_{n_1}(x) - F_{n_2}(x)|,$$

где $F_{n_1}(x)$, $F_{n_2}(x)$ – эмпирические функции распределения, построенные по двум выборкам с объемами n_1 и n_2 .

Гипотеза о достоверных различиях распределений для двух наборов данных считается верной, если фактически наблюдаемое значение статистики λ больше критического $\lambda_{кр}$, т.е. $\lambda \geq \lambda_{кр}$. Поскольку критическое значение статистики $\lambda_{кр}$ можно взять для различных уровней значимости (соответствующих различным вероятностям ошибки), то для оценки достоверности полученного результата можно использовать максимальный уровень значимости α , для которого выполняется условие:

$$\lambda \geq \lambda_{кр}^\alpha.$$

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

$$\sum_i q_{i,S}^{(\lambda)} \chi_{i,S}^{(\lambda)} + \sum_{i,j} q_{i,j}^{(\lambda)} \chi_{i,j}^{(\lambda)} = P_\lambda^{(m)}, \quad (4.3)$$

где $P_\lambda^{(m)}$ – браковочный уровень критерия Колмогорова–Смирнова для прохода сварки с номером m ;

i – индекс рассматриваемого параметра сигнала АЭ в наборе несущих информацию характеристик;

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 $P_{\lambda}^{(m)}$.

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

$$\chi_{i,j}^{(\lambda)} = \begin{cases} 0, & \alpha_{i,j}^{(\lambda)} > 0,1 \\ 1, & 0,1 \geq \alpha_{i,j}^{(\lambda)} > 0,01 \\ 2, & 0,01 \geq \alpha_{i,j}^{(\lambda)} > 0,001 \\ 3, & \alpha_{i,j}^{(\lambda)} \leq 0,001 \end{cases}, \quad (4.4)$$

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 . Величины браковочных уровней, вычисленных с использованием формул (4.3), (4.4) для титановой и вольфрамовой вставок в сварном шве, приведены в таблице 4.5.

Участок сварного шва в месте внедрения вставки из титана характеризуется распределением параметров сигналов АЭ при наложении слоев 3, 5, 6 существенным отклонением всех рассмотренных характеристик (*MARSE*, число осцилляций, двухинтервальный коэффициент) независимо от способа определения времени прихода сигналов на ПАЭ, от распределений этих параметров при наложении бездефектного слоя многопроходного сварного шва. Отличие этих характеристик и их параметров распределения уменьшается при наложении слоев (7...11). Это связано с тем, что участок ванны и зоны термического влияния вокруг нее постепенно удаляется от дефектных участков. А данные по характеристикам сигналов АЭ для наложения слоев 2 и 12 не имеют существенной разницы, и статистическая гипотеза о различии распределения параметров не подтверждается.

Таблица 4.5 – Браковочные уровни критерия Колмогорова – Смирнова для участка сварного шва с титановой и вольфрамовой вставками

Номер слоя наложения шва	Браковочные уровни в зависимости от метода локации сигналов АЭ					
	Метод СКО в «окне»		Двухинтервальный коэффициент		Совместное применение методов	
	Титановая вставка	Вольфрамовая вставка	Титановая вставка	Вольфрамовая вставка	Титановая вставка	Вольфрамовая вставка
3 (введение титановой вставки)	18	-	18	-	10	-
4	8	-	11	-	8	-
5	10	6	13	4	10	5
6 (введение вольфрамовой вставки)	11	5	11	6	8	5
7	12	7	12	17	11	14
8	4	4	8	4	6	1
9	10	6	13	9	10	4
10	11	6	11	3	8	4
11	11	12	9	5	7	3
12	9	1	9	3	8	3

Приведенные результаты исследований показывают, что наличие дефектов сварки вносит изменения в распределение характеристик сигналов АЭ и позволяют их обнаруживать не только непосредственно при их образовании, но и в течение нескольких последующих слоев сварного шва, пока дефектный участок находится в зоне термического влияния. Затем, при удалении дефектного участка от сварочной ванны и зоны термического влияния различия в распределениях характеристик сигналов АЭ нивелируются и с какого-то момента их невозможно надежно определять.

Следует отметить, что при наложении четвертого слоя сварного шва с титановой вставкой распределение характеристик сигналов АЭ слабо отличалось от наложения второго бездефектного. Кроме того, было зарегистрировано относительно малое число сигналов АЭ. При этом распределение характеристик при наложении следующего пятого слоя с искусственным дефектом (таблица 4.5) надежно отличалось от второго.

Этот факт говорит о том, что анализируя статистические данные для повышения надежности оценки дефектности многопроходного сварного шва необходимо использовать информацию об АЭ от наложения нескольких слоев сварного шва, так как информация по одному проходу может привести к неверному решению о состоянии сварного соединения.

Внесенные в распределения характеристик сигналов АЭ искажения от внедренных дефектов при использовании критерия Колмогорова – Смирнова фиксируются более достоверно при внедрении титановой вставки.

При анализе параметров сигналов АЭ методом поиска максимума двухинтервального коэффициента, для шестого наложения слоя 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 наложении третьего слоя, а также при наложении седьмого, непосредственно следовавшим за введением вольфрамовой вставки, величина браковочного уровня $P_{\lambda}^{(m)}$ была значительно выше. Следовательно, установленный уровень оценки, который определяется по формулам (4.3), (4.4), можно использовать при идентификации дефектов, возникающих при многопроходной сварке АЭ методом.

4.4 Разработка метода локации дефектов в процессе сварки контуров сложной формы

Для отработки методики контроля сварки в реальном масштабе времени выполнялись экспериментальные исследования по калибровке исследуемой конструкции. Осуществлялась многопроходная сварка трубы диаметром 700 мм и листа из корабельной стали размером 1800x1800 мм, толщиной 30 мм, в котором было вырезано отверстие под трубу (рисунок 4.21).



Рисунок 4.1–Общий вид свариваемой конструкции

Ручная сварка проводилась электродами марки ЭА-981/15 диаметром 4 мм, а подварка корня сварного шва – электродами ЭА-48М/22 диаметром 4 мм. Для формирования корня сварного шва выполнялись четыре прохода с одной стороны и еще два прохода - для его усиления, затем четыре прохода выполнялись с другой стороны кольцевого контура.

Контроль сигналов АЭ проводился диагностической системой СЦАД-16.10 с «плавающими» порогами селекции. Локация сигналов АЭ осуществлялась пьезоантенной,

состоящей из ПАЭ типа ПК 02-05 с рабочей полосой частот (200-500) кГц и верхним пределом температурного диапазона +45°C.

Расположение ПАЭ на свариваемом ОК представлено на рисунке 4.22. На этапе подготовки к эксперименту были предложены две схемы расстановки ПАЭ в пьезоантенне. По первой схеме на конструкцию предлагалось установить восемь ПАЭ (рисунок 4.22, а), а локацию сигналов АЭ выполнять методом триангуляции по тройкам датчиков $\{(0, 1, 2), (1, 2, 3), \dots, (6, 7, 0), (7, 0, 1)\}$. Таким образом, восемь ПАЭ образовывали восемь отдельных зон контроля, обеспечивающих надежное перекрытие всех секторов сварного шва. Однако установка восьми ПАЭ затруднила бы контроль сварки и увеличила бы трудоемкость подготовки ОК к испытаниям.

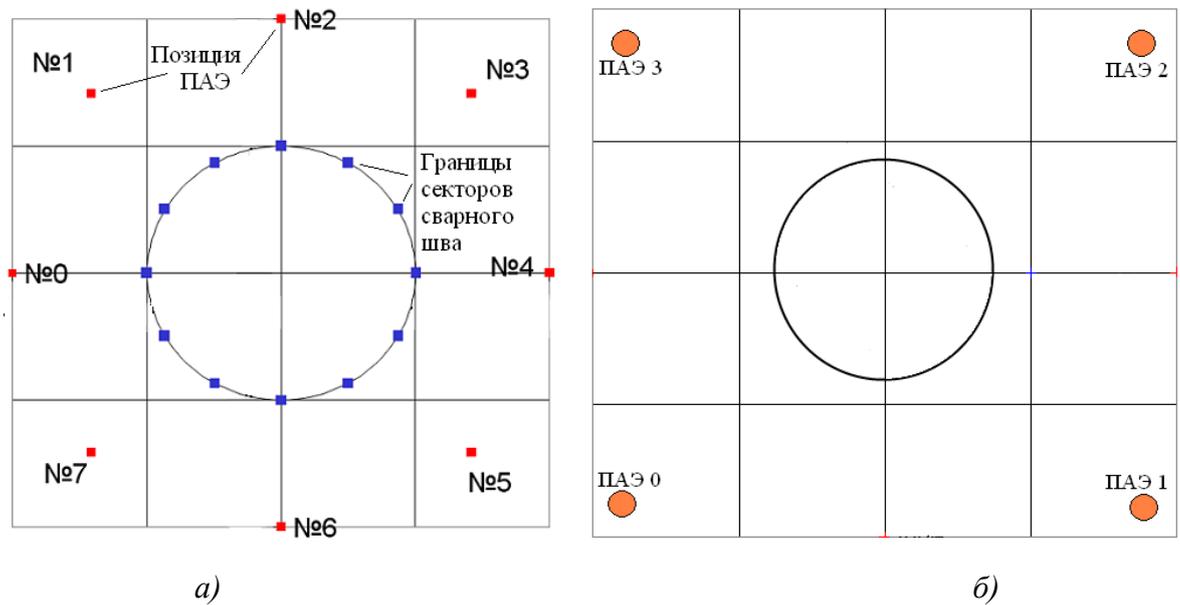


Рисунок 4.22 – Схематическое расположение ПАЭ на свариваемом ОК для восьми (а) и четырех (б) датчиков

В соответствии со второй схемой на объект предусматривалась установка четырех ПАЭ (рисунок 4.22, б). При этом они формировали единственную зону контроля, а выбор трех ПАЭ для локации осуществляется по первому принявшему датчику. Недостатком этого метода является нелинейное распространение УЗ-волн от сварного шва до одного из датчиков в любой тройке.

С учетом рекомендаций, полученных при консультации с сотрудниками АО «ПО «СЕВМАШ» для эксперимента была выбрана вторая схема формирования зоны. Сварной шов был схематически разделен на 12 секторов, в части из которых предусматривалось введение различных искусственных дефектов.

По формуле (3.9) рассчитывалась таблица с введенными РВП. Для этого вначале рассчитывались координаты ячеек зоны контроля, соответствующие идеальному кольцевому

контур. Разбиение зоны контроля на ячейки показано на рисунке 4.23, а. Для определения значений РВП в этих ячейках перед началом сварки осуществлялась калибровка секторов сварного шва [1, 6, 7, 83].

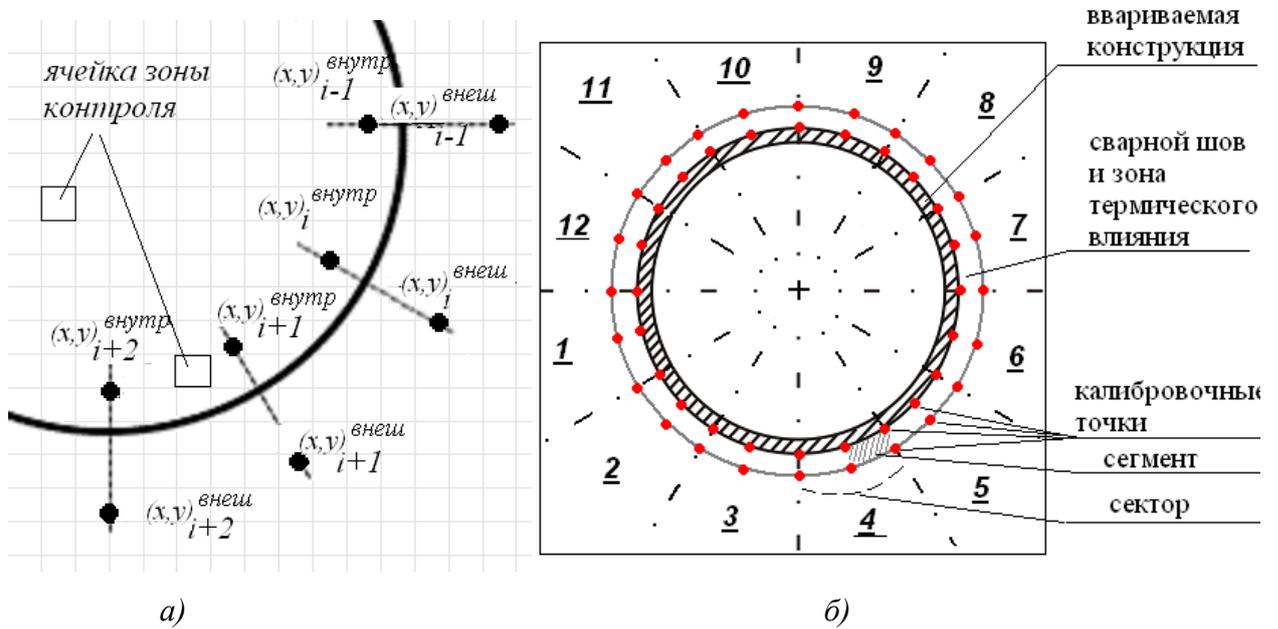


Рисунок 4.23 – Разбиение кольцевого контура сварного шва на расчетные сегменты (а);
б – схема ОК с указанием калибровочных точек

Калибровку сварного шва производили в начале, в середине и в конце каждого сектора. Для расчета таблицы из формулы (3.9) каждому сектору сварного шва соответствовали два сегмента. На рисунке 4.23, б приведен свариваемый кольцевой контур и показаны калибровочные точки.

Полученные данные подставляются в уравнения для границ сегментов (рисунок 4.23,б), на которые разбивали калибруемый кольцевой контур. На рисунке 4.23, а обозначены координаты внешних удаленных от центра точек калибровки, соответствующих зонам термического влияния $(x_i^{внеш}, y_i^{внеш})$. Координаты внутренних точек калибровки, расположенных на кромке сварного шва, обозначены как $(x_i^{внутр}, y_i^{внутр})$, где i – номер расчетного сегмента контура сварного шва (рисунок 4.23).

В параметрическом виде уравнения для границ сегмента i записываются как:

$$\begin{cases} x_i^{zp} = k(x_i^{внеш} - x_i^{внутр}) + x_i^{внутр} \\ y_i^{zp} = k(y_i^{внеш} - y_i^{внутр}) + y_i^{внутр}, \end{cases} \quad (4.5)$$

где (x_i^{zp}, y_i^{zp}) – координаты точек левой границы сегмента i ;

k – параметр связи координат.

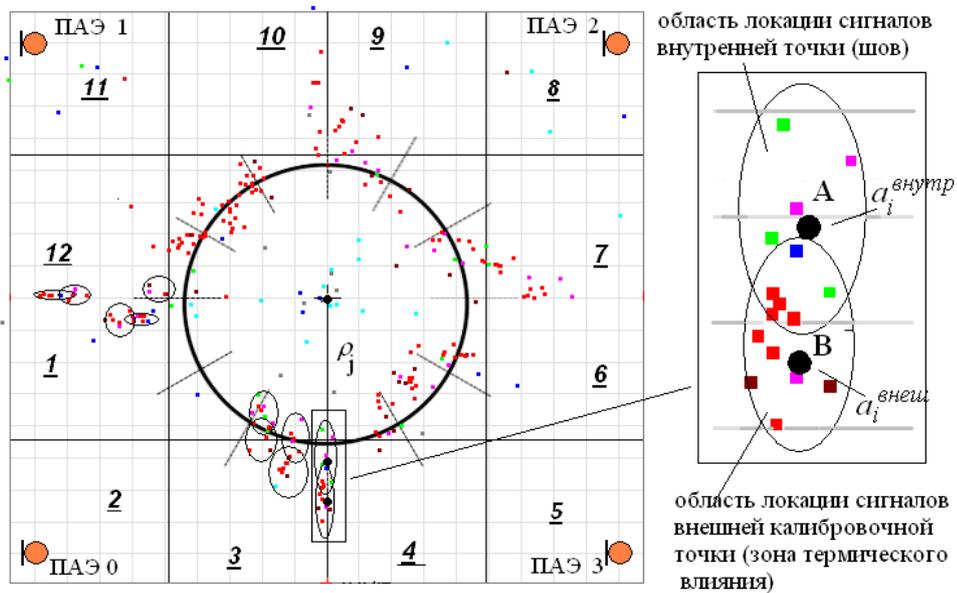
Если $k = 0$, то из формулы (4.5) получим, что $x_i^{zp} = x_i^{внутр}$, $y_i^{zp} = y_i^{внутр}$. При $k = 1$ из формулы (4.6) получим, что $x_i^{zp} = x_i^{внеш}$, $y_i^{zp} = y_i^{внеш}$.

Для учета погрешности определения РВП параметр связи координат k изменялся в диапазоне значений:

$$-\delta < k < 1 + \delta,$$

где δ – погрешность вычисления РВП, изменяемая в диапазоне $0 < \delta < 1$ и оцениваемая квантильным методом по данным калибровки [6, 7, 83].

На одну калибровочную точку I приходится не менее пяти калибровочных сигналов j . Для каждой границы сегмента, соответствующей паре калибровочных значений, вычисляются величины: $a_i^{внеш}$ – средняя величина для полярных радиусов ρ_j точек локации сигналов, полученных при калибровке точки $(x_i^{внеш}, y_i^{внеш})$; $a_i^{внутр}$ – аналогичная величина для точки $(x_i^{внутр}, y_i^{внутр})$; $b_i = a_i^{внеш} - a_i^{внутр}$ – приращение полярного радиуса ρ_j между центрами локации сигналов от калибровки внешней и внутренней точки границы с индексом i .



a)

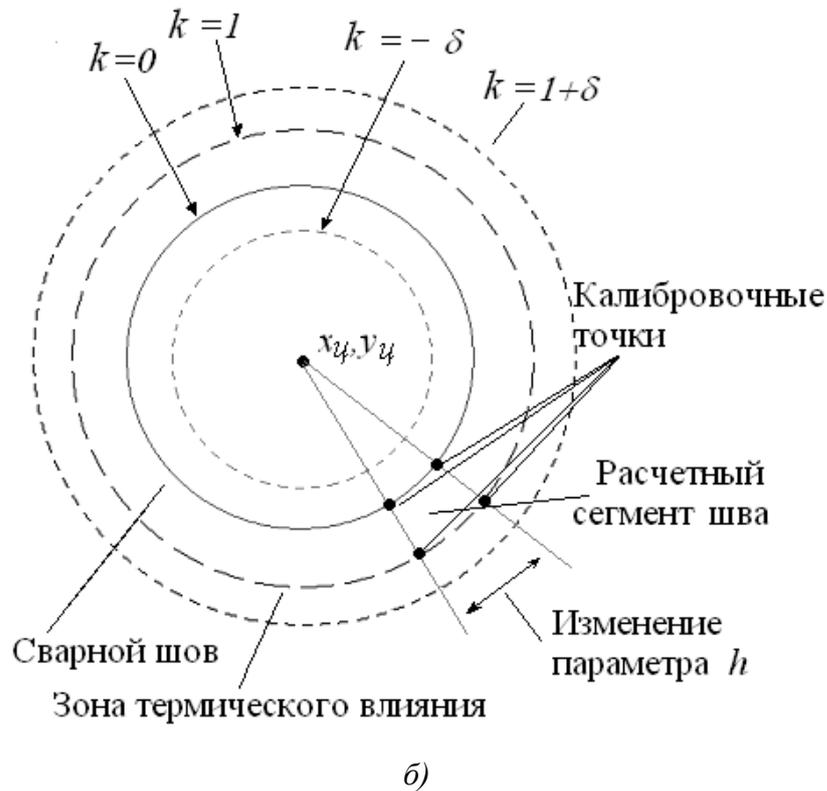


Рисунок 4.24 – Аналитическая локация сигналов калибровки нечетных секторов сварного шва (а); б - зона термического влияния сварного шва с учетом погрешности локации

Величины $a_i^{\text{внеш}}$ и $a_i^{\text{внутр}}$ характеризуют «центр тяжести» области локации сигналов из одной калибровочной точки, а величина b_i – ширину области локации сигналов из зоны термического влияния для данного сегмента сварного шва (рисунок. 4.24, а).

После этого оценивалась погрешность определения полярных координат по набору сигналов, соответствующих данному сегменту контура. Для всех сигналов АЭ, зарегистрированных при калибровке левой границы сегмента с номером i , то есть для двух калибровочных точек, например, А и В, показанных на рисунке 4.24, а, б, вычислялись величины d_j , соответствующие относительному отклонению калибровочного сигнала j от центра группы точек локации сигналов АЭ, приведенные к расстоянию между внутренней и внешней калибровочными точками. Для точки А находим:

$$d^A_j = \frac{\rho_j - a_i^{\text{внутр}}}{b_i} \quad (4.6)$$

где ρ_j – полярный радиус точки локации калибровочного сигнала.

Для точки В, показанной на рисунке 4.24, а, находим:

$$d_j^B = \frac{\rho_j - a_i^{\text{внеш}}}{b_i}, \quad (4.7)$$

Из формул (4.6), (4.7) определим погрешности δ вычисления РВП. Для этого по вычисленным значениям d_j , $1 < j < M$, построим статистическое распределение и определим его 5 % квантили $d_{0,05}$ и $d_{0,95}$. Квантиль $d_{0,05}$ находится из условия «максимальное из значений d_j , меньшее, чем 95 % остальных значений»; квантиль $d_{0,95}$ – из условия «минимальное из значений d_j , большее, чем 95 % остальных значений» [7, 83]. Затем определим погрешность δ вычисления РВП как:

$$\delta = \frac{d_{0,95} - d_{0,05}}{2},$$

которая представляет собой квантильную оценку погрешности локации сигналов АЭ. Для расчетов была выбрана доверительная вероятность 0,9. Это было обосновано рекомендацией по выбору доверительной вероятности при двухстороннем отклонении результатов измерения и при недостатке данных о законе его распределения.

Вариации параметра связи координат k в диапазоне от 0 до 1 соответствуют изменению локации сигналов АЭ в пределах зоны термического влияния. Значения погрешности δ задают ширину зоны локации, которая введена для учета погрешности вблизи зоны термического влияния сварного шва (рисунок 4.24, б).

Рассмотрим метод вычисления значений РВП элемента таблицы соответствия из формулы (3.9) для произвольной ячейки (рисунок 4.23, а) зоны контроля. Обозначим ее координаты через x , y .

Для ячейки зоны контроля сварного шва (рисунок 4.23, б) параметр связи координат k рассчитывается как:

$$k = \frac{\sqrt{\rho_{xy}^2} - \sqrt{\rho_{\text{внутр}}^2}}{\sqrt{\rho_{\text{внеш}}^2} - \sqrt{\rho_{\text{внутр}}^2}};$$

$$\rho_{\text{внеш}}^2 = (x_1^{\text{внеш}} - x_u)^2 + (y_1^{\text{внеш}} - y_u)^2; \quad (4.8)$$

$$\rho_{\text{внутр}}^2 = (x_1^{\text{внутр}} - x_u)^2 + (y_1^{\text{внутр}} - y_u)^2;$$

$$\rho_{xy}^2 = (x - x_u)^2 + (y - y_u)^2,$$

где x , y – координаты ячейки зоны контроля (рисунок 4.28, а), соответствующей элементу таблицы формулы (3.9);

(x_u, y_u) – координаты центра окружности сварного шва;

$\rho_{внеш}$ – радиус полярных координат для внешней границы зоны термического влияния сварного шва с учетом погрешности локации ($k=1$ на рисунке 4.24);

$\rho_{внутр}$ – полярный радиус для внутренней границы ($k=0$ на рисунке 4.24).

Таким образом, для каждой ячейки зоны контроля с использованием формул (4.5), (4.8) определяем соответствующие ей точки, расположенные на границах сектора кольцевого сварного шва.

На втором этапе расчета для ячеек зоны контроля находились приближенные значения РВП, исходя из значений РВП в калибровочных точках. Сначала расчет выполняли для границ сегментов, представленных уравнениями (4.5). С использованием параметра связи координат k можно записать

$$t_i^{zp} = k(t_i^{внеш} - t_i^{внутр}) + t_i^{внутр}, \quad (4.9)$$

где t_i^{zp} – рассчитываемое значение РВП сигналов АЭ, поступающих на датчик пьезоантенны в точке с граничными координатами (x_i^{zp}, y_i^{zp}) , определяемыми из уравнения (1);

$t_i^{внеш}$ – полученное из результатов калибровки значение РВП в точке $(x_i^{внеш}, y_i^{внеш})$;

$t_i^{внутр}$ – значение РВП из результатов калибровки для точки $(x_i^{внутр}, y_i^{внутр})$ (рисунок 4.23).

Затем для всех ячеек контролируемой области, расположенных в зоне термического влияния сварного шва, с учетом погрешности локации (рисунок 4.24), производился расчет приближенных значений РВП сигналов АЭ, поступающих на датчик пьезоантенны:

$$t_{x,y} = h(t_{i+1}^{zp} - t_i^{zp}) + t_i^{zp};$$

$$h = \sqrt{\frac{(x - x_i^{zp})^2 + (y - y_i^{zp})^2}{(x_{i+1}^{zp} - x_i^{zp})^2 + (y_{i+1}^{zp} - y_i^{zp})^2}} \quad (4.10)$$

где $x_{i+1}^{zp}, y_{i+1}^{zp}$ – координаты $(i+1)$ ячейки граничной зоны контроля;

h – параметр, отражающий положение ячейки зоны контроля относительно границ сегмента;

$t_{x,y}$ – вычисленная оценка РВП сигнала АЭ для ячейки зоны контроля с координатами (x, y) .

В формуле (4.10) вычисленная оценка $t_{x,y}$ РВП вносится в таблицу формулы (3.9). Формулы (4.5) – (4.10) используются для расчета таблицы РВП по каждому датчику пьезоантенны в пределах кольцевой области термического влияния сварного шва. Элементом таб-

лицы РВП, соответствующим ячейкам зоны контроля, находящимся вне этой кольцевой области, присваивается значение, соответствующее ошибке локации сигнала АЭ.

Изложенный модифицированный табличный метод локации был использован при обработке информации, полученной при сварке на четырех проходах кольцевого сварного шва. Общая длина сварного шва составила 2040 мм, а длина каждого из секторов равна 170 мм. Вид локационной картины при аналитической и табличной локации показан на рисунке 4.25, *а*, *б*. На рисунке 4.25, *в*, *г* приведена соответствующая картина распределения суммарной амплитуды сигналов АЭ. При аналитической и табличной локации были обнаружены значимые максимумы суммарной амплитуды на границе секторов 3 и 4 на рисунке 4.25, *в*, *г*.

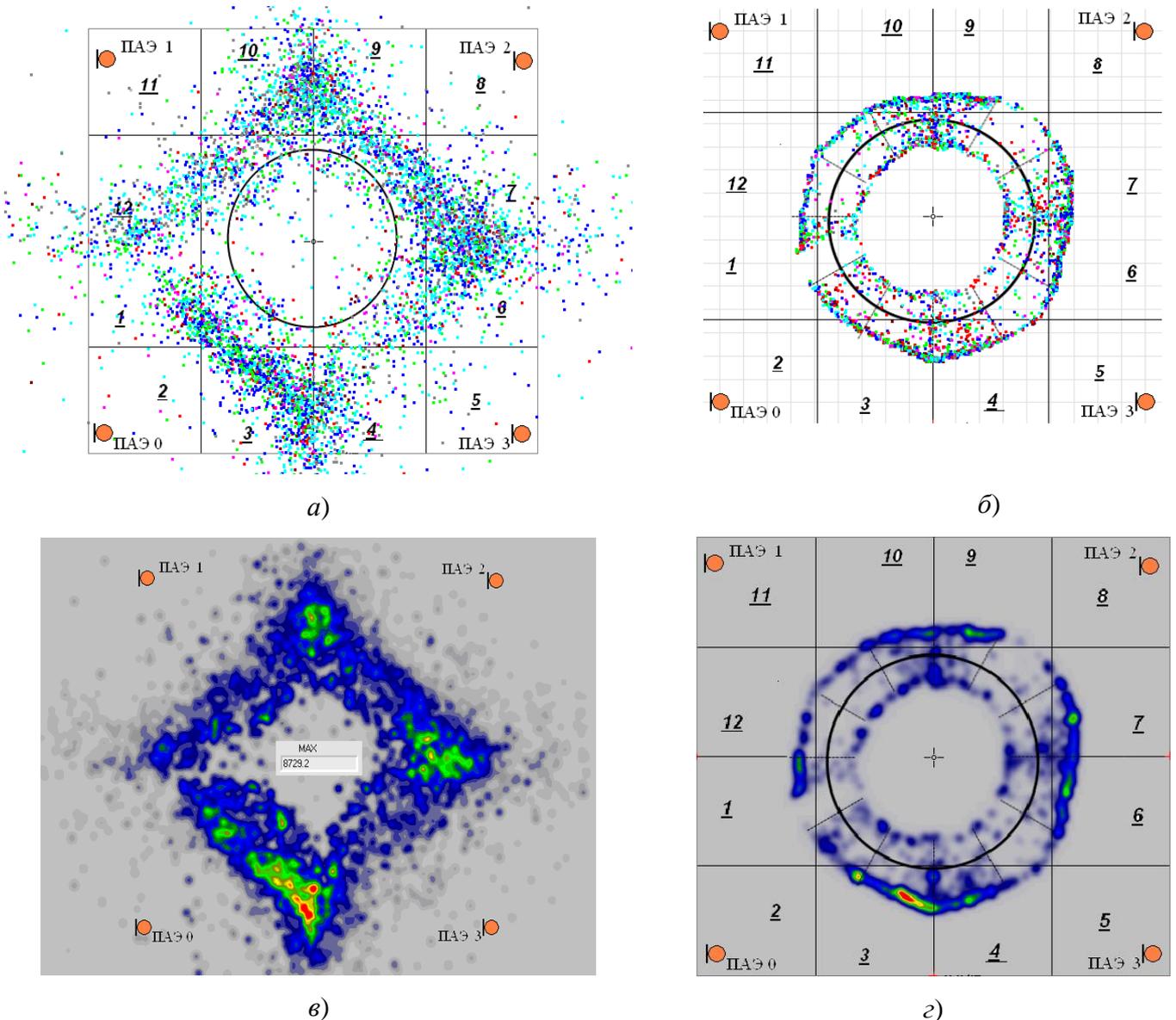


Рисунок 4.25 – Аналитическая локация сигналов АЭ в процессе сварки (*а*); *б* – табличная локация; *в* – распределение суммарной амплитуды при локации методом триангуляции сигналов АЭ; *г* – распределение суммарной амплитуды при табличной локации

Для сравнения локационных методов сопоставлялась картина расположения дефектов сварного шва с данными АЭ-контроля с использованием двух различных методов локации. Для сопоставления точности локации были выбраны шесть дефектов с известными координатами. Дополнительно анализировали область в секторе 3, в которой дефект не был выявлен, но акустическая активность оставалась высокой во время первых пяти проходов сварки (четырёх проходов формирования корня сварного шва и одного прохода при его усилении).

В секторе 1 за счет нарушения технологии сварки закладывались искусственные дефекты. При аналитической локации соответствующие источники сигналов АЭ регистрировались со значительным смещением. В секторе 2 было обнаружено два дефекта общей длиной 25 мм. Видно, что табличный метод показал их положение в границах сектора несколько более точно. Положение источника сигналов АЭ в секторе 3, регистрируемое табличным модифицированным методом, более устойчиво, а суммарная амплитуда сигналов АЭ значительно выше. При этом во время четвертого прохода сварного шва дефект в секторе 4 на локационной картине, полученной обычным методом локации, сливается с дефектом в секторе 3, что приводит к его пропуску. Дефекты на границе секторов 6, 7 локализуются обоими методами. Однако у табличной локации погрешность несколько ниже. В секторе 9 был заложен искусственный дефект типа «шлаковое включение». Его появление на локационной картине происходит из-за термических напряжений сварного шва в процессе выполнения сварки поверх имеющегося дефекта. Поэтому суммарная амплитуда сигналов АЭ не очень велика и при обычной локации приводит к его пропуску. Для дефекта в секторе 11 аналогичная картина однократно наблюдается для табличной локации. Этот дефект также был заложен на предшествующем этапе сварки. Таким образом, табличная локация, как видно из экспериментальных и расчетных данных, позволяет выполнять локацию дефектов более точно.

Выводы по главе 4

1. Разработана методика кластеризации сигналов АЭ в два этапа, которая позволяет проводить выделение кластеров параллельно записи АЭ информации в процессе испытаний. Для этого на первом этапе осуществляется кластеризация по значениям основных информативных характеристик сигналов АЭ, которая занимает минимальный объем ресурсов вычислительной техники. Второй этап кластеризации заключается в кластеризации по цифровой форме ухе в пределах тех кластеров, которые были выделены на первом этапе. Предложенная методика получила реализацию в ряде экспериментов и показала высокую надежность и высокое быстродействие, позволяющие использовать методику непосредственно в ходе испытаний.

2. Реализована серия экспериментов по использованию АЭ метода непосредственно во время многопроходной сварки образцов из толстостенной стали. Надежность методики

проверяли путем внедрения вставок из инородных легкоплавких и тугоплавких металлов и сплавов (титан, дюраль, вольфрам), которые создавали при застывании дефектные структуры. Кроме того, в процесс сварки возникли естественные дефекты типа включений и непровара, подтвержденные впоследствии при ультразвуковом контроле. Все дефекты были успешно идентифицированы АЭ методом с использованием аналитических кластерных методик.

3. В процессе параллельных многопроходной сварки и АЭ контроля были установлены характеристики сигналов АЭ, которые несут основную информацию о формировании дефектного участка, к ним относятся (двухинтервальный коэффициент, энергетический параметр *MARSE*, количество осцилляций по переднему фронту сигнала АЭ). В процессе испытаний установлено, что анализ результатов из нескольких проходов при формировании сварного шва уверенно регистрирует сигналы, связанные с формированием дефекта, это существенно повышает надежность контроля.

4. Выполнена статистическая обработка распределения основных информативных характеристик сигналов АЭ с использованием t – критерия Стьюдента и критерия Колмогорова-Смирнова, по которым был установлен браковочный уровень при идентификации опасных дефектов сварки. Анализ изменения параметров сигналов АЭ и их численных статистических характеристик показал, что введение дефекта в сварной шов оказывает существенное влияние на их распределения. При этом по мере увеличения числа проходов влияние дефекта на параметры АЭ ослабевает. Установлено, что изменение распределения параметра *MARSE* является статистически значимым, поэтому данный параметр использовался для автоматического распознавания дефектов в момент сварки шва. Данные АЭ-контроля дефектов сварки показали высокую сходимость с результатами УЗ-контроля и радиографического методов, проведенных после полного остывания сварного шва.

5. Разработан модифицированный табличный метод локации сигналов АЭ. Формирование локационной таблицы осуществлялось перед началом контроля в процессе калибровки исследуемой конструкции. Показаны результаты применения предложенного метода при контроле многопроходной сварки контуров сложной формы. Локация регистрируемых сигналов АЭ проводилась по разности времен прихода на датчики пьезоантенны в процессе сварки, которые сравнивались с соответствующим временным набором, полученным в процессе калибровки конструкции и занесенным в локационную таблицу. Показано применение разработанного модифицированного табличного метода при работе с конструкциями, выполненными из анизотропных композиционных материалов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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

1. Разработан модифицированный пороговый метод определения координат дефектов, основанный на расчете разности времен прихода сигналов АЭ на датчики пьезоантенны с одновременной оценкой погрешностей их определения. При этом осуществлено уменьшение погрешности координат локации сигналов АЭ в кластерах при статических испытаниях авиационных конструкций и контроле процесса сварки стальных образцов. Для сигналов АЭ с пологим передним фронтом среднеквадратическое 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-методом и фрактографическим анализом сварного шва.
3. Разработана методика 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 локации дефектов конструкции от незначительного в 1,25 раза 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 свар-

ного 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 его дефектами в режиме реального времени.

7. Проведен АЭ-контроль процесса сварки образцов из судостроительной стали. В процессе испытаний определены наиболее несущие информацию характеристики 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 метода, проведенных после полного остывания сварного шва.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Муравьев и др. – М.: Радио и связь, 2000. – 280 с.
2. Акустико-эмиссионная методика браковки дефектов кольцевого сварного шва в процессе многопроходной сварки / Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С., Чернова В.В. // Дефектоскопия. – 2019. – №12. – С.26–35.
3. 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.
4. Акустико-эмиссионный контроль дефектов в процессе многопроходной сварки образцов из судостроительной стали / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, Е.Ю. Лебедев, И.С. Рамазанов и др. // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 12. – С. 74 – 80.
5. Акустико-эмиссионный контроль дефектов многопроходной сварки крупногабаритных конструкций / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов и др. // Дефектоскопия. – 2015. – № 9. – С. 20 – 27.
6. Акустико-эмиссионный контроль дефектов сварки /А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов и др. – Новосибирск: Наука, 2018. – 272 с.
7. 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.
8. Акустико-эмиссионный контроль криволинейных панелей фюзеляжа самолета RRJ при ресурсных испытаниях / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, О.В. Митрофанов и др. // Дефектоскопия. – 2008. – № 12. – С. 42 – 47.
9. Акустико-эмиссионный контроль процесса разрушения образцов из углепластика при воздействии статических и тепловых нагрузок/ Л.Н. Степанова, В.В. Чернова, Е.С. Петрова, И.С. Рамазанов / Дефектоскопия. – 2018. – №11. – С.9 – 16.
10. Акустическая эмиссия при решении некоторых вопросов авиационного производства/ Н.А. Семашко, В.И. Муравьев, А.В. Фролов и др. // Авиационная промышленность. – 2004. – № 2. – С. 85 – 89.
11. Анализ погрешностей локации дефектов многопроходной сварки при использовании различных методов кластеризации / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов и др. // Дефектоскопия. – 2017. – №2. – С. 10 – 18.

12. Антипенко, Е.И. Оценка эффективности метода акустической эмиссии при техническом диагностировании объектов / Е.И. Антипенко, Н.Г. Висиловский, М.Б. Кельрих // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2004. – № 4. – С. 11 – 14.
13. Бабичева, И.Ф. Теоретические разработки по использованию вейвлет-анализа и нейросетевых технологий в системе диагностики и прогнозирования остаточного ресурса промышленного оборудования // И.Ф. Бабичева, А.В. Шарко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2005. – № 2. – С. 17 – 21.
14. Бачурин, В.В. Об одном подходе к построению метода определения координат источника сигнала акустической эмиссии / В.В. Бачурин, И.Ю. Соловьев // Автометрия. – 1993. – № 6. – С. 102 – 108.
15. Бигус, Г.А. Вейвлет-анализ сигналов акустической эмиссии при диагностике конструкций / Г.А. Бигус, Ю.Ф. Даниев // Сварка и Диагностика. – 2012. – № 4. – С. 34 – 38.
16. Бигус, Г.А. Исследование акустико-эмиссионных сигналов при деформировании и разрушении образцов из стали 22К / Г.А. Бигус, П.Б. Стрелков // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2005. – № 1. – С. 10 – 15.
17. Буйло, С.И. Акустико-эмиссионная диагностика стадий фрикционного взаимодействия металлов / С.И. Буйло, П.Г. Иваночкин // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 5. – С. 18 – 22.
18. Буйло, С.И. Диагностика предразрушающего состояния по амплитудным и временным инвариантам потока актов акустической эмиссии / С.И. Буйло // Дефектоскопия. – 2004. – № 8. – С. 79 – 83.
19. Буйло, С.И. Диагностика стадий деформации и разрушения по интегральным параметрам потока актов акустической эмиссии / С.И. Буйло // Дефектоскопия. – 2004. – № 8. – С. 66 – 78.
20. Буйло, С.И. Использование инвариантных соотношений параметров потока сигналов акустической эмиссии для диагностики предразрушающего состояния твердых тел / С.И. Буйло // Дефектоскопия. – 2012. – № 2. – С. 48 – 53.
21. Буйло, С.И. Определение параметров процесса накопления повреждений и оценка критерия разрушения по восстановленным значениям потока актов акустической эмиссии / С.И. Буйло // Дефектоскопия. – 1997. – № 7. – С. 84 – 89.
22. Буйло, С.И. Связь параметров акустического излучения растущей трещины с коэффициентом интенсивности напряжений и типом напряженного состояния / С.И. Буйло // Дефектоскопия. – 2006. – №3. – С. 184 – 184.
23. Буйло, С.И. Физико-механические и статистические аспекты акустико-эмиссионной диагностики предразрушающего состояния: дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.07; 01.02.04: защищена 29.06.10 / С.И.Буйло. – Ростов-на-Дону, 2010. – 279 с.

24. Буйло, С.И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики / С.И. Буйло. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2008. – 192 с.
25. ГОСТ Р 52727–2—7. Акустико-эмиссионная диагностика.– М.: Изд-во стандартов. 2007.
26. Гуменюк, В.А. Акустико-эмиссионный контроль процесса сварки объектов морской техники/ В.А. Гуменюк, Н.А. Казаков, В.А. Сульженко // В мире неразрушающего контроля. – 2010. – № 4 (50). – С. 20 – 25.
27. Гуменюк, В.А. Анализ распространения акустико-эмиссионных сигналов в конструкциях из листовых материалов / В.А. Гуменюк, Н.А. Казаков, Е.В. Несмашный // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 2. – С. 12 – 21.
28. Гуменюк, В.А. Оптимизация алгоритма акустико-эмиссионной локации дефекта в кольцевых швах сварных конструкций / В.А. Гуменюк, Е.В. Несмашный // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 9. – С. 34 – 42.
29. Гуменюк, В.А. Современные возможности и тенденции развития акустико-эмиссионного метода / В.А. Гуменюк, В.А. Сульженко, А.В. Яковлев // В мире неразрушающего контроля. – 2000. – № 3. – С. 8 – 12.
30. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии / А.Н. Серьезнов. Л.Н. Степанова, В.В. Муравьев и др.. – М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2004. – 368 с.
31. Дробот, Ю.Б. Неразрушающий контроль усталостных трещин акустико-эмиссионным методом / Ю.Б. Дробот, А.М.Лазарев. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 128 с.
32. Иванов, В.И. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений / В.И.Иванов, В.М. Белов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
33. Иванов, В.И. О критериях оценки степени опасности дефекта по параметрам акустической эмиссии / В.И. Иванов, С.П. Быков, А.Н. Рябов // Дефектоскопия. – 1985. – № 2. – С. 62 – 68.
34. 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.
35. Использование вейвлет-фильтрации при локализации сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов и др. // Контроль. Диагностика. – 2007. – №9. – С. 27 – 31.
36. Использование двухэтапной кластеризации сигналов акустической эмиссии для определения дефектов сварки / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин, и др. // Дефектоскопия. – 2011. – № 6. – С. 44 – 49.

37. Использование метода акустической эмиссии и тензометрии при проверке остаточной прочности самолета / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, А.Б. Тихонравов и др. // Дефектоскопия. – 2008. – № 2. – С. 28 – 35.
38. Использование метода акустической эмиссии и тензометрии при ресурсных испытаниях тяжелого самолета / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, А.Б. Тихонравов и др. // Контроль. Диагностика. – 2006. – № 5. – С. 58 – 66.
39. Использование методов кластеризации для обработки акустико-эмиссионной информации / Степанова Л.Н., Чернова В.В., Рамазанов И.С // Контроль. Диагностика. – 2019. – №8. – С.12–21.
40. Исследование образцов из материала боковых рам коробчатого сечения методом акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, С.А. Бехер, Е.В. Бояркин и др. // Дефектоскопия. – 2013. – № 4. – С. 40 – 51.
41. 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 и др. // Дефектоскопия. – 2009. – № 2. – С. 39 – 46.
42. Кабалдин, Ю.Г. Оценка изменений и устойчивости структуры металлических материалов при деформации на основе фрактального и вейвлет-анализа сигналов акустической эмиссии / Ю.Г. Кабалдин, С.Н. Муравьев // Деформация и разрушение материалов. – 2007. – № 2. – С. 13 – 20.
43. Кареев, А.Е. Влияние погрешностей координат установки датчиков пьезоантенны на точность локализации источников сигналов акустической эмиссии / А.Е. Кареев, Л.Н. Степанова, Е.С. Тенитилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 11. – С. 21 – 28.
44. Кластеризация источников сигналов акустической эмиссии по скорости нарастания переднего фронта / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, С.И. Кабанов и др. // Дефектоскопия. – 2009. – № 10. – С. 27 – 35.
45. Контроль усталостных повреждений при ресурсных испытаниях полуоси стабилизатора маневренного самолета с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии / А.Н. Серьезнов, А.В. Мальцев, Л.Н. Степанова и др. // Дефектоскопия. – 2004. – № 9. – С. 3 – 10.
46. Кудря, А.В. Классификация источников акустической эмиссии в тонкой пластине по различиям структуры сигналов / А.В. Кудря, Е.А. Марков // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – № 6. – С. 32 – 38.
47. Локализация источников сигналов акустической эмиссии с учетом погрешностей измерения скорости звука и времени их прихода на датчики пьезоантенны / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, С.И. Кабанов и др. // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 10. – С. 60 – 64.

48. 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. и др. // Контроль. Диагностика. – 2021. – №2. – С.18–29.
49. 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, и др. // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 5. – С. 14 – 19.
50. Микропроцессорный комплекс для ресурсных испытаний самолетных стоек шасси / Л.Н. Степанова, Е.Ю. Лебедев, С.И. Кабанов и др. // Контроль. Диагностика. – 2002. – № 1. – С. 13 – 17.
51. Многомасштабный метод анализа деформации металлических сплавов и углерод-углеродных композиционных материалов по данным тензометрии, картирования деформации на поверхности и акустоэмиссии / В.Е. Панин, С.В. Панин, А.В. Бяков и др. // Контроль. Диагностика. – 2011. – №11. – С.56 – 62.
52. Муравьев, В.В. Анализ погрешностей определения координат источников акустической эмиссии в конструкциях из листовой стали / В.В. Муравьев, С.А. Бехер, К.В. Власов // Дефектоскопия. – 2008. – № 7. – С. 53 – 59.
53. Муравьев, В.В. Оценка степени опасности усталостных трещин при акустико-эмиссионном контроле литых деталей тележки грузового вагона / В.В. Муравьев, Л.Н. Степанова, А.Е. Кареев // Дефектоскопия. – 2003. – № 1. – С. 63 – 68.
54. Муравьев, В.В. Применение методики обработки сигналов для повышения точности локализации сигналов АЭ / В.В. Муравьев, М.В. Муравьев, С.А. Бехер // Дефектоскопия. – 2002. – № 8. – С.3 – 11.
55. Недосека, А.Я. Основы расчета и диагностика сварных конструкций / А.Я. Недосека. – Киев: ИНДПРОМ, 2008. – 816 с.
56. Недосека, С.А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии / С.А. Недосека // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – № 2. – С. 3 – 9.
57. Носов, В.В. Использование параметров амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии для оценки прочности конструкционных материалов / В.В. Носов, И.Н. Бураков // Дефектоскопия. – 2004. – № 3. – С. 15 – 21.
58. Носов, В.В. Методика определения информативных параметров акустической эмиссии / В.В. Носов // Дефектоскопия. – 1998. – № 5.– С. 92 – 98.
59. Носов, В.В. Методология акустико-эмиссионной оценки прочности как основа эффективности неразрушающего контроля / В.В. Носов // В мире НК. – 2014. – № 3. – С. 7 – 13.

60. Носов, В.В. Оценка прочности и ресурса технических объектов с помощью метода акустической эмиссии / В.В. Носов, А.И. Потапов, И.Н. Бураков // Дефектоскопия. – 2009. – № 2. – С. 47 – 57.
61. Носов, В.В., Акустико-эмиссионный контроль прочности сложно нагруженных металлоконструкций / В.В. Носов, А. И. Потапов // Дефектоскопия. – 2015.– № 1. – С. 61 – 72
62. Пат. 2156456 Российская Федерация, МПК 7 G 01 N 29/14. Способ обнаружения в процессе сварки дефектов в сварных швах и определения их местоположения по акустическим сигналам / Гуменюк В.А., Иванов Ю.Г., Казаков Н.А. и др.; заявитель и патентообладатель «Центральный научно-исследовательский институт им. акад. А.Н. Крылова». – № 99112346/28; заяв. 07.06.1999; опубл. 20.09.2000, Бюл. № 26. – 6 с.
63. Пат. 2299429 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/14. Способ контроля качества установки акустических преобразователей на металлической конструкции и устройство для его осуществления / Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В. и др.; заявитель и патентообладатель «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина». – № 2005113384/28; заяв. 03.05.2005; опубл. 20.05.2007, Бюл. № 14. – 12 с.
64. Пат. 2356043 Российская Федерация, 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.; заявитель и патентообладатель «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина». – № 2007124242/28; заяв. 27.06.2007; опубл. 20.05.2009, Бюл. № 14. – 18 с.
65. Пат. 2379677 Российская Федерация, 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. и др.; заявитель и патентообладатель «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина». – № 2008129607/28; заяв. 17.07.2008; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 2. – 14 с.
66. Пат. 2424510 Российская Федерация, 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. и др.; заявитель и патентообладатель «Сибирский государственный университет путей сообщения». – № 2009127178/28; заяв. 14.07.2009; опубл. 20.01.2011, Бюл. № 2. – 19 с.
67. Пат. 2442155 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/14. Способ акустико-эмиссионного контроля качества сварного шва в процессе сварки и устройство для его осуществления / Степанова Л.Н. Кабанов С.И., Канифадин К.В.; заявитель и патентообладатель «Сибирский государственный университет путей сообщения». – № 2009146635/28; заяв. 15.12.2009; опубл. 20.06.2011, Бюл. № 17. – 13 с.

68. Пат. 2572067 Российская Федерация, 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. и др.; заявитель и патентообладатель «Сибирский государственный университет путей сообщения». – 2014132494/28; заяв. 06.08.2014; опубл. 27.12. 2015, Бюл.№ 36. – 14 с.
69. Пат. 2599327 Российская Федерация, 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. И др.; заявитель и патентообладатель «Сибирский государственный университет путей сообщения». – 2015122096/28; заяв. 09.06.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 28. – 19 с.
70. Пат. 2633002 Российская Федерация, МПК, G 01 N 29/14. Способ определения координат источников сигналов акустической эмиссии / Степанова Л. Н., Рамазанов И. С., Кабанов С. И. и др.; заявитель и патентообладатель «Сибирский государственный университет путей сообщения». – 2016126884; заяв. 04.07.2016; опубл. 11.10.2017, Бюл. № 29. – 19 с.
71. 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. Опубл. 11.12.2018. Бюл. №35.
72. Переберин А.В. О систематизации вейвлет-преобразований / А.В. Переберин // Вычислительные методы и программирование. – 2001. – т.2. – С. 15 – 40.
73. Применение акустико-эмиссионных комплексов для контроля технического состояния оборудования / Н.Г. Висилковский, М.Б. Кельрих, Н.Г. Пожидаев и др. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1998. – № 1. – С. 32 – 37.
74. Применение конечно-элементных методов для расчета приемных систем акустико-эмиссионного контроля / А.В. Наседкин В.М. Шихман, С.В. Захарова и др. // Дефектоскопия. – 2006. – № 2. – С. 16 – 27.
75. Прохорович, В.Е. 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.
76. Разуваев, И.В. Аналитическая верификация результатов акустико-эмиссионного мониторинга в комплексах интегрального мониторинга состояния опасных производственных объектов / И.В. Разуваев, Е.А. Сучков // Дефектоскопия. – 2014. – № 4. – С. 31 – 40.
77. Регистрация процесса разрушения образцов из композиционного материала методом акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, Е.Ю. Лебедев, А.Е. Кареев и др. // Дефектоскопия. – 2004. – № 7. – С. 34 – 41.

78. Серьезнов, А.Н. Акустико-эмиссионная система для регистрации непрерывных и дискретных сигналов / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов // Датчики и системы. – 2010. – № 8. – С. 55 – 59.
79. Серьезнов, А.Н. 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.
80. Система классификации степени опасности источников акустической эмиссии и критерии экспресс-оценки состояния объектов на основе нечеткой логики / В.А. Гуменюк, В.А. Сульженко, В.А. Казаков и др. // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 1. – С. 49 – 53.
81. Совершенствование акустико-эмиссионной локации дефектов при прочностных испытаниях конструкций из углепластика / Л.Н. Степанова, Г.Г. Анохин, И.С. Рамазанов и др. // Контроль. Диагностика. – 2016. – №6. – С.67 – 72.
82. Сравнительный спектральный анализ шумоподобных акустических сигналов при мониторинге и диагностике промышленного оборудования / И.А. Растегаев, Д.Л. Мерсон, И.И. Растегаева и др. // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 10. – С. 80 – 86.
83. Степанова, Л.Н. Акустико-эмиссионная локация дефектов в процессе многопроходной сварки контуров сложной формы / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, В.В. Киреенко // Дефектоскопия. – 2016. – № 5. – С.14 – 22.
84. Степанова, Л.Н. Акустико-эмиссионный контроль раннего зарождения дефектов в образцах из углепластика / Л.Н. Степанова, В.В. Чернова, И.С. Рамазанов // Дефектоскопия. – 2020. – №10. - С.12–23.
85. Степанова, Л.Н. Анализ погрешностей определения координат источников сигналов акустической эмиссии при использовании пьезоантенны произвольной формы / Л.Н.Степанова, А.Е. Кареев // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 8. – С.13 – 18.
86. Степанова, Л.Н. Анализ процесса разрушения углепластика, изготовленного автоклавным формованием, по параметрам сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, В.В. Чернова // Конструкции из композиционных материалов. – 2020. – №3. – С.25–31.
87. Степанова, Л.Н. Вейвлет-анализ структуры сигналов акустической эмиссии при прочностных испытаниях образцов из углепластика / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, В.В. Чернова // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 7 – С.54 – 62.
88. Степанова, Л.Н. Вейвлет-фильтрация в задачах локализации сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 1. – С. 15 – 19.

89. Степанова, Л.Н. Динамическая кластеризация по набору параметров сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 10. – С. 12 – 16.
90. Степанова, Л.Н. Использование кластерного анализа для определения связи сигнала акустической эмиссии с характером разрушения в металлических образцах/ Л.Н. Степанова, А.Е. Кареев // Контроль. Диагностика. – 2005. – №9. – С.18 – 23.
91. Степанова, Л.Н. Исследование источников сигналов акустической эмиссии при остывании сварного шва с использованием кластерного анализа / Л.Н. Степанова, К.В. Канифадин, С.А. Лазненко // Дефектоскопия. – 2010. – № 1. – С. 73 – 82.
92. Степанова, Л.Н. Исследование процесса разрушения образцов из композиционных материалов методом акустической эмиссии/ Л.Н. Степанова, В.В. Чернова //Известия вузов. Строительство. – 2013. – № 3. – С.118 – 124.
93. Степанова, Л.Н. Исследование распределения деформаций и температур в образце при акустико-эмиссионном контроле процесса сварки и остывания сварного шва / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, К.В. Канифадин // Дефектоскопия. – 2012. – № 8. – С. 30 – 39.
94. Степанова, Л.Н. 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.
95. Степанова, Л.Н. Определение опасных источников сигналов акустической эмиссии по оценке энергии кластеров / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин // Дефектоскопия. – 2010. – № 9. – С. 64 – 73.
96. Степанова, Л.Н. 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.
97. Степанова, Л.Н. Разработка метода динамической кластеризации сигналов акустической эмиссии для повышения точности их локализации / Л.Н. Степанова, А.Е. Кареев // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 6. – С. 15 – 21.
98. Степанова, Л.Н. 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.
99. Степанова, Л.Н. 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.

100. Степанова, Л.Н. Локализация источников акустической эмиссии в объектах с малыми геометрическими размерами / Л.Н. Степанова, Е.С. Тенитилов // Дефектоскопия. – 2012. – № 11. – С. 62–72.
101. Технология контроля дефектов многопроходной сварки методом акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, Е.Ю. Лебедев, С.И. Кабанов и др. // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 12. – С. 76 – 80.
102. Ультразвуковая диагностика структуры металла на основе использования метода временной декорреляции сигналов акустической эмиссии, возникающей при кинетическом индентировании / В.К. Качанов, И.В. Соколов, М.Б. Бакиров и др. // Дефектоскопия. – 2008. – № 11. – С. 47 – 66.
103. Ферстер, Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 302 с.
104. Чаусов, Н.Г. Исследование кинетики разрушения сталей на заключительных стадиях деформирования методом акустической эмиссии / Н.Г. Чаусов, С.А. Недосека, А.А. Лебедев // Проблемы прочности. – 1996. – № 1. – С. 82 – 90.
105. Ченцов, В.П. Акустическая эмиссия при упругопластическом деформировании конструкционных материалов и опыт ее применения в неразрушающем контроле / В.П. Ченцов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2014 – 268 с.
106. Шемякин, В.В. О применении метода акустической эмиссии в мониторинге опасных промышленных объектов / В.В. Шемякин, С.А. Стрижков // В мире неразрушающего контроля. – 2004. – № 4. – С. 16 – 19.
107. Шип, В.В. Новые комплексные информативные параметры акустической эмиссии для диагностики сварных соединений / В.В. Шип, Е.Г. Дорохова // Сварочное производство. – 1995. – № 3. – С. 35 – 38.
108. Экспериментальное установление связи спектра сигнала АЭ с длиной усталостной трещины в стальных образцах / А.Н. Серьезнов, В.В. Муравьев, Л.Н. Степанова и др. // Дефектоскопия. – 1999. – № 2. – С. 73 – 78.
109. Aljets, D. Acoustic emission source location in composite aircraft structures using modal analysis/ D. Aljets // University of Glamorgan/ – 2011. – PhD Thesis. – pp. 163
110. Damage detection on laminated composite materials using several NDT techniques / A.M. Amaro, P.N.B. Reis, M.F.S.F. de Moura et al. // Insight. – 2012. – № 1. – P. 14 – 20.
111. Hamstad, M. A. A wavelet transform applied to acoustic emission signals: part 1: source identification / M. A. Hamstad, A. O. Gallagher and J. Gary // J. Acoustic Emission. – 2002. – 20. – P. 39 – 61

- 112.Kanji, O. Research and applications of AE on advanced composites / O. Kanji, G. Antolino // J. Acoustic Emission – 2012. – 30. – P. 180 – 229.
- 113.Kek, T. AE signals as laser cutting quality indicators. / T. Kek, J. Grum // Insight. – 2009. – № 3. – P. 124 – 128.
- 114.Kurokawa, Yu. Real-time executing source location system applicable to anisotropic thin structures. / Yu Kurokawa, Y. Mizutani, M. Mayuzumi // J. Acoustic Emission. – 2005. – № 23. – P. 224 – 232.
- 115.Whitlow, T. Clustering of fiber-break related events in carbon fiber reinforced polymer composites using acoustic emission / T. Whitlow, M. Sundaresan // J. Acoustic Emission. – 2017. – 34. – P. 52 – 63
- 116.Zhang, F. Statistical model and analysis of AE data from aircraft / F. Zhang, G. Wu, B. Guo, Z. Wang // Insight. – 2001. – № 8. – P. 531 – 536.