



На правах рукописи

СОБОЛЕВ Илья Александрович

**РАЗРАБОТКА БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА
ЦЕЛОСТНОСТИ КОНСТРУКЦИИ АВИАЦИОННОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ
ТЕХНИКИ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Специальность 1.3.7 Акустика

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», на кафедре Е4 «Технология патронного производства и обработка металлов давлением».

Научный руководитель: **Ремшев Евгений Юрьевич**
доктор технических наук (6.2.1), доцент, доцент кафедры Е4 «Технология патронного производства и обработка металлов давлением», ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург.

Официальные оппоненты: **Бехер Сергей Алексеевич**
доктор технических наук (05.11.13), доцент, заведующий кафедрой «Физика, электротехника, диагностика и управление в технических системах» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», г. Новосибирск;

Кинжагулов Игорь Юрьевич
кандидат технических наук (05.11.01), доцент факультета систем управления и робототехники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 08.10.2026 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.272.02 при ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова» (БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова) по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова и на сайте <https://voenmeh.ru/nauka/dissertacionnye-sovety/dissertacionnyj-sovet-24-2-272-02/>.

Автореферат разослан «__» июля 2026 г. Отзывы на автореферат принимаются по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, кафедра Е5, а также на e-mail: dissovetvoenmeh@yandex.ru.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.272.02
кандидат технических наук



В.К. Васильева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Количество и сложность аппаратов, применяемых в космической отрасли РФ, неуклонно растет ввиду активного развития технологий. В связи со спецификой работы аппараты должны обладать высоким качеством, надежностью и долговечностью. Однако возрастающие требования к надежности, долговечности и безопасности эксплуатации таких ответственных объектов актуализируют задачу совершенствования методов их диагностирования. Традиционные методы неразрушающего контроля (НК), такие как ультразвуковой, вихретоковый, и т. д., недостаточно эффективны для выявления опасных развивающихся дефектов в элементах аппаратов, в том числе из алюминиевых сплавов. Это связано со спецификой структуры алюминиевых сплавов, сложностью геометрии контролируемых изделий, трудностями выявления дефектов типа микротрещин или зон пластической деформации на ранних стадиях развития, а также невозможностью проведения контроля в режиме реального времени при эксплуатации объекта. Расширение сфер использования алюминиевых сплавов, аддитивных технологий и сложных инженерных решений требует внедрения инновационных методов НК, способных обеспечить своевременное выявление дефектов с достаточной точностью во время эксплуатации аппаратов без нарушения целостности объектов. В рамках данного исследования под «целостностью конструкции» понимается её способность сохранять герметичность в условиях эксплуатации космического аппарата, в т.ч. при воздействии внешних факторов (например, микрометеоритных ударов), приводящих к образованию сквозных дефектов.

Ключевой показатель целостности — отсутствие неконтролируемых утечек воздуха за пределы допустимых норм. Соответственно, задача неразрушающего контроля методом акустической эмиссии (далее – АЭ) — локализация зон нарушения герметичности для своевременного выявления и устранения дефектов.

В этом контексте АЭ выделяется как перспективная технология, позволяющая проводить динамический мониторинг состояния структур в режиме реального времени во время эксплуатации объектов, что особенно актуально для систем, таких как спутники, орбитальные станции и т. д. В связи с этим представляется актуальным исследование возможности применения метода АЭ для мониторинга состояния технически сложных объектов из алюминиевых сплавов в процессе эксплуатации. Развитие радиоэлектронной промышленности и приборостроения позволяют создавать более совершенные системы неразрушающего контроля, в основе которых лежит метод акустической эмиссии.

Изучение вопроса оценки долговечности материалов с помощью метода АЭ связано с научными трудами таких авторов, как С.А. Бехер, И.Ю. Кинжагулов, В.А. Сясько, К.Е. Аббакумов, Т.Б. Петерсен, Л. Р. Ботвина, Х. В. Махмудов, Н. А. Махутов, Е. Ю. Ремшев, Ю. В. Дробот, А. М. Лексовский, А. Л. Бобров, Л. Н. Степанова, А. И. Козинкина, М. Р. Тютин. Физическую природу метода АЭ исследовали такие авторы, как В. А. Барат, В. И. Ванов, Д. В. Мерсон, С. И. Буйло.

Однако в трудах данных авторов не уделено достаточного внимания исследованию закономерностей изменения параметров АЭ при статическом и циклическом нагружении элементов конструкций от наличия трещин в материале образцов. В то же время практически неизученным остается вопрос разработки методик, алгоритмов для регистрации, обработки, анализа и идентификации сигналов АЭ с целью оценки герметичности, трещинообразования и предрасположенности к развитию

дефектов корпусных элементов космических аппаратов на этапе активной эксплуатации и в процессе всего жизненного цикла.

Целью работы является совершенствование системы мониторинга технического состояния материала корпусов и основных конструктивных модулей авиационных и космических аппаратов методом АЭ для предотвращения аварийных ситуаций, повышения безопасности эксплуатации, продления жизненного цикла.

Объект исследования: мониторинг состояния элементов авиационной и космической техники для фиксации и локализации областей течи через дефекты (трещины).

Предмет исследования: процессы получения, обработки АЭ информации о состоянии целостности элементов авиационной и космической техники, создание модели для поиска и локализации дефекта.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих методов неразрушающего контроля корпусных и силовых элементов авиационных и космических систем с оценкой их способности обеспечивать контроль параметров целостности конструкции в процессе эксплуатации.

2. Экспериментальные исследования закономерностей изменения параметров АЭ алюминиевых сплавов при статическом и циклическом нагружении с целью установления корреляции между характеристиками АЭ-сигналов и стадиями развития дефектов, влияющих на целостность конструкции.

3. Систематический сравнительный анализ существующих математических методов локализации источников АЭ с количественной оценкой их эффективности по показателям скорости сходимости и точности определения координат дефекта. Интеграция отобранных методов в программный модуль, проведение вычислительных экспериментов для сопоставления результатов локализации и разработка алгоритма локализации источников АЭ для мониторинга целостности конструкций авиационной и космической техники.

4. Разработка бортового комплекса неразрушающего контроля на основе результатов с верификации алгоритма локализации на основе натурных экспериментов с использованием эталонных образцов элементов конструкций авиационной и космической, с оценкой точности локализации дефектов и достоверности контроля параметров целостности.

Научная новизна исследования

В результате выполненных теоретических исследований:

1. Экспериментально установлены закономерности изменения характеристик сигналов акустической эмиссии в процессе развития всех типов дефектов (сквозных, ударных) в алюминиевом сплаве АМг6, на основе полученных экспериментальных закономерностей разработана математическая модель, учитывающая параметры амплитуды, времени прихода сигнала и описывающая процесс разрушения материала образца.

2. Обоснован выбор математического метода Дэвидона – Флетчера – Пауэлла для разработки оригинального четырёхшагового алгоритма расчёта локализации дефекта, адаптированного к задачам мониторинга целостности конструкций космических аппаратов методом акустической эмиссии, на основе сравнительного анализа методов одномерного поиска, сопряжённых направлений, метода сопряжённых направлений Пауэлла, метода Ньютона и метода Дэвидона – Флетчера – Пауэлла.

3. Разработана бортовая система мониторинга корпуса космической станции неразрушающим методом АЭ включающая методику и схемы акустико-эмиссионного контроля элементов конструкции космических аппаратов (отличающиеся по точности и энергопотреблению) на основе экспериментального исследования, которая позволяет обеспечить погрешность локализации источников акустико-эмиссионных не более 10%, точность определения утечки воздуха через дефект не более 15% от максимального расстояния между датчиками при обнаружении утечек воздуха, что повышает надежность элементов конструкции космических аппаратов.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

1. Установленные корреляционные зависимости между изменением параметров механических свойств алюминиевых сплавов и параметров сигналов акустической эмиссии в алюминиевых сплавах АМг6 позволили создать универсальную математическую модель для прогнозирования разрушения материала, которая может углубить понимание механизма разрушения структуры материала под нагрузкой.

2. Определены информативные параметры АЭ контроля и закономерности их изменения в зависимости от типа дефекта (сквозного, ударного).

3. Экспериментально обоснован выбор математической модели Дэвидона – Флетчера – Пауэлла для решения задачи поиска локации источников сигналов акустической эмиссии, поскольку позволяет обеспечить наименьшую погрешность (около 10 мм), наибольшую скорость сходимости (быстрее на 25% по сравнению с аналогами), меньшее влияние шумов на результаты расчетов (влияние шума на 16% меньше), что расширяет методологическую базу расчётов локализации дефектов в условиях ограниченного времени и вычислительных ресурсов при условии обеспечения высокой точности локации источников.

4. Созданы методика и схемы неразрушающего контроля элементов конструкции элементов космических аппаратов, включающие: оптимальные схемы расстановки датчиков акустической эмиссии на элементах конструкции; алгоритм применения комплекса для мониторинга целостности конструкций в условиях орбитальной эксплуатации; критерии диагностики предельного состояния материала (в т.ч. порог накопления кумулятивной энергии $5 \cdot 10^8$ условных единиц за три последовательных цикла нагружения).

5. Теоретически обоснована и практически реализована методика обнаружения утечек воздуха в корпусных элементах конструкции космических аппаратов на производственной базе ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королёва» с использованием полученных результатов исследования, показавшая практические результаты: погрешность локализации дефектов составила не более 10%, погрешность локализации утечек воздуха в корпусе под нагрузкой 0,1 кг/сут составляла не более 15 % от максимального расстояния между двумя ближайшими к месту утечки датчиками.

6. Результаты экспериментальных исследований внедрены в акустико-эмиссионной системе «РАНИС», сертификационный номер № 78686-20 ООО «НДТ системы», в части математической модели и методики применения ее при неразрушающем контроле, также при разработке внутреннего регламента Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.Ф. Менделеева» для проверки системы поиска дефектов в конструкциях вакуумных камер из состава Государственного первичного специального эталона единицы давления для области абсолютных давлений в диапазоне $1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^3$ – ГЭТ 49-2016 методом акустической эмиссии и в образовательном процессе – в учебном

процессе кафедры «Технология патронного производства и обработка металлов давлением» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова.

7. Результаты экспериментального исследования использованы при разработке системы мониторинга состояния ТЗ.0069.085 «Средства мониторинга технического состояния конструкции», шифр СЧ ОКР «КК РОС», государственный контракт № 2432730300620020160055351/351-РС403/24/62 от 02.07.2024 на тему «Создание космического комплекса российской орбитальной станции».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Выявленные закономерности регистрации импульсов с максимальными амплитудами в материале образца в процессе начала движений дислокаций и при достижении физического предела текучести, установленная корреляционная зависимость между параметрами Ra-value и амплитудой импульсов, на основе которой разработана математическая модель (по формуле Пирсона), описывающая процесс разрушения материала образца, определены предельные коэффициенты эксплуатационной прочности для образцов без трещины и с трещиной (0,78 и 0,85 соответственно) при статическом растяжении.

2. Результаты экспериментального исследования нового алгоритма и методики с математической моделью локации дефектов на основе интеграции математического метода Дэвидона – Флетчера – Пауэлла в программно-аппаратный комплекс для поиска положения источника акустико-эмиссионных сигналов при механическом нагружении объекта контроля, отражающие улучшение характеристик поиска локации (средняя погрешность не превышала 10%, скорость нахождения локации возросла на 25%, понизилось влияние шума на 16%).

3. Практические рекомендации по внедрению бортового комплекса постоянного мониторинга целостности конструкции космической техники на основе метода акустической эмиссии для определения возможных ударных (внешних) воздействий с погрешностью локализации не более 10% и для определения утечки воздуха через дефект в корпусе с погрешностью определения местоположения не более 15% от максимального расстояния между двумя ближайшими к месту утечки датчиками с временем реакции системы на критическое событие – не более 0,5 с.

Достоверность разработанных решений подтверждена в ходе натурных исследований, выполненных при использовании физически обоснованных подходов, методов и протоколов в качестве основных инструментов теоретического исследования, проведением экспериментальных исследований по научно обоснованным методикам, с использованием оборудования, измерительных приборов и аппаратуры, прошедших метрологическую аттестацию в сертифицированных учреждениях, совпадением результатов с надежными результатами других исследований при сопоставимых условиях.

Внедрение результатов работы

Основные результаты исследований, приведенные в работе, нашли применение:

- при разработке системы мониторинга состояния «КК РОС»;
- при проектировании и разработке акустико-эмиссионной системы «РАНИС», сертификационный номер № 78686-20 ООО «НДТ системы», в части математической модели и методики применения ее при неразрушающем контроле;
- в образовательном процессе – в учебном процессе кафедры «Технология патронного производства и обработка металлов давлением» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова при изучении дисциплин «Материалы в пружинном производстве», «Акустические методы контроля и диагностики», при выполнении выпускных

квалификационных работ обучающимися по направлению 15.04.03 «Прикладная механика»;

– при разработке внутреннего регламента Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.Ф. Менделеева» для проверки системы поиска дефектов в конструкциях вакуумных камер из состава Государственного первичного специального эталона единицы давления для области абсолютных давлений в диапазоне $1 \cdot 10^{-6}$ - $1 \cdot 10^3$ – ГЭТ 49-2016 методом акустической эмиссии.

Апробация работы

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались и были отмечены дипломами победителя на ряде отечественных и зарубежных конференций, отраслевых конкурсах: конкурсе лучших инновационных проектов в сфере науки и высшего образования Санкт-Петербурга в 2021 году в номинации «Лучшая инновационная идея» за проект «Разработка бортового комплекса, осуществляющего неразрушающий контроль конструкций летательных аппаратов в режиме реального времени при эксплуатации методом акустической эмиссии» (ИП № 09/21); Всероссийском молодежном научно-инновационном конкурсе «УМНИК» в 2021 г. от Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере с привлечением финансирования НИР по теме «Разработка бортового комплекса, осуществляющего неразрушающий контроль конструкций летательных аппаратов в режиме реального времени при эксплуатации методом акустической» на сумму в 500 тыс. руб. (договор № 17838ГУ/2022 от 16.05.2023); Всероссийском молодежном научно-инновационном конкурсе «Студенческий стартап» в 2023 г. от Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере с привлечением финансирования НИР по теме «Разработка бортового комплекса, осуществляющего неразрушающий контроль конструкций летательных аппаратов в режиме реального времени при эксплуатации методом акустической эмиссии» на сумму в 1 млн руб. (договор № 2443ГССС15-L/89986 от 08.12.2023); XVI Всероссийском межотраслевом молодежном конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (протокол № 3 от 22 ноября 2024 г.); конкурсе грантов 2024 года для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (протокол № 1/24 от 01.07.2024 г.); Всероссийском межотраслевом молодежном конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики», Москва, 2024 г. (III место в номинации «Ракетные и космические системы»); XXI Всероссийском конкурсе молодежных авторских проектов и проектов в сфере образования, направленных на социально-экономическое развитие российских территорий, «Моя страна – моя Россия»; XXVI Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности» (Санкт-Петербург, 3–6 апреля 2023 г.); конкурсе грантов 2023 года для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (Санкт-Петербург, 20 марта – 18 апреля 2023 г.); X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Защита от шума и вибрации» (Санкт-Петербург, 1–2 октября 2025 г.).

Личный вклад соискателя заключается в том, что автор выполнил в полном объеме обзор литературных источников, научное обоснование и разработку методики, алгоритма для регистрации, обработки, анализа и локализации источников сигналов

акустической эмиссии, а также экспериментальное исследование корреляционной зависимости изменения акустико-эмиссионных сигналов и изменения механических свойств алюминиевых образцов с трещиной и без трещины. Автор провел обработку результатов экспериментальных исследований и разработал рекомендации по применению комплекса, осуществив их проверку на практике. Диссертационная работа в полном объеме является самостоятельным исследованием. В работах, написанных в соавторстве, автор выявил зависимости исследуемых параметров, сформулировал выводы по исследованиям, описал проведенные эксперименты и их результаты.

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в научных изданиях и тематических сборниках научных трудов по материалам конференций. Всего по тематике диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 2 – в международной наукометрической базе Web of Science и Scopus, 5 работ в рецензируемых журналах, входящих в Перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки РФ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Тема и содержание диссертации соответствуют пункту 2 предметной области специальности 1.3.7 «Акустика», отрасль науки – технические науки: «п.2. Акустическая диагностика и неразрушающий контроль в транспорте и строительстве; акустический мониторинг зданий и конструкций».

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 115 наименований, 1 приложения, изложена на 160 страницах, содержит 15 таблиц и 77 рисунков. Оригинальность работы – 80.26%.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, указаны цель и перечислены основные положения, выносимые на защиту, указано на то, что недостаточно изученным является вопрос исследования процессов трещинообразования алюминиевых сплавов с АЭ сопровождением для разработки системы мониторинга состояния элементов и локализации дефектов методом АЭ для оценки технического состояния корпуса космической станции в процессе эксплуатации.

В первой главе представлено описание объекта исследования – элементов конструкции летательных и космических аппаратов.

Проанализированы существующие способы, требования и методики применения классических методов неразрушающего контроля для оценки основных показателей эксплуатационных свойств авиационной и космической техники. В результате были сделаны следующие выводы: существующие методы требуют выведения объекта из эксплуатации, частичного или полного его разбора на составляющие, полного доступа ко всем поверхностям объекта; не позволяют в полной мере проводить анализ объектов из-за сложной геометрической формы; неспособны обнаруживать в условиях открытого космоса во время эксплуатации ударные воздействия с погрешностью локализации не более 10 % и определять утечки воздуха через дефект (трещину) в корпусе.

Проведен анализ применимости метода АЭ для контроля целостности сварных и корпусных изделий различного назначения. Исследована специфика применения приборов и информационно-измерительных систем неразрушающего контроля на основе метода АЭ, рассмотрены методы и алгоритмы лоцирования сигналов. По результатам анализа представлены общие закономерности возникновения АЭ сигналов внутри материала, выделены схемы расстановки датчиков АЭ при проведении контроля.

Представлен анализ обширного перечня литературы по теме НК, по результатам которого было выявлено, что предлагаемые авторами приборы применимы только в лабораторных условиях, а применяемые решения отличаются низким быстродействием при обработке, высокой сложностью, отсутствием возможности пристраивания фильтрации в каждом канале, отсутствием возможности дистанционной передачи сигнала от ПЭП до вычислительного блока; кроме того, наблюдается искажение калибровочного сигнала, которое приводит к ухудшению точности определения скорости звука в объекте контроля.

Обзор состояния вопроса позволил выделить основные задачи исследования.

Во второй главе проведена разработка методики экспериментального исследования и осуществлено исследование по установлению закономерностей изменения параметров АЭ в зависимости от трещинообразования при статической и циклической нагрузке. Эксперименты проводились с плоским образцом, изготовленным согласно ГОСТ 1497-2018. В качестве материала выбран алюминиевый сплав АМгб, обладающий хорошей коррозионной стойкостью, легкостью, пластичностью и свариваемостью, который применяется при изготовлении корпусных элементов. В таблице 1 приведены механические свойства сплава. На рисунке 1 показаны эскизы изготовленных образцов, а на рисунке 2 – фотоснимки образцов.

Таблица 1 – Механические свойства сплава АМгб

Наименование свойства	Величина	Наименование свойства	Величина
Предел прочности (σ_B)	310–340 МПа	Коррозионная стойкость	Высокая, особенно в морской среде и агрессивных средах
Предел текучести ($\sigma_{0,2}$)	160–200 МПа	Свариваемость	Отличная
Относительное удлинение (δ)	15–20 % (в отожженном состоянии)	Обрабатываемость	Хорошо поддается холодной деформации
Твердость по Бриггеллю (НВ)	70–90 НВ	Температура плавления	~610–640 °С

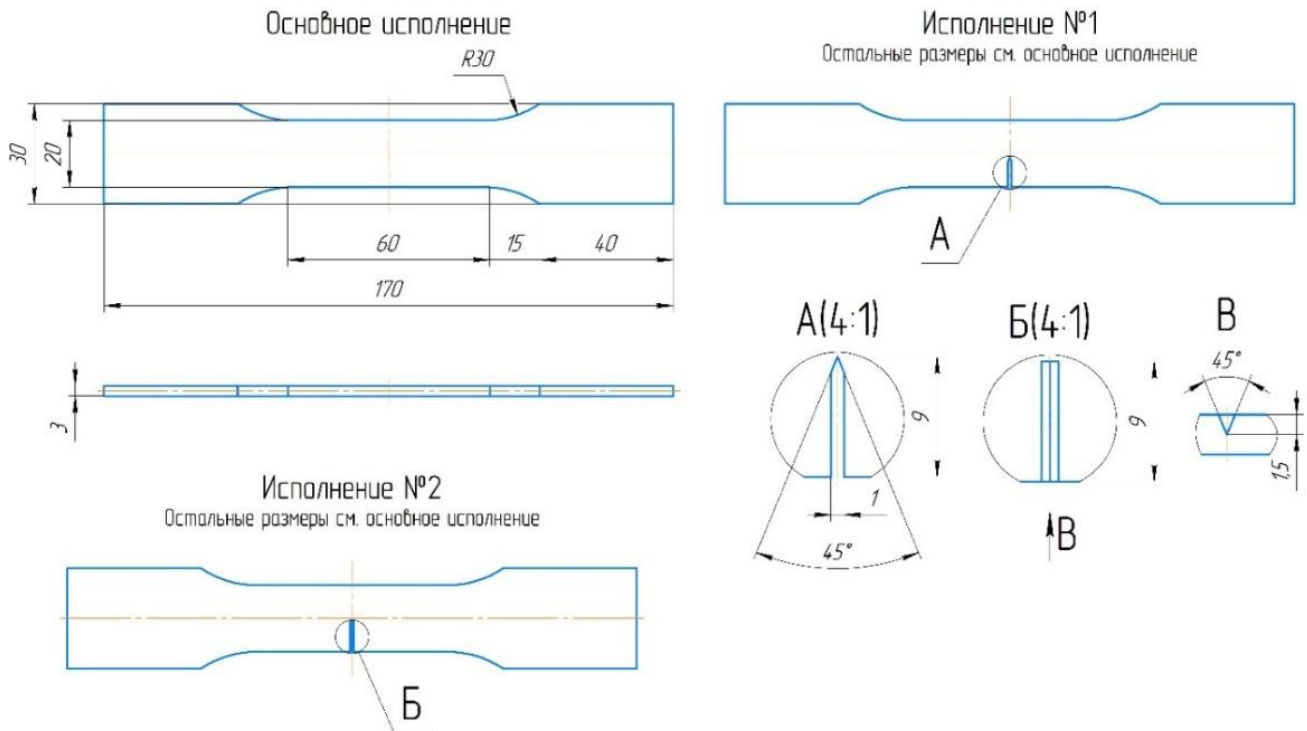


Рисунок 1 – Эскиз образцов без искусственного надреза (*основное исполнение*) и с имитацией дефекта (*исполнение №1 и исполнение №2*)

Для исследования корреляционной зависимости между изменением сигналов АЭ и изменением механических свойств алюминиевых сплавов с различными видами дефектов образцы № 3 и № 11 изготавливались без нанесения искусственных надрезов, на образец № 12 был нанесен сквозной надрез, а на образец № 4 – несквозной. В рамках исследования было испытано до 1000 образцов, но для удобства описания результатов рассмотрим четыре из них. После изготовления и проверки размеров образцы устанавливались в рабочую область испытательной машины SHIMADZU AG-X-1 и фиксировались зажимными губками. На образец крепился кронштейн с датчиком, подключался преусилитель АЭ. Ход инструмента был равен 10 мм/мин. В ходе статических испытаний образец растягивался до разрушения. При циклических испытаниях образец нагружался усилием, составляющим 60 % от максимальной нагрузки на разрыв. Число циклов равнялось 10. Схема алгоритма эксперимента представлена на рисунке 3.



Рисунок 2 – Фотоснимки изготовленных образцов



Рисунок 3 – Схема алгоритма для проведения экспериментов

В ходе экспериментов оборудование фиксировало параметры механических свойств (сила, напряжение, удлинение, время) и параметры АЭ (амплитуда, число импульсов, энергия, время, мощность, Ra-value, активность АЭ). Параметр Ra-value – это параметр, который характеризует отношение амплитуды сигнала к его длительности (насколько быстро сигнал достигает пиковой амплитуды). Он используется для классификации типов дефектов и анализа их природы. На рисунке 4 показана зависимость силовых параметров для цельного образца № 3, испытываемого на растяжение до разрушения, а также зависимости усилия, амплитуды, импульса от времени, зафиксированные в ходе испытаний. На рисунке 5 показана зависимость параметров образца № 12 со сквозным надрезом, испытываемого на растяжение до разрушения. На рисунке 6 отражена зависимость параметров для образца № 11 с искусственной несквозной трещиной, испытываемого на циклическую нагрузку без разрушения. На рисунке 7 отражена зависимость параметров для образца № 4 с искусственной несквозной трещиной, испытываемого на циклическую нагрузку без разрушения.

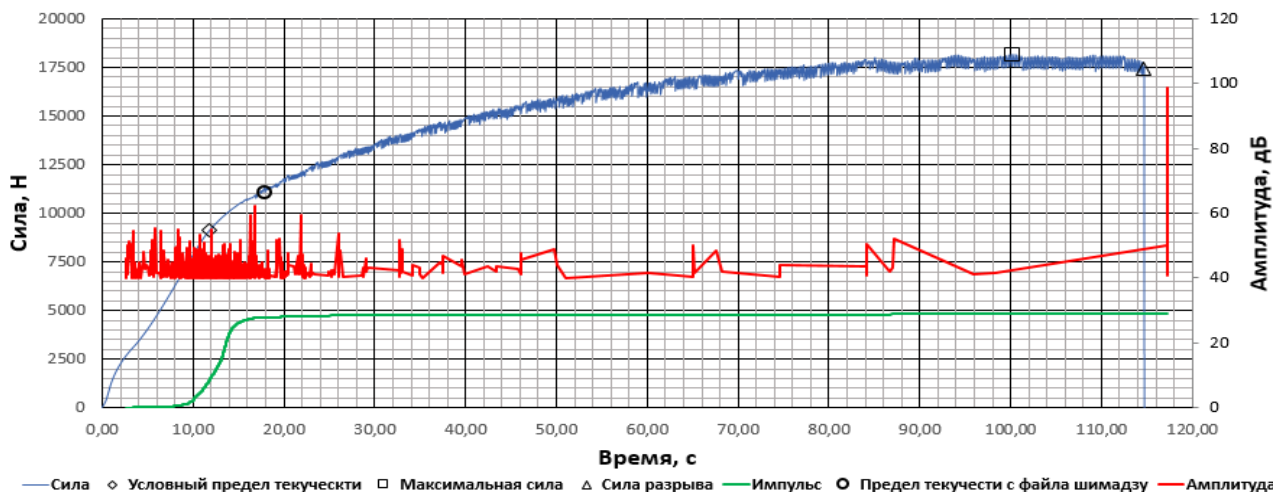


Рисунок 4 – Графики зависимости усилия, амплитуды, импульса от времени для алюминиевого цельного образца № 3 из АМГ6 при растяжении на испытательной машине SHIMADZU AG-X-1:

a – участок упругопластической деформации; *b* – участок пластической деформации с образованием очага деформации; *c* – этап разрушения и падения нагрузки

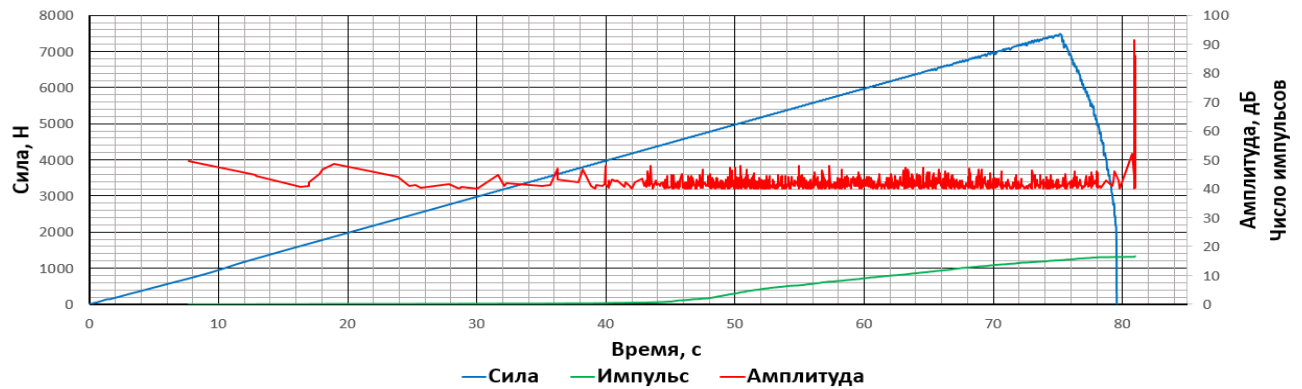


Рисунок 5 – Графики зависимости усилия, амплитуды, импульса от времени для алюминиевого цельного образца № 12 из АМГ6 при растяжении на испытательной машине SHIMADZU AG-X-1:

a_1, a_2, a_3, a_4 – зоны, разделенные по интенсивности сигналов акустической эмиссии

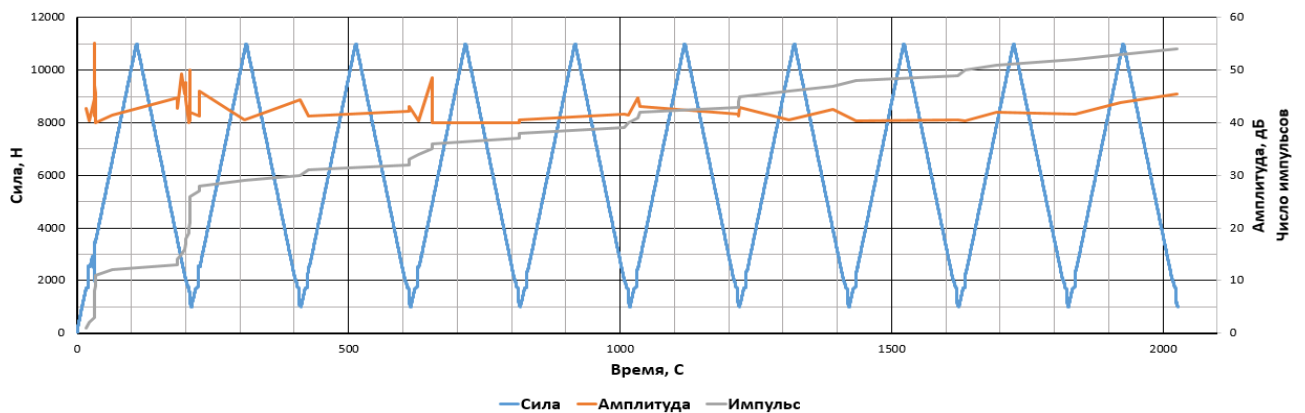


Рисунок 6 – Графики зависимости усилия, амплитуды, импульса от времени для алюминиевого цельного образца № 11 из АМГ6 при циклическом нагружении на испытательной машине SHIMADZU AG-X-1

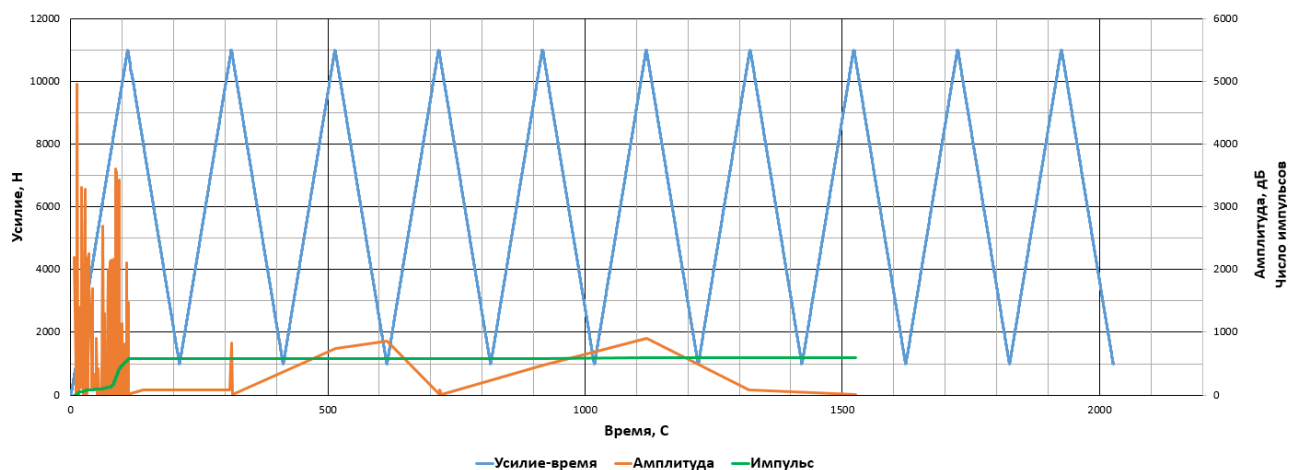


Рисунок 7 – Графики зависимости усилия, амплитуды, импульса от времени для алюминиевого образца № 4 с предварительно нанесенной несквозной трещиной из АМГ6 при циклическом нагружении на испытательной машине SHIMADZU AG-X-1

Следует отметить, что сигналы после разрушения образца классифицируются как техническая погрешность ввиду их одновременной регистрации прибором.

Анализ корреляционной зависимости изменения механических свойств алюминиевых сплавов и изменения параметров АЭ при испытаниях на разрыв показал, что при формировании разрушения присутствуют системные закономерности. При статическом растяжении до разрушения цельный образец демонстрирует классическую картину накопления повреждений: 75 % событий АЭ концентрируются в области пластической деформации при напряжениях выше 160 МПа, с максимальной амплитудой 55 дБ вблизи предела прочности. Характерно доминирование сигналов с высоким Ra-value (1850 мкс/дБ), что соответствует процессам потери пластической устойчивости. В образце со сквозным надрезом наблюдается принципиально иная картина: 90 % акустических событий возникают при напряжениях около 20 % от предела прочности цельного материала, что характеризует раннюю стадию активации дефектов в условиях нагружения, при этом регистрируется экстремальное энерговыделение. Ключевым маркером является сочетание низкого Ra-value с высокой амплитудой, что сигнализирует о хрупком характере разрушения. На основе математической формулы Пирсона, разработана модель взаимосвязи амплитуды и Ra-value (1) при испытании образцов на растяжение. Для цельных, образцов формула имеет вид формулы (2), а для образцов со сквозным надрезом – вид формулы (3). Для разработки модели взаимосвязи амплитуд и параметра Ra-value в акустической эмиссии формула Пирсона эффективна: она даёт статистически обоснованную оценку линейной связи между исследуемыми величинами.

$$r = \frac{\sum(A_i - \bar{A})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum(A_i - \bar{A})^2 \cdot \sum(P_i - \bar{P})^2}}, \quad (1)$$

где A – величина амплитуды, дБ; P – параметр Ra-value:

$$P = 5,8 \cdot A^2 - 420 \cdot A + 8200, \quad (2)$$

$$P = 12,5 \cdot A^2 - 850 \cdot A + 25\,000. \quad (3)$$

Коэффициент корреляции к моменту разрушения образца для образца № 12 составил 0,85, для образца № 3 – 0,78, что говорит об адекватном описании как низких, так и высоких значений Ra-value к моменту разрушения. Численные величины, отраженные в формулах (2) и (3), определялись экспериментально и зависят от параметров объекта исследования.

На следующем этапе был проведен анализ корреляционной зависимости изменения механических свойств алюминиевых сплавов и изменения параметров АЭ при циклических испытаниях для образцов № 4 и № 11. В таблице 2 приведены параметры полученных данных. При эксперименте с образцом № 4 был выявлен 11-кратный рост числа событий АЭ и 10-кратное увеличение высокоэнергетических сигналов ($> 10^9$ эе) в первом цикле. Наличие надреза в структуре образца № 4 сокращает стадию достижения критического сочетания длины и уровня нагрузки трещины, приводя образец к критическому состоянию раньше. Это было зафиксировано АЭ путем увеличения энергетических событий, превышающих величину 10^9 эе. Анализ данных также показал, что в дальнейшем следует рассматривать кластеры, в которых АЭ-события превышают 20 событий за цикл с энергией более 10^9 эе, индикатором концентратора напряжений. В случае с параметром Ra-value, превышающим 1000 мкс/дБ, можно считать, что в объекте проявляется разрушение, рост и объединение микротрещин.

Таблица 2 – Параметры АЭ-данных, полученных при циклическом испытании образцов № 4 и № 11

Наименование параметра	Образец № 4 (с надрезом)	Образец № 1 (цельный)	Разница
Общее число событий	591	54	~ в 11 раз
Энергетические события с величиной $> 10^9$	12	1	в 12 раз
Средняя энергия, эе	$3,2 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^8$	~ в 2,13 раз
Макс. мощность, эе/с	$1,62 \cdot 10^9$ ($t = 15,212$ с)	$7,604 \cdot 10^8$ ($t = 654,064$ с)	~ в 3,45 раз
Распределение событий	92 % в первых 100 с	Равномерное	
Доля кластеров в общем числе событий	87 %	Менее 1 %	
Распределение энергии в ходе процессов	68 % энергии выделено за первые 3 цикла	41 % энергии в цикле 3	

Полученные данные от циклических испытаний были сопоставлены с результатами на разрыв. Анализ результатов экспериментов подтверждает универсальность выявленных закономерностей. Для всех типов дефектов (сквозных, ударных, искусственных) характерна ранняя кластеризация АЭ-событий при напряжениях ниже 30 % от предела текучести материала. Критическим индикатором является не абсолютное значение энергии, а ее доля в суммарном энерговыделении: события, превышающие 20 % от общей энергии АЭ в интервале нагружения, однозначно указывают на активацию дефекта. Был сделан вывод о том, что для эксплуатируемых конструкций критическое значение имеет скорость накопления кумулятивной энергии – превышение порога в $5 \cdot 10^8$ условных единиц за три последовательных цикла нагружения требует немедленного диагностирования. Полученные результаты позволили перейти к разработке нового алгоритма и методики для метода АЭ.

В главе 3 осуществлена разработка методики, алгоритма для регистрации, обработки, анализа и локализации сигналов акустической эмиссии. В простейшем случае для объемного элемента конструкции задача поиска локации источника АЭ по времени приема сигнала разнесенными в пространстве датчиками можно математически сформулировать следующим образом. Имеется K штук датчиков T_i , координаты которых известны (x_i, y_i, z_i) . Датчики перенумерованы по времени прихода сигнала. Известны разности времен приходов сигналов: $\Delta t_2, \dots, \Delta t_K$. Источник сигнала T_0 имеет неизвестные координаты, которые были обозначены (x_0, y_0, z_0) . При решении задачи сделаны допущения: скорость распространения сигналов АЭ в материале считается известной и постоянной во всех направлениях; сигнал распространяется от источника к датчику по прямой линии; источник сигнала является точечным. Если бы эти допущения выполнялись идеально, то для точного определения положения источника в пространстве было бы достаточно четырех датчиков. Поэтому если имеется всего K штук датчиков, то рекомендуется или просто брать первые четыре – те, куда сигнал пришел раньше, или набирать все возможные группы по 4 датчика (их будет C_K^4), решать задачу точно для каждой группы, а потом принимать за положение источника среднее арифметическое всех положений, полученных для групп. Другим подходом является подбор методом наименьших квадратов такого положения источника, чтобы суммарное квадратичное время отклонения расчетного времени прихода сигнала на датчики от фактического было минимальным. В таком случае расстояние между источником сигнала и датчиками:

$$R|T_0 T_i| = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}. \quad (4)$$

Тогда в допущениях распространения сигнала по прямой и постоянства скорости распространения время прихода сигнала на датчик T_i и разность времени прихода сигналов вычисляется по формулам (5) и (6) соответственно.

$$t_i = |T_0 T_i|/c, \quad (5)$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1, \dots, \Delta t_K = t_K - t_1. \quad (6)$$

Составляем функцию $L(x_0, y_0, z_0)$ квадратичных отклонений:

$$L(x_0, y_0, z_0) = (\Delta t_2 - \Delta t_2)^2 + \dots + (\Delta t_K - \Delta t_K)^2. \quad (7)$$

Необходимо найти такие значения x_0, y_0, z_0 при которых функция $L(x_0, y_0, z_0)$ достигает минимума. Значения x_0, y_0, z_0 и принимаются за искомые координаты источника сигнала АЭ.

Задачи поиска минимума и максимума относятся к задачам поиска экстремума. Но так как задача поиска максимума для функции $f(x)$ равносильна задаче поиска минимума для функции $(-f(x))$, то достаточно рассматривать только задачи на минимум. Методы поиска минимума функции $f(x) = f(x_1, \dots, x_N)$ нескольких переменных делятся на следующие три группы: методы, в которых необходимо вычислять значения только самой функции; методы, в которых необходимо вычислять значения самой функции и ее частных производных первого порядка; методы, в которых необходимо вычислять значения самой функции и ее частных производных первого и второго порядка. Из общих соображений следует, что выбор метода из той или иной группы определяется возможностью (или ее отсутствием) сравнительно легко вычислять значения первых (и вторых) производных, причем такая возможность должна ускорять сходимость метода к точке минимума. То есть методы 3-й группы в обычных условиях (на такой функции, к которой методы всех групп применимы) сходятся быстрее методов 2-й группы, а те – быстрее методов 1-й группы. Однако в ряде практических инженерных задач «информация о значениях целевой функции является единственной надежной информацией», а потому иногда необходимо применять методы 1-й и 2-й групп. Последние носят общее название градиентных методов. Предполагается, что функция и ее частные производные первого и второго порядка существуют и непрерывны. Значительное число методов работают по итерационной формуле, и способы определения параметра, характеризующего длину шага и вектора направления поиска, детерминируются особенностями выбранного метода.

Были проанализированы и сопоставлены следующие методы поиска: одномерный поиск локаций, метод сопряженных направлений, метод сопряженных направлений Пауэлла, метод Ньютона, метод Дэвидона – Флетчера – Пауэлла. Анализ показал, что метод Дэвидона – Флетчера – Пауэлла обладает наибольшим потенциалом для вычисления локаций источников сигналов АЭ, и на его основе были разработаны математическая модель и алгоритм действий по расчету локации, состоящий из четырех шагов.

Шаг 1. Произвольным образом берем $x^{(0)}$. Полагаем $A^{(0)} = I$ (единичная матрица). Вычисляем градиент минимизируемой функции $f(x)$:

$$g(x) = \nabla f(x), \quad (8)$$

$$gg^{(0)} = g(x^{(0)}). \quad (9)$$

Шаг 2. Вычисляем направление $s^{(0)} = -g(x^{(0)})$. Ищем «одномерным поиском» из точки $x^{(0)}$ в направлении $s^{(0)}$ точку $x^{(1)}$, минимизирующую функцию

$$q(\lambda) = f(x^{(0)} + \lambda s^{(0)}). \quad (10)$$

Вычисляем значение и полагаем $k = 0$.

$$g^{(1)} = g(x^{(1)}). \quad (11)$$

Шаг 3. Рассчитываем изменение точки $\Delta x^{(k)} = x^{(k+1)} - x^{(k)}$ и соответствующее изменение градиента $\Delta g^{(k)} = g(x^{(k+1)}) - g(x^{(k)})$. Рассчитываем корректирующую матрицу $A_c^{(k)}$ по формуле:

$$A_c^{(k)} = \frac{\Delta x^{(k)} \Delta x^{(k)T}}{\Delta x^{(k)T} \Delta g^{(k)}} - \frac{A^{(k)} \Delta g^{(k)} \Delta g^{(k)T} A^{(k)}}{\Delta g^{(k)T} A^{(k)} \Delta g^{(k)}}. \quad (12)$$

Рассчитываем матрицу $A^{(k+1)}$ по формуле: $A(k+1) = A_c^{(k)} + A^{(k)}$. Вычисляем направление: $s^{(k+1)} = -A^{(k+1)} g(x^{(k+1)})$.

Шаг 4. Если минимум не достигнут (условием достижения минимума можно считать выполнение неравенства $|g^{(k)}| \leq \varepsilon$, где ε – заранее заданная положительная константа), то полагаем (присваиваем) $k = k + 1$. Ищем «одномерным поиском» из точки $x^{(k)}$ в направлении $s^{(k)}$ точку $x^{(k+1)}$, минимизирующую функцию $q(\lambda) = f(x^{(k)} + \lambda s^{(k)})$. Вычисляем значение $g^{(k+1)} = g(x^{(k+1)})$.

Переходим к шагу 3. Хотя теоретически матрица $A^{(k)}$ всегда является положительно определенной, но практически после выполнения какого-то количества шагов она может оказаться плохо обусловленной (какие-то ее собственные числа окажутся хоть и положительными, но очень маленькими по модулю). В этом случае рекомендуется в качестве новой матрицы $A^{(k)}$ снова взять единичную. Однако такие действия замедляют сходимость.

В главе 4 проведены натурные испытания комплекса с разработанной математической моделью и методикой проведения эксперимента на производственной базе ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева. В ходе эксперимента проверялась возможность прибора находить локацию дефекта при нагрузке образцов, а также способность прибора находить наличие и локацию утечки воздуха через трещины при имитации работы в космическом пространстве. Результаты испытаний позволили утверждать, что метод акустической эмиссии обладает достаточной чувствительностью, чтобы регистрировать дефекты в тонкостенных элементах конструкций при моделировании условий утечки в безвоздушном пространстве во всех случаях при создании давления. Выявлено, что дефекты лоцируются при различных схемах нагружения испытательного образца (один, два и три источника нагрузки) с достаточной точностью (не превышающей ± 10 мм).

Внедрение программно-аппаратного комплекса АЭ, как элемента постоянного мониторинга состояния сплошности конструкций для конструкций космических аппаратов для ПАО РКК «Энергия» им. С. П. Королева имеет большой потенциал, что подтверждается документами:

- протокол № 1 совещания по вопросу системы мониторинга целостности конструкции от 26 апреля 2024 г. утвержденный заместителем генерального конструктора, главным конструктором РОС;
- программа-методика № 1-082-24 от 15.05.24 г. «Проведение работ по исследованию возможности поиска утечек воздуха методом акустической эмиссии» утвержденная заместителем руководителя НТЦ по материаловедению ПАО РКК «Энергия»;
- техническое задание на выполнение составной части опытно-конструкторской работы «Средства мониторинга технического состояния конструкции», шифр СЧ ОКР «КК РОС».

По результатам экспериментов разработаны практические рекомендации по применению комплекса для элементов станции РОС. На рисунке 8 представлена схема расстановки датчиков на модуле ЦМ. Аналогичные схемы были проработаны для модулей ШМ, УММ. Разработан итоговый алгоритм обработки и оценки производительности работы бортового комплекса.

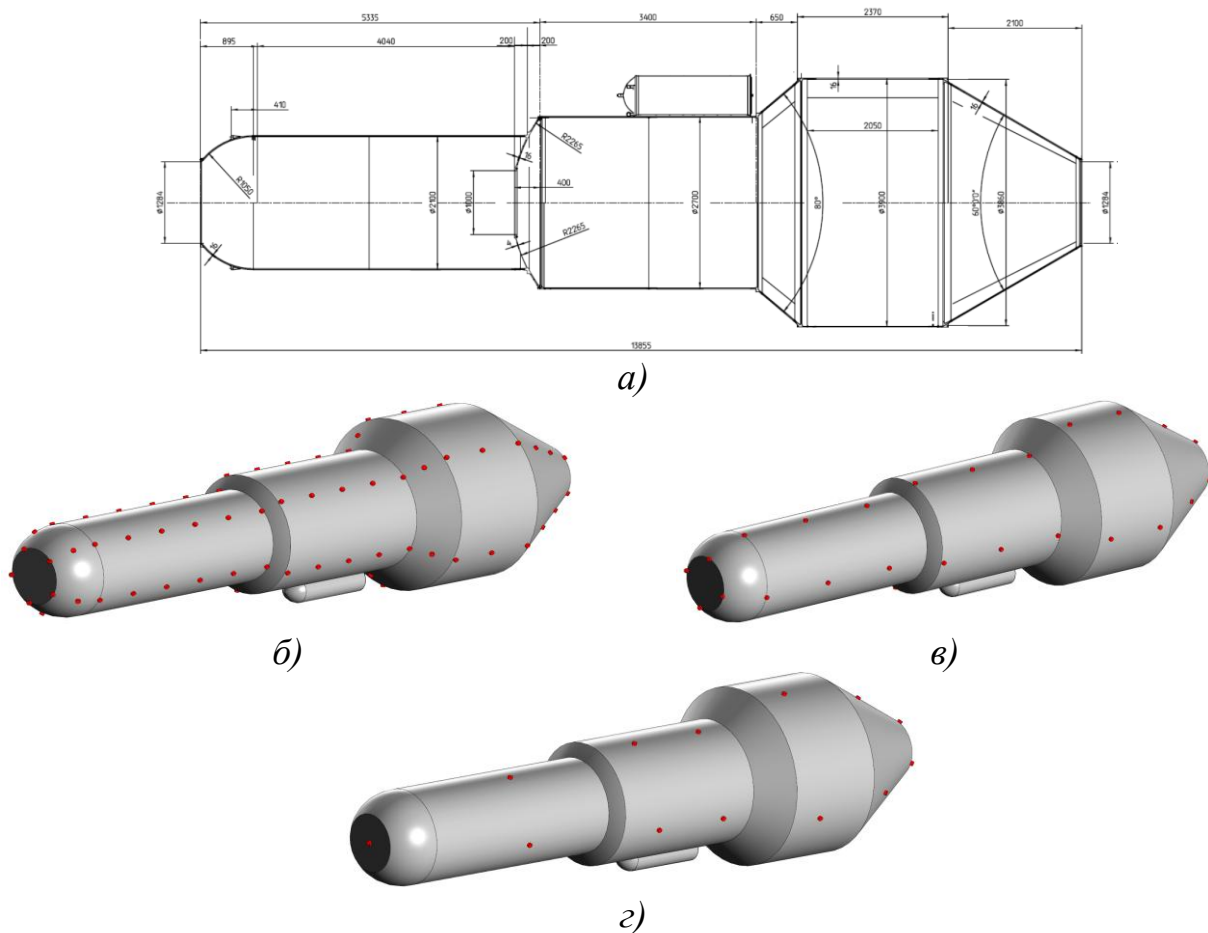


Рисунок 8 – Эскиз и визуальное отображение расстановки датчиков на герметичный отсек модуля ЦМ орбитальной станции КК РОС:

а – эскиз ЦМ; б – схема установки 12 датчиков на корпусе ЦМ; в – схема установки 41 датчика на корпусе ЦМ; г – схема установки 27 датчиков на корпусе ЦМ

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертационной работе на основе результатов научного исследования предложено решение актуальной научной задачи – повышение уровня безопасности и продление жизненного цикла использования элементов конструкции Российской орбитальной станции путем разработки алгоритма расчёта локации дефекта, адаптированного к задачам мониторинга целостности конструкций космических аппаратов и практических рекомендаций по применению методики и программно-аппаратного комплекса.

На основании проведенных исследований получены научные результаты:

1. Получена база экспериментальных данных о возникновении и развитии дефектов в структуре алюминиевых сплавов в процессе трещинообразования при акустико-эмиссионном сопровождении, подтверждающая корреляционную зависимость между параметрами изменения механических свойств алюминиевых сплавов и изменением сигналов акустической эмиссии. Выявлено, что для всех типов дефектов (сквозных, ударных, искусственных) характерна ранняя кластеризация АЭ-событий при напряжениях ниже 30 % от предела прочности материала. Был сделан вывод о том, что для эксплуатируемых конструкций критическое значение имеет скорость накопления кумулятивной энергии: превышение порога в $5 \cdot 10^8$ условных единиц за три последовательных цикла нагружения требует немедленного диагностирования. Была разработана корреляционная модель взаимосвязи между параметрами Ra-value и амплитудой, отражающая степень близости объекта исследования к разрушению.

2. Расчетно-эмпирическим путем выявлено, что поиск точки минимума функции нескольких переменных для вычисления локации источника АЭ сводится к поиску подходящего приближенного метода решения такой задачи. Анализ методов одномерного поиска локаций, сопряженных направлений, не сопряженных направлений Пауэлла, метода Ньютона, метода Дэвидона – Флетчера – Пауэлла – показал, что последний метод обладает наибольшим потенциалом для вычисления локации источников сигналов АЭ поскольку обеспечивает погрешность локализации не более 10%, сокращает количество вычислительных циклов на 30% по сравнению с альтернативными методами, работает корректно и выдаёт точные результаты, даже если характеристики сигнала меняются — например, из-за помех, шумов, изменений амплитуды, частоты или других параметров. На его основе были разработаны математическая модель и алгоритм действий по расчету локации дефекта (источника сигнала АЭ), состоящий из четырех шагов для определения возможных ударных (внешних) воздействий и определения утечки воздуха через дефект (трещину) при постоянном мониторинге состояния бортовым комплексом неразрушающего контроля.

3. Подтверждена высокая эффективность алгоритма и математической модели, внедренной в программно-аппаратный комплекс неразрушающего контроля в условиях, приближённых к реальной эксплуатации, — за счёт проведения натурных испытаний на производственной базе ПАО РКК «Энергия» им. С. П. Королева с внедрением разработанной математической модели и алгоритма локализации. Получены показатели эффективности прибора: погрешность локализации источников АЭ-сигналов — не более 10%; точность определения утечки воздуха через дефект (трещину) в корпусе — не более 15% от максимального расстояния между двумя ближайшими к месту утечки датчиками; время реакции системы на превышение критического порога кумулятивной энергии – не более 0,5 с. На основе результатов испытаний разработан алгоритм применения комплекса для мониторинга целостности конструкций Российской орбитальной станции в условиях орбитальной эксплуатации и предложены оп-

тимальные схемы расстановки датчиков АЭ на элементах конструкции, обеспечивающие максимальную чувствительность и достоверность контроля.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Разработка бортового комплекса неразрушающего контроля конструкции летательного аппарата методом акустической эмиссии / Е. Ю. Ремшев, И. А. Соболев, А. И. Олехвер, В. Ю. Лукичев // *Noise Theory and Practice*. – 2021. – Т. 7, № 2 (24). – С. 65–82. – EDN YWXWJR (по спец. 1.3.7).
2. *Обеспечение контроля качества сварных соединений методом акустической эмиссии / М. М. Сутаев, И. А. Кочура, И. А. Соболев, Е. Ю. Ремшев // *Металлообработка*. – 2024. – № 1 (139). – С. 47–54. – DOI 10.25960/mo.2024.1.47. – EDN MYFZEI.
3. *Разработка бортового комплекса для неразрушающего контроля летательных аппаратов методом акустической эмиссии / И. А. Соболев, Д. В. Дитятев, В. Ю. Лукичев [и др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2023. – № 5. – С. 544–548. – DOI 10.24412/2071-6168-2023-5-544-545. – EDN DPCHSG.
4. * Исследование качества полых корпусных деталей, полученных холодной штамповкой, методом акустической эмиссии / И. А. Соболев, Н. А. Бунина, Е. Ю. Максимович [и др.] // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2022. – № 7. – С. 269–274. – DOI 10.24412/2071-6168-2022-7-269-274. – EDN FTEVQK.
5. * Соболев И. А. Разработка практических рекомендаций по диагностике состояния целостности алюминиевых изделий авиационного и космического назначения при использовании метода акустической эмиссии / И. А. Соболев // *Noise Theory and Practice*. – 2025. – № 3. – С. 81–92 (по спец. 1.3.7).
6. ** Study of the effect of cyclic loading on the structure and mechanical properties of materials / I. Sobolev, P. Ermolenkov, M. Kalugina [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2024. – Vol. 3102. – Article no. 020034. – DOI 10.1063/1.5132278.
7. **Research of the possibility of applying the acoustic emission method in searching for internal defects in materials and structure / I. Sobolev, D. Azanov, D. Dityatev [et al.] // *III International Scientific and Practical Symposium “Materials Science and Technology” (MST-III-2023) : AIP Conference Proceedings, Khujand, October 24–26, 2023*. – Vol. 3154. – Melville : AIP PUBLISHING, 2024. – Article no. 20021. – DOI 10.1063/5.0201642. – EDN PQPQSA.
8. Исследование моделирования дефектов в образцах при испытаниях на одноосное растяжение / Д. Е. Артеменко, Р. С. Богомолов, Е. Ю. Ремшев, И. А. Соболев // *Третья студенческая научная конференция факультета «Оружие и системы вооружения» (Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ»)* : материалы конференции, Санкт-Петербург, 23–24 апреля 2024 года. – Санкт-Петербург : Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2024. – С. 10–16. – EDN DLXCKB.
9. Бильдина, К. А. Разработка авиационных и космических бортовых систем неразрушающего контроля на основе метода акустической эмиссии / К. А. Бильдина, И. А. Соболев, А. И. Олехвер // *Молодежь и будущее авиации и космонавтики : сборник аннотаций конкурсных работ XVI Всероссийского межотраслевого молодежного конкурса научно-технических работ и проектов*, Москва, 18–22 ноября 2024 г. – Москва : Перо, 2024. – С. 103–104. – EDN WZXPIZ.
10. Соболев, И. А. Разработка авиационных и космических бортовых систем неразрушающего контроля на основе метода акустической эмиссии / И. А. Соболев, А. И. Олехвер, К. А. Бильдина // *Молодежь и будущее авиации и космонавтики : сборник аннотаций конкурсных работ XVI Всероссийского межотраслевого молодежного конкурса научно-технических работ и проектов*, Москва, 18–22 ноября 2024 г. – Москва : Перо, 2024. – С. 39. – EDN CQWYVE
11. Инновационный метод акустической эмиссии в обеспечении качества изделий машиностроения / И. А. Соболев, М. С. Рожков, Д. А. Азанов, А. Д. Шматко // *Машиностроение: инновационные аспекты развития* : материалы Международной научно-практической конферен-

ции, Санкт-Петербург, 29 марта 2024 г. – Санкт-Петербург : ИП Жукова Елена Валерьевна, 2024. – С. 85–89. – EDN VQCWRS..

12. Исследование процессов деформирования и разрушения природоподобной ячеистой структуры "Примитив Шварца" в условиях высокоскоростных нагрузок / А. Ю. Колыванов, С. В. Балабанов, И. А. Соболев [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. – 2026. – № 2(396). – С. 47-59. – DOI 10.15372/PMTF202415613. – EDN VYOSGA.

13. Соболев, И. А. Оценка возможности применения метода акустической эмиссии при проектировании космических и авиационных бортовых систем неразрушающего контроля / И. А. Соболев, Д. А. Азанов, Д. В. Дитятев // Молодежь. Техника. Космос : XVII Международная молодежная научно-техническая конференция, приуроченная к 150-летию со дня основания Ремесленного училища цесаревича Николая, Санкт-Петербург, 24–27 марта 2025 г. – Санкт-Петербург : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова», 2025. – С. 105-109. – EDN QPTKCK.

14. Применение многоуровневой модели параметров акустической эмиссии для расчета разрушающей нагрузки / Д. Е. Артеменко, Р. С. Богомолов, И. А. Соболев, Д. А. Азанов // Молодежь. Техника. Космос : труды XVII Международной молодежной научно-технической конференции, приуроченной к 150-летию со дня основания Ремесленного училища цесаревича Николая, Санкт-Петербург, 24–27 марта 2025 г. В 4 томах. – Санкт-Петербург : Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2025. – С. 197–201. – EDN UHDTJO.

15. Исследование возможности применения метода акустической эмиссии на стадии предэксплуатационной подготовки изделий / Т. М. Абу Фадда, И. А. Соболев, С. В. Свирелкин, Д. А. Азанов // Пятая студенческая научная конференция факультета «Оружие и системы вооружения» : материалы конференции, Санкт-Петербург, 23–25 апреля 2025 г. – Санкт-Петербург : Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2025. – С. 7–10. – EDN VFRYFI.

* По списку ВАК.

** По списку Scopus и Web of Science

Соболев Илья Александрович

РАЗРАБОТКА БОРТОВОГО КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА ЦЕЛОСТНОСТИ КОНСТРУКЦИИ АВИАЦИОННОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В печать __.07.2026. Формат 60×84/16.

Объем 1,4 усл. п. л. Тираж 100 экз. Заказ № __.

Издательство Балтийского государственного технического университета
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1.

Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Тираж 100 экз.