

ОТЗЫВ

официального оппонента Кинжагулова Игоря Юрьевича
на диссертацию Соболева Ильи Александровича
на тему: «Разработка бортового комплекса мониторинга
целостности конструкции авиационной и космической
техники методом акустической эмиссии», представленную на соискание ученой
степени кандидата технических наук по специальности 1.3.7 – Акустика

1. Общие сведения о диссертации

Диссертационная работа Соболева Ильи Александровича на тему: «Разработка бортового комплекса мониторинга целостности конструкции авиационной и космической техники методом акустической эмиссии» по поставленным целям и задачам исследований соответствует предметной области специальности 1.3.7 – Акустика в части пункта 2 паспорта научной специальности: акустическая диагностика и неразрушающий контроль в транспорте и строительстве; акустический мониторинг зданий и конструкций.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 115 наименований и 1 приложения. Работа изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 15 таблиц и 77 рисунков.

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 работы опубликованы 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, два из них в журналах уровня К2 из перечня ВАК по научной специальности 1.3.7 – Акустика.

2. Актуальность темы диссертации

Надежность, безопасность и долговечность конструкций авиационной и ракетно-космической техники напрямую зависят от своевременного обнаружения дефектов на ранних стадиях их развития. Эксплуатация космических аппаратов и орбитальных станций протекает в условиях воздействия экстремальных факторов: глубокого вакуума, циклического термонагружения, вибрационных нагрузок, а также постоянной угрозы ударов микрометеороидов и частиц космического мусора, способных приводить к образованию сквозных пробитий и нарушению герметичности отсеков.

Традиционные методы неразрушающего контроля (ультразвуковой, вихретоковый, рентгенографический и др.) ориентированы преимущественно на периодическую дефектоскопию в наземных условиях, требуют прямого доступа к контролируемым поверхностям и непригодны для непрерывного мониторинга конструкций сложной пространственной конфигурации в режиме реального

БГТУ "ВОЕНМЕХ"
им. Д.Ф. Устинова
Вх. № 81-26а-18
от 18.09.2026

времени на этапе штатной орбитальной эксплуатации. В этой связи метод акустической эмиссии (АЭ), обладающий высокой чувствительностью к процессам микро- и макроразрушения и позволяющий вести пассивный интегральный мониторинг крупногабаритных тонкостенных оболочек с минимальным количеством преобразователей, является одним из наиболее перспективных.

Вместе с тем практическая реализация бортовых систем АЭ-контроля для авиационной и космической техники сдерживается недостаточной изученностью закономерностей генерации сигналов АЭ при циклическом нагружении алюминиевых сплавов с развивающимися трещинами, а также отсутствием помехоустойчивых, быстродействующих алгоритмов пространственной локализации источников АЭ, адаптированных к ограниченным вычислительным ресурсам бортовых ЭВМ.

Таким образом, тема диссертационной работы И.А. Соболева, посвященная установлению информативных критериев разрушения алюминиевых сплавов, созданию адаптированного алгоритма локализации источников АЭ и формированию научно обоснованных рекомендаций по построению бортового комплекса мониторинга целостности герметичных корпусов космических аппаратов, является весьма актуальной и имеет важное научно-практическое значение.

3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выводы и практические рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, отличаются научной обоснованностью, что подтверждается следующим:

- корректным использованием фундаментальных положений механики разрушения, физической акустики, теории упругости и численных методов оптимизации;
- репрезентативным объемом экспериментальных исследований статического и циклического нагружения стандартных плоских образцов из авиационного алюминиево-магниевого сплава АМгб (испытано значительное количество образцов, как без концентраторов, так и с нанесенными сквозными и несквозными концентраторами);
- успешной верификацией разработанных алгоритмических и методических решений в ходе натурных и полунатурных испытаний на крупногабаритных конструкциях и вакуумных стендах производственной базы ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева» и ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

4. Научная новизна работы и достоверность результатов

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Экспериментально установлены закономерности изменения амплитудно-временных и энергетических параметров сигналов АЭ на стадиях упругопластической деформации, прерывистой текучести (эффекта Портевена – Ле Шателье) и докритического подроста трещин в сплаве АМгб. Предложены эмпирические математические модели, связывающие отношение амплитуды к длительности нарастания (параметр Ra -value) и амплитуду АЭ импульсов, позволяющие количественно оценивать меру приближения материала к предельному состоянию.

2. Теоретически обоснована и реализована адаптация квазиньютоновского метода оптимизации Дэвидона – Флетчера – Пауэлла для задачи разностно-дальномерной локализации источников АЭ в тонкостенных оболочечных элементах конструкций, обеспечивающая высокую скорость сходимости и устойчивость к случайным инструментальным погрешностям измерения времени прихода волны.

3. Научно обоснована структура и методика функционирования бортового комплекса АЭ-мониторинга, обеспечивающего отдельное обнаружение и пространственную локализацию как дискретных импульсов от ударных воздействий и подроста трещин, так и квазинепрерывного истечения газа при разгерметизации тонкостенных корпусных элементов.

Достоверность результатов диссертационного исследования обусловлена применением апробированных методик физико-механических испытаний, согласованностью полученных данных о стадиях разрушения сплава АМгб с результатами независимых отечественных и зарубежных исследователей, положительными результатами натурных экспериментов в РКК «Энергия», а также подтверждением эффективности алгоритмов в реальных образцах аппаратуры («РАНИС», сертификат № 78686-20).

5. Оценка содержания диссертации

Диссертация имеет логическую структуру и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и одного приложения.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость положений, выносимых на защиту, приведены сведения об апробации и публикациях.

В **первой главе** выполнен аналитический обзор существующих методов и технических средств неразрушающего контроля, применяемых в авиационной и ракетно-космической отраслях. Рассмотрены физические основы метода АЭ, классификация алгоритмов локации (аналитических и итерационных) и схемы

пространственной расстановки преобразователей. По результатам анализа научно-технической литературы и патентного фонда (включая базы Роспатента, USPTO, WIPO и др.) показано отсутствие специализированных автономных бортовых систем мониторинга целостности авиационных и космических аппаратов на базе метода АЭ, что позволило автору строго сформулировать цель и конкретные задачи исследования.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям акустико-эмиссионных откликов сплава АМгб при статическом растяжении и циклическом нагружении образцов различной геометрии: сплошных, с искусственным сквозным надрезом и с несквозным ударным повреждением. Автором проведен детальный анализ взаимосвязи между механическими характеристиками деформирования и параметрами АЭ (активностью, кумулятивной энергией, амплитудой, параметром Ra-value). Выявлены ключевые диагностические маркеры: показано, что для дефектных образцов свыше 85–90% высокоэнергетических АЭ событий генерируются на ранних этапах нагружения (при напряжениях ниже 30% от предела текучести), а критическим признаком развития макротрещины выступает комбинация низкого значения параметра Ra-value (< 500 мкс/дБ) с амплитудой (> 45 дБ). Предложены критерии предельного состояния конструкции по темпу накопления энергии ($> 5 \cdot 10^8$ усл. ед. за три цикла).

В третьей главе представлена математическая постановка задачи определения координат источника АЭ по разностям времен прихода АЭ сигналов на распределенную антенную решетку преобразователей АЭ. Задача сведена к минимизации нелинейной функциональной невязки методом наименьших квадратов. Проведен сравнительный теоретический анализ методов оптимизации: одномерного поиска, метода сопряженных направлений Пауэлла, метода Ньютона, метода Флетчера – Ривса и квазиньютоновского метода Дэвидона – Флетчера – Пауэлла (DFP). Обоснованы преимущества метода DFP, не требующего прямого вычисления матрицы вторых производных (гессиана) на каждом итерационном шаге, и формализован четырехшаговый алгоритм расчета координат дефекта.

В четвертой главе описаны результаты натурных испытаний разработанного аппаратно-программного комплекса на производственной базе ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева». Эксперименты проводились на крупногабаритных сварных панелях из сплава АМгбНОП со сквозными усталостными трещинами в условиях перепада давления «атмосфера - вакуум», моделируемых с помощью вакуумной камеры. Подтверждена возможность обнаружения и локализации утечек воздуха с погрешностью не более 15% от межсенсорного расстояния и локализации ударных повреждений с погрешностью не более 10%. На основе полученных результатов разработаны схемы расстановки антенных решеток преобразователей (варианты на 112, 41 и

27 преобразователей) для герметичных отсеков модулей Российской орбитальной станции и предложены практические рекомендации по реализации бортового диагностического комплекса.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы, полностью отражающие содержание поставленных задач.

Автореферат и опубликованные работы соискателя (15 публикаций, в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ и 2 публикации в изданиях, индексируемых в Scopus/Web of Science) адекватно и полно отражают основное содержание диссертации.

6. Замечания по работе

При общей безусловно положительной оценке диссертационной работы, актуальности темы и практической ценности результатов, по содержанию отмечены следующие существенные замечания:

1) Во введении и первой главе автор утверждает, что в трудах отечественных и зарубежных ученых *«не уделено достаточного внимания исследованию закономерностей изменения параметров АЭ при статическом и циклическом нагружении элементов конструкций от наличия трещин в материале образцов»*. Данное утверждение является научно некорректным и снижает степень разработанности проблемы. Вопросам акустико-эмиссионных исследований кинетики усталостных трещин, пластической деформации алюминиевых сплавов и ресурсных испытаний авиационных конструкций посвящены труды сибирской научной школы профессора Л.Н. Степановой, а также работы В.А. Барат, С.И. Буйло, В.И. Иванова и ряда зарубежных авторов. В диссертации отсутствует детальное сопоставление предложенных критериев (Ra-value, кумулятивная энергия) с известными критериями школы Л.Н. Степановой (b-value, спектрально-энергетические коэффициенты, параметры корреляции пространственно-временных кластеров при ресурсных испытаниях). Кроме того, параметр Ra-value вводится формально как отношение амплитуды к длительности сигнала, но его связь с конкретными механизмами разрушения на микро- и мезоуровне раскрыта недостаточно. Неясно, почему низкие значения Ra-value при высокой амплитуде однозначно свидетельствуют о хрупком характере разрушения.

2) При заявленных «до 1000 образцов» выводы второй главы строятся на анализе единичных графиков всего четырех образцов (№ 3, 4, 11, 12); отсутствуют доверительные интервалы, средние значения параметров АЭ, дисперсии и коэффициенты вариации. Это не позволяет строго оценить статистическую устойчивость и воспроизводимость предлагаемых пороговых критериев. Не указаны контактная среда для датчиков RS-150L, проверка акустического контакта и калибровка чувствительности каналов источником Су-Нильсена, калибровка скорости распространения ультразвуковых волн в

материале для каждой серии образцов, а также настройки АЭ-системы (полосы пропускания, мертвое время, предыстория, тайм-аут). При статических испытаниях в захватах машины SHIMADZU AG-X-1 возможно появление мощных помех фрикционного происхождения. На стр. 66 автор сам указывает: *«Импульс показывает значительную активность АЭ до заметного роста усилия. Это может указывать на трение... в захватах машины...»*. Однако не описаны защитные «сторожевые» преобразователи, пространственная фильтрация зон захватов или акустические демпфирующие прокладки.

3) Автор объединяет под термином «целостность конструкции» как механическое трещинообразование, так и истечение газа при сквозной разгерметизации. Однако упругие волны от подраста трещин являются дискретными импульсными сигналами АЭ с выраженным передним фронтом, а акустический шум истечения воздуха через свищ носит квазистационарный непрерывный характер (газодинамический шум). Разностно-дальномерный алгоритм, раскрытый в главе 3 строго ориентирован на фиксацию моментов прихода дискретных импульсов АЭ. В главе 4 не раскрыто, каким именно образом вычислялась разность времен прихода АЭ сигналов для непрерывных шумов течи.

4) Предложенные в главе 4 схемы установки датчиков на модулях РОС предполагают размещение преобразователей АЭ на гладкой идеализированной цилиндроконической оболочке. В реальной конструкции космического модуля присутствуют шпангоуты, стрингеры, фрезерованные вафельные обечайки, сварные швы переменной толщины, кабельные трассы и кронштейны оборудования. Наличие этих элементов вызывает сильное отражение, дифракцию и экранирование акустических волн, что делает невозможным прямолинейный расчет дистанций по формулам, приведенным в главе 3 диссертации (пункт 3.1). В работе декларируется, что разработанный комплекс обеспечивает снижение влияния шумов на 16 %. Однако конкретные алгоритмы фильтрации и селекции сигналов в реальных условиях эксплуатации при наличии шумов различной природы (вибрации от работы бортовых систем, акустические шумы от вентиляции и насосов, электромагнитные помехи) не детализированы. Остаётся открытым вопрос о том, как система надёжно отличает полезные АЭ-сигналы от помех, особенно в условиях орбитальной станции, где уровень фонового акустического шума достаточно высок.

Замечания по представлению результатов

5) На графиках главы 2 (рисунки 2.8, 2.14 и др.) совмещение кривых сил и энергетических параметров АЭ крайне затрудняет визуальное прочтение и сопоставление. Дискретные по своей природе амплитудные значения на графиках зависимостей амплитуды сигналов АЭ от времени отображены сплошной линией, что создает иллюзию непрерывного процесса и не вполне корректно отражает физическую природу регистрируемых сигналов. АЭ

представляет собой последовательность дискретных импульсов, и их представление в виде непрерывной кривой может затруднять интерпретацию результатов, особенно при анализе редких высокоамплитудных событий.

Отмеченные замечания и сформулированные вопросы не снижают научной и практической значимости работы и не влияют на достоверность полученных результатов.

7. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Диссертационная работа Соболева Ильи Александровича на тему: «Разработка бортового комплекса мониторинга целостности конструкции авиационной и космической техники методом акустической эмиссии» является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача повышения безопасности и достоверности контроля технического состояния корпусных конструкций авиационной и ракетно-космической техники методом акустической эмиссии, имеющая существенное значение для развития методов неразрушающего контроля и технической диагностики.

Считаю, что работа по своему содержанию, объему, актуальности, научной и практической значимости полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным в п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Соболев Илья Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.7 – Акустика (Технические науки).

Официальный оппонент Кинжагулов Игорь Юрьевич

кандидат технических наук 05.11.01 – Приборы и методы измерений (по видам измерений), доцент факультета систем управления и робототехники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург.

Я, Кинжагулов Игорь Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

к.т.н., доцент Кинжагулов Игорь Юрьевич

« 11 » 09 2026

197101, Россия, г. Санкт-Петербург,
Кронверский проспект, д. 49, литера А
Тел./факс: +7 (911) 262-45-59
e-mail: kinzhiki@mail.ru

ПОДПИСЬ
УДОСТОВЕРЯЮ
МЕНЕДЖЕР ОПС
П. А. КУГАТОВА