

УДК: 534-16
OECD: 1.03 AA

Разработка практических рекомендаций по диагностике состояния целостности алюминиевых изделий авиационного и космического назначения при использовании метода акустической эмиссии

Соболев И.А

Аспирант кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем»,
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.
Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

В статье рассматривается вопрос использования метода акустической эмиссии (далее - АЭ) для разработки бортового комплекса неразрушающего контроля элементов авиационной и космической техники в режиме реального времени при эксплуатации. Актуальность работы подтверждается тем, что классические методы не способны обнаруживать все типы дефектов в технически сложных конструкциях и не позволяют реализовать контроль на всем жизненном цикле изделий. Для выполнения поставленной цели были выбраны потенциальные аппараты для внедрения, проведены исследования режимов нагрузки космических аппаратов для разработки методики проведения испытаний. Проведенные исследования подтвердили высокую эффективность АЭ для диагностики дефектов в алюминиевых конструкциях, критически важных для космических аппаратов. Система успешно фиксировала и позволила рассчитать локацию микротрещин в элементах из АМг6НОП даже при одновременном воздействии нескольких источников нагрузки. Проведенный эксперимент с плоским образцом позволил при нагружении образца из АМг6 выявить корреляцию между амплитудными всплесками и переходом в зону пластической деформации. Таким образом внедрение метода АЭ имеет большой потенциал для повышения жизненного цикла и безопасности модулей космических аппаратов.

Ключевые слова: амплитуда, контроль, космос, алюминий, дефект, лоцирование

Development of practical recommendations for diagnosing the integrity of aluminum products for aviation and space purposes using the acoustic emission method

Sobolev I.A

Postgraduate student of the E4 Department 'High-energy devices of Automatic systems',
Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

The article discusses the use of the acoustic emission (AE) method for the development of an on-board complex for non-destructive testing of elements of aviation and space technology in real time during operation. The relevance of the work is confirmed by the fact that classical methods are not able to detect all types of defects in technically complex structures and do not allow monitoring throughout the entire product lifecycle. To achieve this goal, potential spacecraft were selected for implementation, and studies of spacecraft loading

modes were conducted to develop a test methodology. The conducted studies have confirmed the high efficiency of AE for the diagnosis of defects in aluminum structures that are critically important for spacecraft. The system successfully recorded and made it possible to calculate the locations of microcracks in AMg6NOP elements even under the simultaneous influence of several load sources. The experiment with a flat sample made it possible, when loading a sample from AMg6, to identify a correlation between amplitude bursts and the transition to a zone of plastic deformation. Thus, the introduction of the AE method has great potential to improve the life cycle and safety of spacecraft modules.

Keywords: amplitude, control, space, aluminum, defect, location

Введение

Современная космонавтика предъявляет исключительно высокие требования к безопасности, надежности, долговечности конструкций. Рост использования алюминиевых сплавов, аддитивных технологий и сложных инженерных решений требует внедрения инновационных методов неразрушающего контроля (НК), способных обеспечить своевременное выявление дефектов с достаточной точностью во время эксплуатации аппаратов без нарушения целостности объектов. В этом контексте акустическая эмиссия (далее - АЭ) выделяется как перспективная технология, позволяющая проводить динамический мониторинг структур в режиме реального времени во время эксплуатации объектов, что особенно актуально для систем, таких как спутники, Российская орбитальная станция (РОС) и т.д. Современные аэрокосмические конструкции все чаще используют углепластики (CFRP) и аддитивно изготовленные компоненты, которые обладают анизотропными свойствами и сложной геометрией [1], [2]. Традиционные методы НК, такие как ультразвуковая дефектоскопия (UT) или вихретоковый контроль (ECT), сталкиваются с проблемами при анализе таких материалов из-за высокой дисперсии сигналов и необходимости многократных сканирований [1]. Например, фазированные ультразвуковые массивы (PAUT) требуют адаптивных алгоритмов для компенсации анизотропии, что увеличивает время и стоимость проверок [1]. В некоторых случаях классические методы вообще не применимы. Следует отметить, что сегодня все больше и больше компании интересуются прогнозированием остаточного ресурса конструкций (RUL) при стареющем парке космических аппаратов, а также при вводе новых. Классические методы НК сталкиваются с проблемами в решении данного вопроса. АЭ, в отличие от пассивных методов, позволяет регистрировать активные процессы деформации и роста трещин на ранних стадиях, что подтверждено исследованиями на полноразмерных fatigue-тестах истребителей F-15 [3]. Например, в ходе испытаний SH-60 вертолетов система AE-HUMS обнаружила рост трещин в зубчатых передачах за 15 минут до отказа, что демонстрирует потенциал метода для предотвращения катастроф и прогнозирования остаточного ресурса [3]. Внедрение автоматизированных систем на базе АЭ сокращает простой оборудования. Так, FAA-одобренная технология Comparative Vacuum Monitoring (CVM) для контроля антенных опор Boeing 737-800 позволила сократить время инспекции с нескольких часов до 12 минут, что напрямую влияет на операционные расходы авиакомпаний [2]. Разработка нового комплекса НК на основе АЭ имеет большой потенциал для аэрокосмического направления из-за возможности преодоления ключевых ограничений существующих систем. Во-первых, интеграция с цифровыми двойниками. Реализация Digital Twin для симуляции распространения дефектов, как в системах Siemens [1], позволит сопоставлять данные АЭ с прогнозными моделями, повышая достоверность оценки. Во-вторых, отсутствие нормативов для контроля LPBF-деталей (например,

несплавленных порошков) требует разработки новых протоколов, где АЭ может стать основным методом благодаря чувствительности к микродефектам. В-третьих, Разработка алгоритмов машинного обучения для фильтрации шумов и классификации сигналов АЭ в анизотропных средах, характерных для современных алюминиевых сплавов. В-четвертых, нахождение корреляции акустических паттернов с началом пластической деформации, позволит идентифицировать достижение предела текучести в режиме реального времени при эксплуатации объекта. В-пятых, использование параметров АЭ (количество событий, амплитуда, длительность) позволит разработать математическую модель для вычисления остаточного ресурса, минимизирующую риск неконтролируемого течения металла. Таким образом, потенциально применение метода АЭ позволит решить проблемы применения классических методов НК, перейти к контролю в режиме реального времени без снятия объекта из эксплуатации, позволит снизить риски катастрофических отказов в космических конструкциях, а также продлит жизненный цикл изделий.

1 Актуальность внедрения инновационного бортового комплекса

Современные космические аппараты сталкиваются с критическими вызовами, связанными с дефектами материалов и конструкций. Несмотря на прогресс в разработке сплавов и технологий производства, проблемы микротрещин, коррозии и усталости металлов остаются актуальными. В этом разделе анализируются ключевые проблемы, подтверждается необходимость внедрения нового комплекса НК для повышения безопасности и надежности космической техники.

Алюминиевые сплавы — основа космических аппаратов благодаря их легкости и прочности. Однако даже современные материалы, такие как Al-Zn-Mg-Cu, сталкиваются с такими проблемами как: термическая усталость, коррозионное растрескивание, сложности производства. Если говорить про термическую усталость, то при циклических нагревах и охлаждениях в космосе в сплавах формируются микротрещины, снижающие прочность на 20–40%. Коррозионное растрескивание проявляется в межкристаллитной коррозии, особенно в зонах сварных швов. Так же следует отметить, что высоколегированные сплавы требуют многоступенчатой термической обработки, где малейшие отклонения приводят к дефектам структуры.

В 2020 году спутник «Ярило» с теплообменником из алюминиевого сплава столкнулся с проблемой низкой технологичности при 3D-печати, что потребовало доработки состава материала. Этот дефект можно отнести к вышеописанным проблемам [4].

Корпуса ракет и спутников подвергаются экстремальным нагрузкам, что выявляет слабые места. Такими примерами могут быть проблемы с листовыми панелями без усиления, которые деформировались под воздействием вибраций двигателей, как в случае ракет серии «Союз». Сферические баки, несмотря на оптимальную прочность, сложно интегрировать в многоступенчатые системы. Цилиндрические аналоги на 30

мусора — это обломки, вызванные дефектами конструкций. Околоземное пространство содержит свыше 130 млн объектов космического мусора размером от 0,1 см, которые могут пробивать обшивку или повреждать элементы, а современные методы неразрушающего контроля (ультразвук, вихревые токи) имеют ограничения, которые не позволяют их эффективно применять для контроля космических аппаратов с целью нахождения вышеописанных дефектов. Сюда можно отнести низкую точность или невозможность применения в сложных конструкциях, не адаптивность к новым сплавам. Таким образом следует вывод о том, что проблемы дефектов в космических аппаратах требуют перехода к инновационным методам контроля. Разработка инновационного

комплекса НК, сочетающего искусственный интеллект, адаптивные алгоритмы и интеграцию с цифровыми платформами, станет ключом к обеспечению долговечности и безопасности будущих миссий.

2 Потенциальные аппараты для внедрения бортового комплекса и технические требования к нему

Следует отметить, что сегодня НК на основе метода АЭ можно внедрить во многие космические аппараты, такие как: РОС, космические корабли серии «Орёл», спутники дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) серии «Арктика-М» и «Ресурс-П» и т.д. В данном разделе будет рассмотрен только один пример – это перспективны внедрения в международную космическую станцию РОС. Модули данной станции по техническому заданию (ТЗ) должны обладать повышенной автономностью, радиационной защитой и возможностью длительной эксплуатации в условиях глубокого космоса. Данные требования (особенно последнее) можно достичь путем внедрения инновационных методов НК, к примеру на основе метода АЭ. В таком случае, потенциальными элементами для внедрения в станцию РОС можно считать: базовый модуль, центральный модуль, шлюзовой, универсальный. На рисунке 1 представлен один из модулей – базовый.

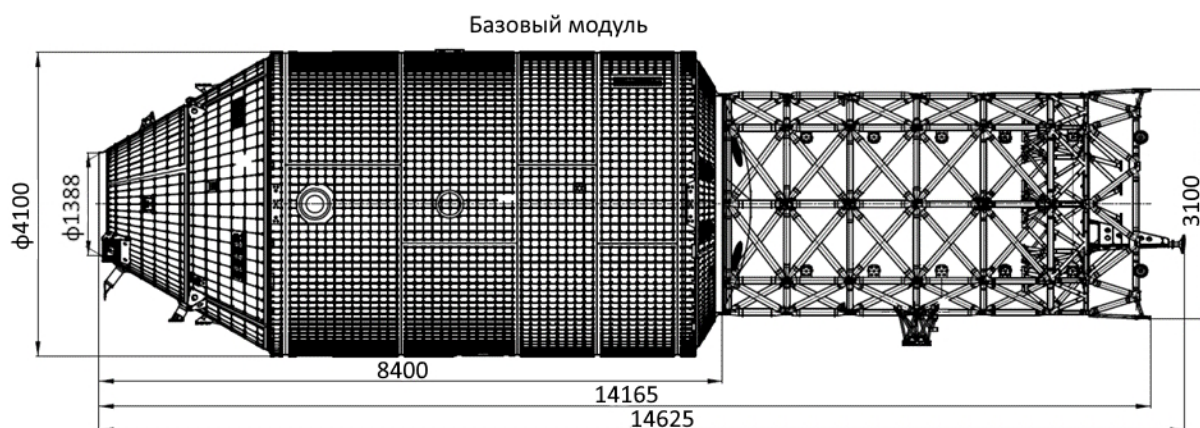


Рисунок 1 – Эскиз герметичного отсека базового модуля орбитальной станции КК РОС

Для интеграции в космический аппарат бортовой комплекс должен удовлетворять ТЗ на внедрение. Сегодня к таким требованиям можно отнести следующие (ниже представлена часть требований, предъявляемых к космической аппаратуре, в связи с ограниченность предоставляемой информации в статье):

- метрологическое обеспечение должно соответствовать ГОСТ РВ 0008-001-2019, ОСТ 92-1371-99 и ОСТ 134-1028-2012 с изм.1;

- измерения должны выполняться по стандартизованным, аттестованным в порядке, установленном приказом Минпромторга России от 15.12.2015 № 4091 «Об утверждении порядка аттестации первичных референтных методик (методов) измерений, референтных методик (методов) измерений и методик (методов) измерений и их применения», методикам измерений, разработанным по ГОСТ Р 8.563-2009;

- средства измерений, должны быть утвержденного типа и поверены в соответствии с Приказом Минпромторга России от 31.07.2020 № 2510 «Об утверждении Порядка проведения поверки средств измерений, требований к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке», остальные средства измерений подлежат поверке или калибровке;

- величины параметров и характеристик, а также результаты их измерений,

должны представляться в единицах величин в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 31.10.2009 № 879 «Об утверждении Положения о единицах величин, допускаемых к применению в Российской Федерации» и ГОСТ 8.417-2002, методы обработки результатов многократных измерений должны соответствовать ГОСТ Р 8.736-2011, однократных – ГОСТ Р 50.2.038-2004;

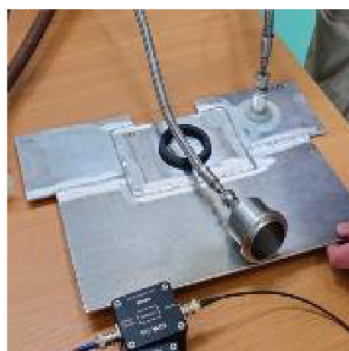
– разрабатываемая конструкторская документация должна соответствовать требованиям ОСТ 92-4285-86 и пройти согласование с метрологической службой организации в соответствии с ОСТ 92-4327-80;

– и т.д.

В заключении раздела следует отметить, что разработка инновационного бортового комплекса НК на основе АЭ для космических аппаратов и станции РОС, в частности, подтверждает свою актуальность и техническую реализуемость. Внедрение метода АЭ в модули РОС позволит решить ключевые задачи: реализация динамического мониторинга дефектов, соблюдение строгих метрологических требований, повышение автономности и долговечности космических аппаратов. Потенциал метода АЭ подтверждается его адаптивностью к сложным средам и возможностью работы в режиме реального времени, что критически важно для реализации долгосрочных космических миссий.

3 Материалы и методы исследования

Для подтверждения выдвинутой теории были проведены натурные испытания с применением метода АЭ. Во-первых, испытания на проверку возможности фиксации потерь воздуха в обшивке через одну трещину и через несколько трещин одновременно. Для этого подготовлен сварной образец размерами 278x400x3,5 из АМгбНОП с минимально возможными сквозными трещинами в количестве 3 мест (рисунок 2а). На испытательный образец (в точку с трещиной) устанавливалась оснастка (рисунок 2б), подключенная к вакуумной камере, для создания разницы давлений. Так же были установлены датчики АЭ на краях листа с помощью специализированных кронштейнов (рисунок 2в). Приборы АЭ фиксируют упругие волны возникаемые в зоне трещины и преобразуют их в электрические сигналы, которые передают через предусилители на плату прибора АЭ.



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Фотоснимки с эксперимента по проверки возможности регистрации потерь воздуха через обшивку методом АЭ: а) сварной образец размерами 278x400x3,5 из амгбноп; б) элемента оснастки вакуумной камеры; в) сварной образец с установленными датчиками АЭ и кронштейнами

В ходе испытания были получены АЭ отклики, зафиксированные прибором.

Данные обработали и по результатам построены локации мест потери воздуха. На первом этапе испытания использован один источник нагрузки, на втором три. Регистрация сигналов и локация дефекта с одной точкой нагружения отображена на рисунке 3а. После объект нагружали на три точки с трещинами. Система фиксировала и лавировала одновременно все источники сигналов, которые показаны на рисунке 3б.

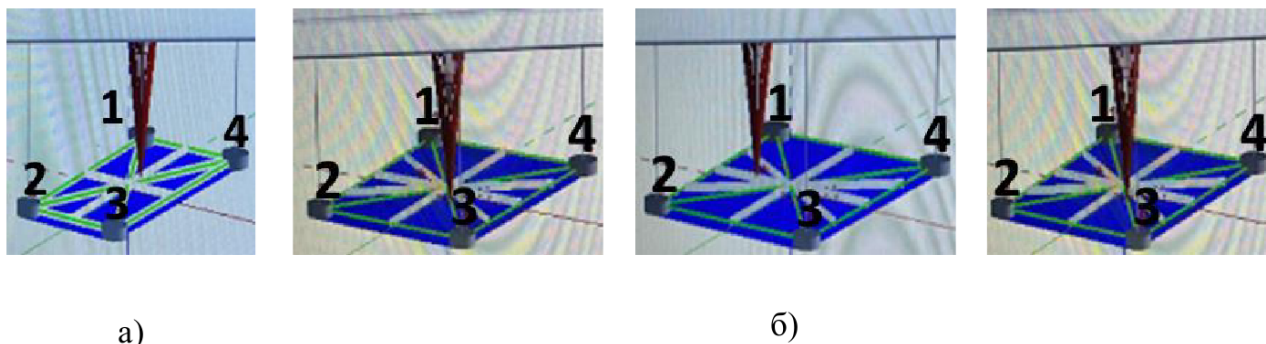


Рисунок 3 – Фотоснимки рассчитанных локаций мет потери воздуха на сварном образце: а) локация места потери воздуха при нагрузке одной трещины; б) локация мест потери воздуха при нагрузке трех трещин одновременно

Таким образом, проведенные испытания позволяют утверждать, что: метод АЭ обладает достаточной чувствительностью, чтобы регистрировать дефекты в тонкостенных элементах конструкций при моделировании условий утечки в безвоздушном пространстве во всех случаях при создании давления; дефекты лоцируются при различных схемах нагружения испытательного образца (один, три источника нагрузки).

Во-вторых, проведены силовые испытания на плоском алюминиевом образце из АМг6. Он был изготовлен согласно ГОСТ 25.506.85 [5] и ГОСТ 1497-2018 [6]. На рисунке 4а и рисунке 4б показаны фотографии образца до и после испытания. Исследование выполнено на SHIMADZU AG-X-1 с оснасткой, показанной на рисунке 4в. Перед проведением испытания образец размещался в рабочую область SHIMADZU на зажимных губках 1. На нижнюю губку 1, за счёт магнитного основания, крепился предуселитель 3. На образец 2 крепился кронштейн 4 с датчиком АЭ 5. Фиксация датчика осуществлялась за счёт магнитных элементов на ножках кронштейна и прижимающей пластины.

В ходе испытаний регистрация АЭ проводилась с использованием специализированной системы. Графики зависимости усилия, амплитуды и импульса АЭ от времени представлены на рисунках 5 и 6. На рисунке 6 представлен увеличенный участок а с рисунка 5. Статическое нагружение образца выполнялось до его полного разрушения. Процесс разрушения характеризуется тремя стадиями: упругоэластическая деформация (а), пластическая деформация (б), утонение и разрушение (с). Критическая точка (условный предел текучести) определена по данным испытательной машины SHIMADZU AG-X-1.

Первый сигнал АЭ зафиксирован через 2,7 секунды после начала деформации, что свидетельствует об инициации перестройки кристаллической решетки. На начальном этапе деформации (стадия а) наблюдаются резкие высокоамплитудные сигналы АЭ, характерные для внезапного срыва дислокаций с препятствий («всплески»). Появление заметной АЭ при напряжениях ниже макроскопического предела текучести обусловлено пластическим течением в благоприятно ориентированных зернах в области микродеформаций, что связано с хаотичным распределением ориентаций зерен.

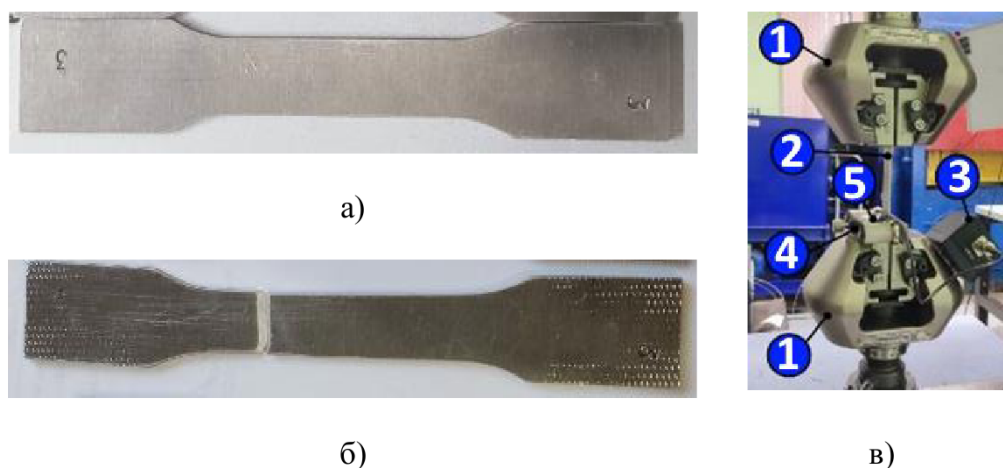


Рисунок 4 – Фотоснимки образца (до и после проведения испытания) и оснастки с испытания на растяжения алюминиевого образца из АМгб: а) образец до проведения испытания; б) образец после проведения испытания; в) оснастка с установленным образцом и датчиками

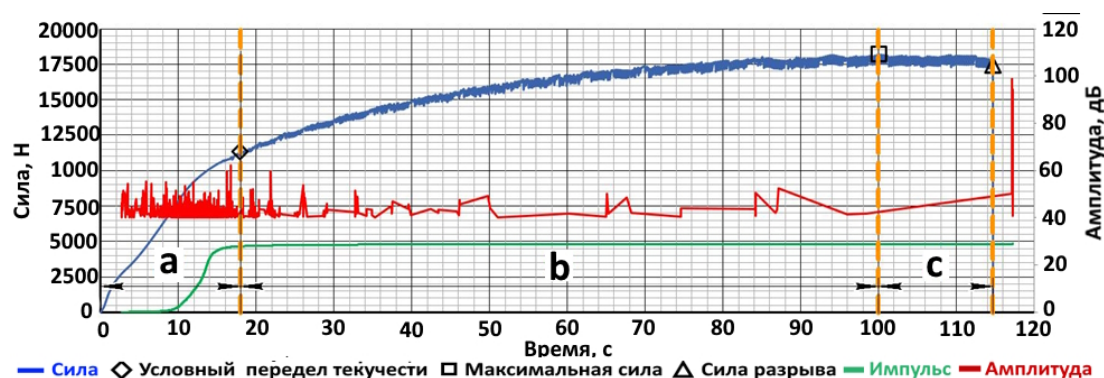


Рисунок 5 – Графики зависимости усилия, амплитуды, импульса от времени для алюминиевого цельного образца из АМГб при растяжении на испытательной машине SHIMADZU AG-X-1: а) участок упруго-пластической деформации; б) участок пластической деформации с образованием очага деформации; в) этап разрушения и падения нагрузки

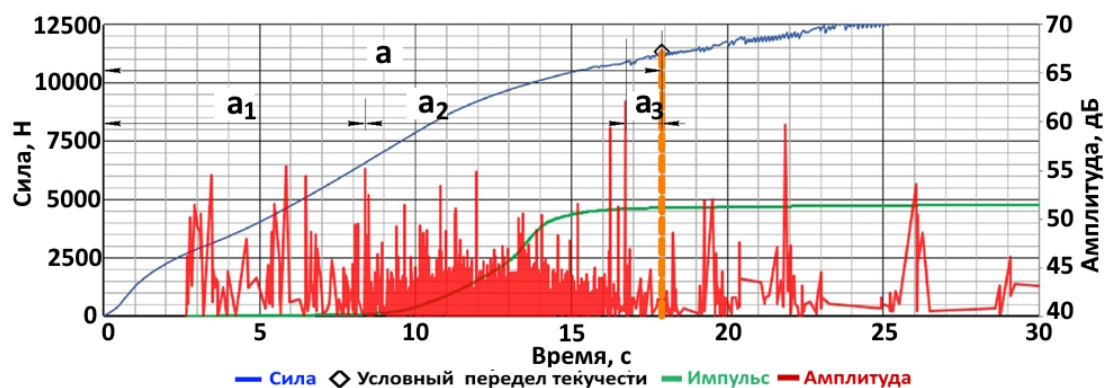


Рисунок 6 – Увеличенный участок упругопластической деформации графика зависимости усилия, амплитуды, импульса от времени для алюминиевого цельного образца из АМГб при растяжении на испытательной машине SHIMADZU AG-X-1

Данный эффект, наблюдаемый на участках а1 и а2, характерен для многих металлов, включая исследуемый алюминиевый сплав [7]. Интенсивность сигналов АЭ до момента 8,4 (участок а1) составляла ~ 17 сигналов/с при средней амплитуде 43,7 дБ. После 8,4 с зафиксирован резкий рост интенсивности до ~ 540 сигналов/с (рост на $\sim 3076\%$) при снижении средней амплитуды до 41,5 дБ (падение на 5%). Этот участок отражает активное взаимодействие дислокаций. Микроструктура активно перестраивается, что в свою очередь приводит к появлению множества АЭ откликов [8] – [10]. Амплитудный параметр не превышает 55 дБ, что указывает о благоприятных процессах внутри металла без инициализации разрушения. Это подтверждается силовым графиком (предел текучести не достигнут) и импульсным параметром. Растёт плавно, без скачков, падение числа импульсов не наблюдается. Это характеризует стабильный процесс. В конце участка а2 наблюдаются два скачка амплитуды: до 59,5 дБ (16,3 с) и 62,1 дБ (16,7 с) относительно среднего значения в 41,5 дБ. Указанные пики АЭ связаны с активным движением дислокаций, формированием их потоков и накоплением на границах раздела. Это создает зоны локальных напряжений, требующих повышенных напряжений для преодоления, что приводит к резкой перестройке дислокационной структуры, генерации новых дислокаций и макропластическим деформациям вблизи границ, сопровождающимся высокоэнергетическими событиями АЭ. Данное явление подтверждается ссылкой [11]. Интенсивность импульсов резко падает, это говорит о стабилизации микроструктуры. В дальнейшем резкого изменения числа импульсов не наблюдается. После всплеска сигналов на участке а2 наблюдается переход к прерывистой деформации (эффект Портевена–Ле Шателье, ПЛШ) в сплаве АМг6; всплески амплитуды и энергии сигналов АЭ соответствуют началу этого процесса. Эффект ПЛШ характерен для твердых растворов, включая алюминиевые сплавы, в определенных диапазонах температур и скоростей деформирования. Как видно из графика активность АЭ снижается. При достижении макроскопического предела текучести возникает максимум на кривой активности АЭ (начало участка а3), соответствующий процессу коллективного движения дислокаций. Анализ данных трех участков демонстрирует существенное различие сигналов АЭ на разных стадиях нагружения, что согласуется с исследованиями [11, 12]. Стадия b - пластическая деформация. Характеризуется отклонением диаграммы усилия от линейной зависимости, непрерывным ростом усилия с уменьшающейся интенсивностью. Деформация равномерна по объему рабочей части образца при сохранении прямоугольного поперечного сечения; напряженно-деформированное состояние соответствует однородному монотонному растяжению. Интенсивность сигналов АЭ на стадии b стабильна: зарегистрировано 164 сигнала за 82 с (~ 2 сигнала/с), что в 8,5 раз меньше, чем на участке а1 и в 250 раз меньше участка а2. Это говорит о стабильности распределения напряжений по микроструктуре, глобальных изменений в материале не происходит до момента приближения к разрыву образца. Стадия c (утонение и разрушение) начинается с образования концентратора напряжений и локализации деформации, приводящей к значительному сокращению объема деформируемого материала. Схема напряженного состояния в зоне локализации соответствует стадии b, но становится объемной. Утонение образца в зоне минимального сечения (максимальное усилие 18 180 Н, обозначено квадратом на диаграмме) приводит к разрушению. В процессе разрушения наблюдается рост отношения параметров амплитуды к импульсу. Зафиксированы три пика сигналов АЭ в моменты 110 с, 112 с и 115 с; максимальный пик отмечен через 2,3 с после разрушения. Это указывает на возможность регистрации прибором начала разрушения сплава или его завершения с минимальной временной задержкой ($\sim 2,3$ с) по параметрам амплитуды, импульса от времени. Так же по параметру интенсивности сигналов АЭ можно определять

начало процесса перестроения решетки и теоретическую точку окончания перестроения (достижение «реального» предела текучести).

Полученные результаты согласуются с результатами В.В. Носова [13,14], который описывал предпосылки долгосрочного прогноза ресурса изделия на основе анализа возможностей информационно-кинетического подхода к диагностированию остаточного ресурса металлов. Автор указывал, что разрушение металлов состоит из стадий мелкодисперсной (по объему) деформации и укрупненной локализации разрыва сплошности. Это соответствует стадии а и стадиям б, с соответственно. Также В.В. Носов указал, что по снижению степени неоднородности разрушения характеризуется снижением амплитуды сигналов и невоспроизводимой активности сигналов АЭ при повторном нагружении, что подтверждается участками а, б. На первом этапе, в связи с активным перестроением микроструктуры наблюдается высокая активность АЭ с низкой величиной амплитуды (по среднему), а на участке б зафиксировано снижение сигналов в 250 раз. При этом участок б согласно результатам, описанным выше, характеризуется латентностью АЭ при дальнейшем нагружении. Автор статьи [13] описывал, что в подобных случаях этот результат свидетельствует об отдаленности момента накопления критической концентрации микротрещин вблизи концентратора и об отсутствии в материале опасных дефектов. Это подтверждается графиком данных. Следует отметить, что при переходе на участок с ресурс образца (по запасу прочности) заканчивается. Это предупреждается двумя пиками АЭ. Третий пик с максимальной величиной зафиксирован в конце (после разрыва). Два пика сигналов в соответствии с результатами работы В.В. Носова, подтверждают выполнение эффекта Кайзера. А это говорит о приближении момента накопления критической концентрации микротрещин вблизи концентратора и об опасном дефекте в структуре.

Заключение

На основе всего вышеописанного для цельного образца №3 из алюминиевого сплава АМгб можно сделать следующие выводы. Во-первых, участок упругопластической деформации можно разделить на три стадии. В данном исследовании им было присвоено название а1, а2, а3. При этом участок а1 можно характеризовать низкой интенсивностью АЭ (17 сигн./сек), средней амплитудой в 43.7 дБ. Это соответствует началу движения дислокаций и обратимой упругой деформации. Во-вторых, на участке а2 происходит резкий рост интенсивности АЭ до 540 сигн./сек (рост на 3093%), падение средней амплитуды до 41.5 дБ. Доминируют низкоамплитудные сигналы (дислокации), редкие высокоамплитудные импульсы. Этот процесс может соответствовать: активному взаимодействию дислокаций и их скопление на границах зёрен; генерации множества низкоамплитудных сигналов из-за частых срывов дислокаций. Пики амплитуды (59.5–62.1 дБ) в конце участка указывают на зарождение микропустот. Пик Ra-value (13.4 сек) подтверждает резкие перестройки дислокационной структуры. В-третьих, участок а3 характеризовался спадом интенсивности до 41 сигн./сек, ростом амплитуды до 44 дБ. На этой стадии происходит завершение перестройки микроструктуры: дислокации стабилизируются, упрочнение завершено. В-четвертых, участок пластической деформации б показал низкую активность АЭ (2 сигн./сек) несмотря на эффект Портвена-Ле Шателье (колебания усилия). Причиной такого может быть равномерная деформация, дислокационные процессы стабилизированы, новые дефекты не образуются. В-пятых, участок утонения и разрушения, показал Линейный рост амплитуды АЭ, пик при разрушении (резкий всплеск амплитуды и Ra-value). Высокий Ra-value указывает на хрупкое разрушение (резкий фронт сигнала) с быстрым распространением трещины. На основе данных выводов можно сформировать рекомендации по работе с акустической

эмиссией:

Используя метод k-средних для разделения событий на группы, можно образовать два кластера. Кластер 1. Низкая амплитуда (40–50 дБ), высокая интенсивность показывает на наличие дислокаций в микроструктуре. Кластер 2. Высокая амплитуда (>60 дБ), низкая интенсивность — трещины.

При мониторинге процесса нагружения образца по параметру Ra-value значения больше 5 (усл. ед.) сигнализируют о переходе к хрупкому разрушению.

Таким образом, метод АЭ демонстрирует уникальный потенциал для предиктивного обслуживания российских космических аппаратов, сочетая высокую точность локализации дефектов с возможностью прогнозирования критических состояний материалов, что было так же подтверждено при исследованиях в [7] – [10]. Все полученные данные согласуются с современными исследованиями дислокационной динамики в алюминиевых сплавах. Полученные результаты по утончению и разрушению (стадия с) коррелируют с исследованиями радиационной стойкости материалов для дальнего космоса. К примеру, работа NASA по моделированию радиационного воздействия (точность до 4%) подтверждает важность полученных в статье данных о пиках амплитуды при разрушении для проектирования защитных систем. Помимо этого, китайские эксперименты с высокопрочными сталями и вольфрамовыми сплавами на «Тяньгун» акцентируют роль АЭ в оценке ресурса материалов для лунных баз и марсианских миссий. Таким образом можно сделать вывод, что внедрение АЭ системы в модули РОС повысит безопасность и автономность станции, минимизируя риски аварий в условиях глубокого космоса.

Список использованных источников

1. Каблов Е.Н. [и др.] Современные достижения в области создания перспективных легких сплавов и покрытий для авиационной и космической техники // ВИАМ, 2021. - 323 с.
2. A4A/SAE Nondestructive Testing Innovation Award Honors Team for First Regulatory Approved Application of Structural Health Monitoring // Airlines for America : [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.airlines.org/news/a4a-sae-nondestructive-testing-innovation-award-honors-team-for-first-regulatory-approved-application-of-structural-health-monitoring/> (дата обращения 16.05.2025).
3. Finlayson R.D., Friesel M., Carlos M. Health Monitoring of Aerospace Structures with Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonics // The Largest Portal of Nondestructive Testing : [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn755/idn755.htm> (дата обращения 17.05.2025).
4. Алюминий в космосе! // Национальный авиационный портал «Kr-media» : [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.kr-media.ru/news/samoletostroenie/alyuminiy-v-kosmose/> (дата обращения 17.05.2025).
5. ГОСТ 25.506-85 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении : межгосударственный стандарт. - Введ. 1986-01-01. - М. : Изд-во стандартов, 1985. - 55 с.
6. ГОСТ 1497-2023 Методы испытаний на растяжение. Статические методы определения механических свойств при комнатной температуре : межгосударственный стандарт. - Введ. 2019-07-01. - М. : Стандартиформ, 2018. - 34 с.
7. Артеменко Д.Е., Богомоллов Р.С., Ремшев Е.Ю., Соболев И.А. Исследование моделирования дефектов в образцах при испытаниях на одноосное растяжение //

Третья студенческая научная конференция факультета «Оружие и системы вооружения» (Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ») : материалы всерос. конф. с междунар. Участием (Санкт-Петербург, 23–24 апр. 2024). - СПб. : Балт. гос. техн. ун-т «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2024. - С. 10-16.

8. Бильдина К.А., Соболев И.А., Олехвер А.И. Разработка авиационных и космических бортовых систем неразрушающего контроля на основе метода акустической эмиссии // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики : сб. аннот. конкурс. работ XVI Всерос. межотраслевого молод. конкурса науч.-техн. работ и проектов (Москва, 18–22 нояб. 2024). - М. : Перо, 2024. - С. 103-104.

9. Соболев И.А., Олехвер А.И., Бильдина К.А. Разработка авиационных и космических бортовых систем неразрушающего контроля на основе метода акустической эмиссии // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики : сб. аннот. конкурс. работ XVI Всерос. межотраслевого молод. конкурса науч.-техн. работ и проектов (Москва, 18–22 нояб. 2024). - М. : Перо, 2024. – 39 с.

10. Соболев И.А., Рожков М.С., Азанов Д.А., Шматко А.Д. Инновационный метод акустической эмиссии в обеспечении качества изделий машиностроения // Машиностроение: инновационные аспекты развития : материалы междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 29 марта 2024). - СПб.: ИП Жукова Е.В., 2024. - С. 85-89.

11. Agletdinov, E. Acoustic emission response during deformation of magnesium single crystals / E. Agletdinov, V. Skvortsova, K. Klyukin // Materials Science and Engineering: A. – 2020. – Vol. 789. – P. 139–150. – URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509320312345> (дата обращения: 10.02.2024).

12. Сысоев, О. Е. Прогнозирование и мониторинг предельных состояний конструкционных материалов при различных траекториях циклического нагружения по параметрам акустической эмиссии : специальность 01.02.04 "Механика деформируемого твердого тела" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Сысоев Олег Евгеньевич. – Комсомольск-на-Амуре, 2013. – 42 с. – EDN ZPBICD.

13. Носов, В. В. Информационно-кинетический подход к оценке прочностного состояния сосудов, работающих под давлением в водородсодержащих средах / В. В. Носов, А. Р. Ямилова // Контроль. Диагностика. – 2021. – Т. 24, № 6(276). – С. 30-45. – DOI 10.14489/td.2021.06.pp.030-045. – EDN EROOLS.

14. Носов В. В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 52 – 67.

References

1. Kablov E.N. [et al.] Modern Achievements in the Development of Advanced Light Alloys and Coatings for Aerospace Technology // VIAM, 2021. - 323 p.

2. A4A/SAE Nondestructive Testing Innovation Award Honors Team for First Regulatory Approved Application of Structural Health Monitoring // Airlines for America : [Electronic resource]. - URL: <https://www.airlines.org/news/a4a-sae-nondestructive-testing-innovation-award-honors-team-for-first-regulatory-approved-application-of-structural-health-monitoring/> (accessed 16.05.2025).

3. Finlayson R.D., Friesel M., Carlos M. Health Monitoring of Aerospace Structures with Acoustic Emission and Acousto-Ultrasonics // The Largest Portal of Nondestructive Testing : [Electronic resource]. - URL: <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn755/idn755.htm> (accessed 17.05.2025).

4. Aluminum in Space! // National Aviation Portal 'Kr-media' : [Electronic resource]. - URL: <https://www.kr-media.ru/news/samoletostroenie/alyuminiy-v-kosmose/> (accessed 17.05.2025).
5. GOST 25.506-85 Strength Analysis and Testing. Methods for Mechanical Testing of Metals. Determination of Crack Resistance Characteristics (Fracture Toughness) under Static Loading : Interstate Standard. - Enforced 1986-01-01. - Moscow : Standards Publishing House, 1985. - 55 p.
6. GOST 1497-2023 Tensile Testing Methods. Static Methods for Determining Mechanical Properties at Room Temperature : Interstate Standard. - Enforced 2019-07-01. - Moscow : Standartinform, 2018. - 34 p.
7. Artemenko D.E., Bogomolov R.S., Remshev E.Yu., Sobolev I.A. Study of Defect Modeling in Specimens during Uniaxial Tensile Testing // Third Student Scientific Conference of the Faculty 'Weapons and Weapon Systems' (Library of the Journal 'Voenmeh. Vestnik BSTU') : Materials of the All-Russian Conf. with Int. Participation (Saint Petersburg, April 23-24, 2024). - St. Petersburg : Baltic State Technical University 'VOENMEKH' named after D.F. Ustinov, 2024. - P. 10-16.
8. Bildina K.A., Sobolev I.A., Olekhver A.I. Development of Aerospace Onboard Non-Destructive Testing Systems Based on the Acoustic Emission Method // Youth and the Future of Aviation and Cosmonautics : Collection of Abstracts of Competitive Works of the XVI All-Russian Interdisciplinary Youth Competition of Scientific and Technical Works and Projects (Moscow, November 18-22, 2024) . - M. : Pero Publishing House, 2024. - P. 103-104.
9. Sobolev I.A., Olekhver A.I., Bildina K.A. Development of Aerospace Onboard Non-Destructive Testing Systems Based on the Acoustic Emission Method // Youth and the Future of Aviation and Cosmonautics : Collection of Abstracts of Competitive Works of the XVI All-Russian Interdisciplinary Youth Competition of Scientific and Technical Works and Projects (Moscow, November 18-22, 2024). - M. : Pero Publishing House, 2024. - 39 p.
10. Sobolev I.A., Rozhkov M.S., Azanov D.A., Shmatko A.D. Innovative Acoustic Emission Method for Ensuring the Quality of Mechanical Engineering Products // Mechanical Engineering: Innovative Aspects of Development : Materials of the Int. Sci.-Pract. Conf. (Saint Petersburg, March 29, 2024). - St. Petersburg : IP Zhukova Elena Valeryevna, 2024. - P. 85-89.
11. Agletdinov, E. Acoustic emission response during deformation of magnesium single crystals / E. Agletdinov, V. Skvortsova, K. Klyukin // Materials Science and Engineering: A. - 2020. - Vol. 789. - P. 139-150. - URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509320312345> (дата обращения: 10.02.2024).
12. Sysoev, O. E. Prediction and Monitoring of Limit States of Structural Materials under Various Cyclic Loading Trajectories Using Acoustic Emission Parameters : Speciality 01.02.04 "Mechanics of a Deformable Solid Body" : Abstract of a Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences / Sysoev Oleg Evgenievich. - Komsomolsk-on-Amur, 2013. - 42 p. - EDN ZPBICD.
13. Nosov V. V., Yamilova A. R. An information-kinetic approach to assessing the strength state of pressure vessels operating in hydrogen-containing media. Diagnostics. - 2021. - Vol. 24, No. 6(276). - pp. 30-45. - DOI 10.14489/td.2021.06.pp.030-045. - EDN EROOLS.
14. Nosov V. V. Principles of optimization of acoustic emission strength control technologies for industrial facilities // Flaw detection. 2016. No. 7. pp. 52-67.