

На правах рукописи



Васильев Игорь Евгеньевич

**КОМПЛЕКСНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО,
ПОВРЕЖДЁННОГО И ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ
МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении
науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
Российской академии наук
(ИМАШ РАН)

Научный консультант: **Матвиенко Юрий Григорьевич**,
доктор технических наук, профессор, заведующий
отделом «Прочность, безопасность и живучесть
машин» ФГБУН ИМАШ РАН.

Официальные
оппоненты:

Вильдеман Валерий Эрвинович,
доктор физико-математических наук, профессор,
директор центра экспериментальной механики
Пермского национального исследовательского
политехнического университета.

Завойчинская Элеонора Борисовна,
доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник кафедры теории
упругости механико-математического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова.

Ботвина Людмила Рафаиловна,
доктор технических наук, профессор, главный
научный сотрудник ФГБУН ИМЕТ РАН.

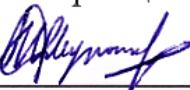
Ведущая организация: АО «Центральный Научно-исследовательский
институт специального машиностроения»,
г. Хотьково.

Защита диссертации состоится 29 мая 2024 года в 15 часов 00 минут на
заседании диссертационного совета 24.2.331.12 при Московском
государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр. 1. С диссертацией можно
ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.
Телефон для справок: +7(499)263-66-39.

Автореферат разослан _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.331.12,

д.т.н., доцент



Мурашов Михаил Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В диссертации рассмотрена методология комплексного (раздельного и совместного) применения методов хрупких тензочувствительных покрытий (ХТП) и акустической эмиссии (АЭ), используемых для диагностики полей и концентраторов напряжений, выявления развивающихся дефектов, мониторинга кинетики повреждений в структуре конструкционного материала на разных масштабных уровнях и фактического состояния несущей способности изделий в режиме нагружения.

Производство конструкционных материалов, изготовление деталей, проведение монтажных и испытательных работ сопряжено с возникновением в изделиях технологических, конструктивных дефектов и остаточных напряжений. В процессе эксплуатации элементы конструкций подвергаются воздействию силовых, температурных и гидродинамических нагрузок, которые в сумме с остаточными напряжениями уже на ранних стадиях нагружения в зонах повышенной концентрации напряжений могут вызвать необратимые деформации, повреждения и разрушения, снижая несущую способность и проектный ресурс.

Теория поврежденности и эволюции разрушения твердого тела сформировалась на основании фундаментальных трудов академиков А.А. Ильюшина, С.Н. Журкова, Г.П. Черепанова, Ю.Н. Работнова, В.В. Болотина, С.В. Серенсена, В.Е. Панина, чл.-корр. Н.А. Махутова, профессоров Л.М. Качанова, Е.М. Морозова, Ю.Г. Матвиенко.

Базирующиеся на основании этой теории современные концепции решения поставленных задач, использующие численные методы моделирования и нейронные сети, позволяют прогнозировать течение процесса разрушения конструкционного материала в критически нагруженных сечениях. Исходя из результатов такой оценки, определяют запасы прочности от действия эксплуатационных нагрузок. Однако, при длительных статических и циклических нагрузках в зонах концентраторов развиваются нелинейные процессы накопления повреждений, сопровождаемые деградацией свойств материала, что существенно усложняет задачу определения оптимальных значений запасов прочности. На снижение несущей способности конструкционного материала оказывают влияние такие сложно учитываемые факторы, как рассеянные структурные дефекты, ударные воздействия, вибрация, остаточные напряжения, особенности режимов нагружения и условий эксплуатации.

Поэтому возникла актуальная необходимость в создании концепции, отражающей, как общий, так и локальный уровень поврежденности конструкционного материала, разработки эффективной методики контроля фактического состояния несущей способности изделия в процессе эксплуатации. Разработку такой концепции осуществляли, как академические институты: ФГБУН ИМАШ РАН, ФГБУН ИПМех РАН, ФГБУН ИМЕТ РАН, ФГБУН ОИВТ РАН, так и ведущие отраслевые НИИ, в том числе НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, АО «ВНИИАЭС», ООО «Газпром ВНИИГАЗ», ВНИИМЕТМАШ, ВНИИСТ, ЗАО

«НИИИН МНПО «Спектр», АО «НИКИЭТ», ФАУ «ЦАГИ», АО «ЦНИИСМ», АО «НПО ЦНИИтмаш», АО «ЦНИИмаш», АО «ЦНИИСК», а также учебные университеты: МГТУ им. Н.Э. Баумана, НИЯУ «МИФИ», НИУ «МЭИ» и другие.

В качестве способа реализации определения степени поврежденности конструкционного материала и оценки фактического состояния его несущей способности применяют, как классические методы экспериментальной механики (ЭМ), неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД), включающие тензометрию, идентирование, ультразвуковой, токовихревой и рентгеновский контроль, «update» которых осуществляют с учетом развития современных компьютерных технологий, так и новые «smart» технологии, использующие системы корреляции цифровых изображений, волоконно-оптического мониторинга, тепловидения, акустико-эмиссионной диагностики.

При выборе методов диагностики для решения поставленных задач автор диссертации учитывал их потенциальные возможности проводить исследования в условиях стендовых и натурных испытаний, анализировать поля и концентраторы напряжений, в том числе общие, локальные и точечные, выявлять поверхностные, подповерхностные и структурные дефекты на микро-, мезо- и макромасштабном уровне. Во внимание принималось то обстоятельство, что, если в отдельности используемые методы в силу физической природы, назначения, имеющихся ограничений по условиям проведения испытаний, не в полной мере решают поставленные задачи, то совместное их применение за счет синергетического эффекта умножения информации позволит получить требуемый результат.

Как показал практический опыт, эффективным способом решения поставленных задач может быть комплексное применение методов хрупких покрытий и акустической эмиссии. На стадиях упругого и упругопластического деформирования материала ХТП даёт наиболее полную информацию о полях и концентраторах напряжений на поверхности конструкций, тогда как на стадиях необратимых и предельных деформаций в процессе структурной перестройки материала особую информативность приобретает метод АЭ, который выявляет развивающиеся дефекты и повреждения, контролирует кинетику их накопления на разных масштабных уровнях. Комплексное применение методов ХТП и АЭ позволяет проводить диагностику и мониторинг деформированных, повреждённых и предельных состояний высоконагруженных элементов конструкций в процессе испытаний или эксплуатации на всех стадиях их жизненного цикла.

Поэтому диссертационная работа «Комплексное определение деформированного, поврежденного и предельного состояния при механическом воздействии» соответствует критерию актуальности.

Объектом исследования являются процессы деформирования, повреждения и разрушения конструкционного материала на разных масштабно-структурных уровнях.

Предметом исследования являются методы и средства, используемые для мониторинга состояния конструкционного материала на стадиях упругих, неупругих и предельных деформаций.

Целью исследования является разработка методологии комплексного применения методов ХТП и АЭ для диагностики полей и концентраторов напряжений на стадии упругого деформирования, мониторинга кинетики микро-, мезо-, макроповреждений в структуре материала конструкций и определения фактического состояния их несущей способности на стадиях неупругих и предельных деформаций.

Исходя из анализа проблем диагностики конструкционных материалов, которые могут быть решены при раздельном и совместном использовании методов ХТП и АЭ, определены основные **задачи исследования**:

1) научно-техническое обоснование раздельного и совместного применения методов ХТП и АЭ для диагностики упругих, неупругих и предельных состояний;

2) разработка критериев и технологий получения высокочувствительных ХТП со стабильными характеристиками, методологии их применения совместно с методом АЭ для диагностики полей и концентраторов напряжений в режиме нагружения, в том числе в труднодоступных для наблюдения зонах конструкций;

3) разработка концепции и модели эволюции разрушения твердого тела для мониторинга степени поврежденности конструкционного материала на разных масштабных уровнях и оценки состояния его несущей способности;

4) разработка методики мониторинга кинетики микро-, мезо-, макроповреждений в структуре конструкционного материала и фактического состояния его несущей способности с применением АЭ диагностики;

5) разработка концепции кластерной селекции импульсов АЭ, позволяющей в режиме реального времени отфильтровывать сопутствующие помехи от сигналов, вызванных разрушением структуры материала или образованием трещин в ХТП;

6) разработка научно-методических рекомендаций комплексного применения методов ХТП и АЭ для диагностики упругих, неупругих и предельных состояний конструкционного материала в условиях стендовых испытаний и технической эксплуатации изделий.

Основные исследования в рамках поставленных задач были получены автором в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова в период 2000 - 2022 г. при взаимодействии с Фондом перспективных исследований (ФПИ), ФАУ «ЦАГИ», ПАО «Яковлев», ПАО «Компания «Сухой», АО «Корпорация МИТ», АО «КБХА», АО «ЦНИИмаш», «НИИ Интроскопии МНПО «Спектр», ООО «Диаскан», ООО «Интерюнис-ИТ», ООО НИЦ «ИРТ», РНФ и РФФИ.

Соответствие темы исследования паспорту научной специальности.

Исследование направлено на диагностику упругого, неупругого и предельного состояния изделий из композитных и других конструкционных материалов, мониторинг кинетики микро-, мезо-, макроповреждений и контроль фактического уровня несущей способности, что соответствует паспорту научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, а именно пунктам:

1. Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых.

4. Механика композиционных материалов и конструкций, механика интеллектуальных материалов.

10. Прочность при сложных режимах нагружения. Теория накопления повреждений. Механика разрушения твёрдых тел.

13. Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях.

Научная новизна работы:

1. Разработана теоретически обоснованная и экспериментально подтвержденная структурно-феноменологическая концепция эволюции разрушения твердого тела, связывающая несущую способность конструкционного материала с кинетикой перераспределения весового содержания микро-, мезо- и макроповреждений.

2. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено соответствие между размером поверхности разрушения структурных связей композитного материала на микро-, мезо-, макромасштабном уровне и энергией регистрируемых при этом АЭ импульсов, образующих в поле параметров относительной энергии и амплитуды, кластеры нижнего (*H*), среднего (*C*) и верхнего (*B*) уровня.

3. Разработана теоретически обоснованная и экспериментально подтвержденная комбинационно-параметрическая концепция кластерной селекции импульсов, в основу которой положена гипотеза подобия форм сигналов у близких по своей природе источников АЭ, реализуемая с применением комплексных параметров, характеризующих крутизну падения амплитуды на фазе затухания и усредненную частоту осцилляций.

4. С использованием потоковых параметров парциальной активности и весового содержания локационных импульсов в *H*, *C*, *B* кластерах, характеризующих кинетику накопления микро-, мезо и макроповреждений в зонах локации источников АЭ, установлены теоретически обоснованные и опытно подтвержденные алгоритмы вычисления фактического состояния несущей способности композитного материала, основанные на сопоставлении текущих и пороговых значений потоковых параметров.

5. Выполнена адаптация, разработанной для изделий из композитных материалов, методологии мониторинга кинетики повреждений и оценки несущей способности в режиме их нагружения, применительно к конструкциям из конструкционных сталей и сплавов.

6. Установлено, что на поверхности изделий составы хрупких покрытий образуют высокочувствительные ХТП со стабильными характеристиками, если коэффициенты Пуассона и коэффициенты температурного расширения покрытия и материала детали близки, и их расхождение соответственно не превышает $|\mu_{\text{п}} - \mu_{\text{д}}| \leq 0,1$ и $|\alpha_{\text{п}} - \alpha_{\text{д}}| \leq 5 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^{\circ}\text{C}$ от температуры формирования тензопокрытия до температуры проведения эксперимента и обработки результатов исследования.

7. Получены новые высокочувствительные тензопокрытия с расширенным диапазоном измеряемых деформаций от 200 до 20000 мкм/м за счет изменения состава и технологических режимов на этапах их формирования, разработана методика анализа распределения главных напряжений на поверхности изделий в

зонах трещинообразования ХТП с применением расширенного спектра характеристик тензочувствительности.

8. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность методологии координатной локации зон трещинообразования в ХТП с применением АЭ диагностики, а также выявления концентраторов напряжений в этих зонах в режиме нагружения изделий.

Теоретическая значимость работы:

1. Разработаны теоретически обоснованные алгоритмы, связывающие деформированное, поврежденное и предельное состояние конструкционного материала с использованием экспериментальных данных, получаемых с применением методов ХТП и АЭ на стадиях упругих, неупругих и предельных деформаций в диапазоне от 200 мкм/м до разрушения.

2. Разработана структурно-феноменологическая модель эволюции разрушения твердого тела на разных масштабных уровнях, связывающая состояние поврежденности конструкционного материала с кинетикой перераспределения весового содержания микро-, мезо- и макроповреждений в его структуре.

3. Разработана комбинационно-параметрическая концепция кластерной селекции импульсов, основанная на гипотезе подобия форм сигналов у близких по своей природе источников АЭ, позволяющая в поле комбинированных параметров: крутизны падения амплитуды на фазе затухания и усредненной частоты осцилляций, отражающих их форму, разделять регистрируемые импульсы на характерные кластеры, генерируемые электромагнитными наводками, механическими помехами, разрушением структуры материала и реверберацией.

4. Установлена зона влияния трещины на напряжение σ_{In} в хрупком тензопокрытии, составляющая примерно семь толщин покрытия, и расчетно-экспериментальная зависимость изменения его уровня при удалении от трещины.

Практическая значимость работы.

Разработанная методология, предназначенная для проведения технической диагностики и мониторинга деформированных, поврежденных и предельных состояний высоконагруженных элементов конструкций в условиях их испытаний и эксплуатации, была использована в ходе выполнения договорных и научно-исследовательских работ с предприятиями промышленности, в том числе авиационными, ракетно-космическими, нефтегазового комплекса, а также в рамках соглашений с ФПИ, грантов РНФ и РФФИ, а также внедрена в производственный цикл следующих организаций: ФАУ «ЦАГИ», АО «НИИИ МНПО «СПЕКТР», ООО «Интерюнис-ИТ».

Методология и методы исследования.

В ходе проводимых экспериментов использовалась методология системного анализа, согласно которой применяемые методы ЭМ, НК и ТД при исследовании изделий рассматривались, как элементы единой диагностической системы определения полей и концентраторов напряжений, выявления развивающихся дефектов, мониторинга накопления повреждений и оценки текущего уровня несущей способности критически нагруженных элементов конструкций. Применяемые методы включали ХТП, АЭ диагностику, вибродиагностику,

тензометрию, оптоволоконные сенсоры, видеосъёмку, в том числе с использованием высокоскоростных камер и цифровых микроскопов, ультразвуковой контроль, вихретоковый контроль, электростатические заряженные частицы и проникающие красители, лазерные счетчики аэрозолей, фрактографические исследования. Обработку и анализ экспериментальных данных осуществляли с применением методов математической статистики, кластерного анализа, преобразований Фурье, анализа временных рядов, нейронных сетей, компьютерной ортотрансформации изображений. Для расчета НДС и волновых процессов в исследуемых конструкциях использовались программы численного моделирования ANSYS и Comsol Multiphysics. Разработка концепций и расчетных моделей осуществлялась на основании теории упругости, пластичности, механики разрушения, динамики упругих сред, экспериментальной механики, технической диагностики, распознавания изображений и нейронных сетей.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Структурно-феноменологическая концепция и модель эволюции разрушения твердого тела, связывающая состояние поврежденности и несущую способность конструкционного материала с кинетикой перераспределения весового содержания микро-, мезо- и макроповреждений в его структуре.

2. Методика акустико-эмиссионной диагностики эволюции разрушения материала конструкций, использующая потоковые параметры парциальной активности и весового содержания локационных импульсов в кластерах нижнего, среднего и верхнего энергетического уровня, отражающих кинетику микро-, мезо- и макроповреждений в зонах накопления источников акустической эмиссии, по текущим значениям которых определяют фактический уровень несущей способности материала, сопоставляя их с пороговыми, регистрируемыми при его разрушении.

3. Критерии и технологии получения высокочувствительных тензопокрытий со стабильными характеристиками, расширенным диапазоном измеряемых деформаций, температур и рабочих сред, а также методология их применения совместно с акустико-эмиссионной диагностикой для выявления поверхностных, подповерхностных и структурных концентраторов напряжений в режиме нагружения изделий на стадии упругого деформирования материала в труднодоступных для наблюдения зонах конструкций.

4. Прикладная техническая диагностика и мониторинг деформированных, поврежденных и предельных состояний высоконагруженных элементов конструкций при раздельном и совместном применении методов хрупких тензочувствительных покрытий и акустической эмиссии, выполняемая в режиме нагружения изделий.

Степень достоверности полученных результатов.

Достоверность полученных автором результатов исследования и научных положений обоснована их внутренней непротиворечивостью, подтверждена другими экспериментальными методами, в том числе тензометрированием и ультразвуковым контролем, результатами численного моделирования в программных средах ANSYS, точность которых известна, а также лабораторными,

стендовыми и натурными испытаниями образцов и конструкций на разрушение, в ходе которых прогнозируемые значения совпадали с регистрируемыми или находились в пределах существующего разброса контролируемых параметров.

Апробация работы.

Материалы исследований, рассмотренные в диссертационной работе, докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях: III международная научно-техническая конференция «Акустическая эмиссия. Роль метода в системах комплексного мониторинга технического состояния опасных производственных объектов», Москва, 2013 г.; IV международная научная конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», г. Москва, 2015 г.; международная конференция «Живучесть и конструкционное материаловедение» (ЖивКоМ - 2016), г. Москва, 2016 г.; IV международный научно-технический симпозиум, посвященной 80-летию ИМАШ РАН, ЖивКоМ-2018, г. Москва, 2018 г.; международная научно-техническая конференция, посвященная 100-летию ЦАГИ, г. Жуковский, 2018 г.; XII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механики, г. Уфа, 2019 г.; Актуальные проблемы метода акустической эмиссии (АПМАЭ-2021), г. Санкт-Петербург: ИТМО. – 2021 г.; XVI международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2022 г.; Всероссийская конференция «iPolytech seminar», Иркутск. – 23-25 ноября 2022 г.; Юбилейная международная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», Москва, ИМАШ РАН, 2023 г.

Публикации.

По результатам диссертационной работы опубликовано 86 работ, в том числе 44 статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК, 24 статьи в изданиях, индексируемых в реферативной базе Scopus и Web of Science, изданы четыре монографии, четыре сборника, получено десять патентов РФ на изобретения.

Личный вклад автора.

Автору принадлежат: постановка цели и формулировка задач научной работы, создание и теоретическое обоснование физических моделей, планирование и проведение экспериментов, статистическая обработка полученных результатов, их анализ.

Структура и объем диссертации.

Содержание настоящей диссертации включает введение, шесть глав, заключение, список литературы из 249 наименований и приложение. Диссертация изложена на 331 странице, содержит 176 рисунков, 36 таблиц.

Связь работы с договорной тематикой и научными программами.

Результаты исследований, приведенные в настоящей диссертации, получены в ходе договорных работ с ФПИ, предприятиями оборонной, космической и авиационной промышленности (АО «Корпорация МИТ», АО «ЦНИИмаш, АО «КБХА», ФАУ «ЦАГИ», ПАО «Яковлев», ПАО «Компания «Сухой»), трубопроводного транспорта (ООО «Диаскан», ООО «НИИ Транснефть»), научно-производственными центрами (ЗАО «НИИИН МНПО «Спектр», ООО «Интерюнис-ИТ», ООО НИЦ «ИРТ»), соглашений по грантам РНФ и РФФИ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении обоснована актуальность, поставлена цель и задачи диссертационной работы, показана степень разработки темы по направлениям проводимых исследований. Отмечена ведущая роль научных школ и центров в нашей стране, созданных академиками А.А. Ильюшиным, С.Н. Журковым, Г.П. Черепановым Ю.Н. Работновым, В.В. Болотиным, С.В. Серенсеном, В.Е. Паниным, чл.-корр. Н.А. Махутовым, профессорами И.А. Биргером, Е.М. Морозовым, Ю.Г. Матвиенко.

Сформулирована научная новизна работы, а также теоретическая и практическая значимость выполненных исследований. Выполнено обоснование выбора наиболее эффективных методов для решения поставленных задач. Рассмотрена методология их применения для диагностики полей и концентраторов напряжений на стадии упругого деформирования, мониторинга кинетики повреждений и оценки несущей способности конструкций на стадиях неупругого и предельного деформирования в режиме нагружения. Приведены основные положения и результаты исследований, выносимые на защиту. Отражено внедрение результатов диссертационной работы на предприятиях промышленности, их обсуждение на научных конференциях, связь с тематикой Института и научными программами, выполняемыми по грантам РНФ и РФФИ.

В первой главе рассмотрено научное обоснование выбора наиболее эффективных методов диагностики деформированных и поврежденных состояний конструкций в соответствии с поставленными задачами исследования. Процесс накопления повреждений в машиностроительных конструкциях в ходе эксплуатации изделий сопровождается деградацией свойств конструкционного материала. Наиболее интенсивны такие процессы в зонах концентраторов напряжений, особенно при повышенных и низких температурах, при воздействии агрессивной среды, повышенной вибрации. Причем на напряжения от действия эксплуатационных нагрузок могут накладываться остаточные напряжения, возникающие при запредельных режимах и внештатных ситуациях, а также в ходе изготовления элементов конструкций, проведения монтажно-сборочных и пусконаладочных работ. Существующие расчетно-экспериментальные концепции эволюции разрушения конструкционных материалов не позволяют достоверно оценить фактическое влияние рассеянных структурных дефектов, остаточных напряжений, ударных воздействий, особенностей эксплуатации, деградации свойств материала на снижение несущей способности конструкций. В связи с этим возникла актуальная необходимость создания концепции, отражающей фактический уровень поврежденности конструкционного материала в высоконагруженных зонах конструкций, а также разработки методики мониторинга текущего состояния его несущей способности в режиме нагружения.

В качестве научно-теоретической базы обоснования такой концепции и методики её реализации использованы положения современной механики деформирования, прочности, поврежденности и разрушения материалов, в том

числе концепций, разрабатываемых в ФГБУН ИМАШ РАН (Н.А. Махутов, Ю.Г. Матвиенко, А.Н. Романов), ФГБУН ИМПЕХ РАН (И.Г. Горячева, Р.В Гольдштейн.), ИФПМ СО РАН (В.Е. Панин), ФГБУН ИМЕТ РАН (Л.Р. Ботвина, В.Ф. Терентьев), МГТУ им. Н.Э. Баумана (С.С. Гаврюшин, А.С. Куркин), АО «НИКИЭТ» (Ю.Г. Драгунов, С.В. Европин), АО «ЦНИИмаш» (А.Г. Казанцев), НИИ «Транснефть» (Д.А. Неганов), НИИГАЗ (В.В. Хариновский), ФАУ «ЦАГИ» (Г.И. Нестеренко, В.С. Дубинский), АО «ЦНИИмаш» (Н.Г. Паничкин).

Выбор наиболее информативных методов ЭМ, НК и ТД, позволяющих получить необходимую информацию для решения поставленных задач, осуществлялся с учетом потенциальных возможностей использования средств диагностики в условиях стендовых и натурных испытаний. При этом учитывалась возможность их применения для диагностики полей и концентраторов напряжений по всей поверхности изделий, в локальных зонах и точках, выявления поверхностных, подповерхностных и структурных повреждений и дефектов.

Стендовым и натурным условиям испытаний высоконагруженных элементов конструкций и решаемым при этом задачам диагностики деформированных и поврежденных состояний отвечают методы АЭ и ХТП. Причем последние позволяют проводить исследования в широком диапазоне деформаций, температур, рабочих сред, при воздействии давлений, вибраций, электромагнитных полей, эффективно решая поставленные задачи по анализу полей и концентраторов напряжений. Картинны трещин в ХТП дают информацию о распределении главных напряжений (деформаций) на поверхности изделий, выявляют локальные и точечные концентраторы, в том вызванные поверхностными, подповерхностными и структурными дефектами в материале конструкции. Применение расчетно-экспериментальной зависимости (1), связывающей напряженно-деформированное состояние (НДС) на поверхности детали с величиной тензочувствительности (ε_0) и плотностью трещин (Ψ) в ХТП, позволяет в диапазоне деформаций $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 - \varepsilon_e = 200 - 20000$ мкм/м (ε_e – деформация отслаивания покрытия) проводить их количественную оценку в зонах трещинообразования тензопокрытия с погрешностью, не превышающей 20 %:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \cdot \left(1 + K_\varepsilon \cdot \frac{\Psi - \Psi_0}{\Psi_0} \right), \quad (1)$$

K_ε – коэффициент пропорциональности, Ψ_0 – плотность трещин в ХТП (тр. / см), соответствующая пороговому уровню деформации $\varepsilon_1 = \varepsilon_0$.

Для регистрации процесса трещинообразования ХТП может быть использована не только видеосъёмка, но и АЭ диагностика, которая дает возможность осуществлять локацию координат образования трещин на разных участках поверхности конструкции, синхронно регистрируя при этом текущие уровни деформации и нагрузки. В отличие от других методов АЭ диагностика позволяет не только осуществлять локацию развивающихся дефектов и повреждений, но и контролировать их кинетику на микро-, мезо- и макромасштабном уровне в процессе нагружения изделия, выявляя потенциально опасные зоны.

В качестве научно-методической базы концепции безопасной эксплуатации деталей машин и конструкций использован параметр несущей способности $B(\tau)$, характеризующий текущий уровень нагрузки, деформации, длительности их воздействия, относительно критических значений, которые приводят конструкцию в предельное состояние. Параметр несущей способности представлен в следующей интерпретации:

$$B(\tau) = 1 - D(\tau), \quad (2)$$

$D(\tau) = d_i/d_k$ – соотношение текущего содержание повреждений в структуре конструкционного материала (d_i) к критическому (d_k), регистрируемому при его разрушении. На Рис. 1 показаны графики, отражающие кинетику повреждаемости конструкционного материала (D) и снижение его несущей способности (B) в эффективном сечении в зависимости от уровня обобщенного параметра \bar{X} ($\bar{Q} = Q/Q_k$, $\bar{N} = N/N_k$, $\bar{\tau} = \tau/\tau_k$), характеризующего изменение нагрузки (Q), числа циклов (N) и длительности нагружения (τ) относительно критических значений X_k (Q_k , N_k , τ_k), регистрируемых в предельном состоянии при разрушении изделия.

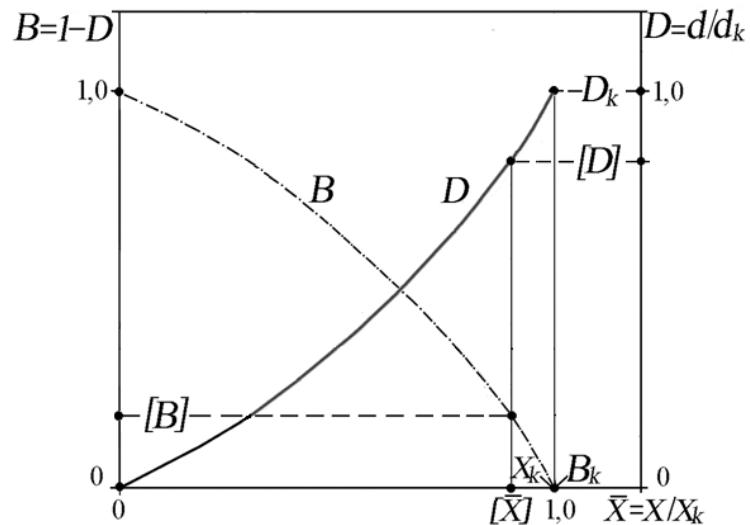


Рис.1. Графики накопления повреждений ($D=d/d_k$) и снижения несущей способности ($B=1-D$) в зависимости от текущего уровня обобщенного параметра $\bar{X}(Q/Q_k, N/N_k, \tau/\tau_k)$

Символами $[B]=1-[D]$, $[D]=1/n_d$ и $[\bar{X}]=\bar{X}/n_x$ на схеме обозначены допустимые уровни несущей способности, накопления повреждений и обобщенного параметра, определяемые с учётом коэффициентов запаса n_d , n_x . В классическом понимании допустимый уровень несущей способности конструкции определяется параметрами, характеризующими напряженное состояние и историю нагружения:

$$[B] = f\{(1 - \bar{\sigma})/n_\sigma, (1 - \bar{\varepsilon})/n_\varepsilon, (1 - \bar{N})/n_N, (1 - \bar{\tau})/n_\tau\}, \quad (3)$$

n_σ , n_ε , n_N , n_τ – запасы по допустимым напряжениям $[\sigma]$, деформациям $[\varepsilon]$, циклам нагружения $[N]$, длительности $[\tau]$; $\bar{\sigma} = \sigma/\sigma_k$, $\bar{\varepsilon} = \varepsilon/\varepsilon_k$, $\bar{\tau} = \tau/\tau_k$, $\bar{N} = N/N_k$.

Контролируя в режиме нагружения изделия, как следует из Рис. 1, текущий уровень накопления повреждений $D(\tau)$, а, соответственно, снижение несущей способности $B(\tau)$, получаем возможность верифицировать заложенные при проектировании конструкции запасы по прочности (n_Q), количеству циклов (n_N), длительности нагружения (n_τ):

$$\left\{ \frac{n_Q}{n_d}, \frac{n_N}{n_d}, \frac{n_\tau}{n_d} \right\} \rightarrow 1. \quad (4)$$

Зависимости (1) – (4), представленные в обобщенной форме в выражении (5):

$$\left\{ \varepsilon_{n,max}, B \right\} = \left\{ \varepsilon_0 \cdot \left(1 + K_\varepsilon \frac{\Psi - \Psi_0}{\Psi_0} \right), \frac{d_k - d(\tau)}{n_d \cdot d_k} \right\} \quad (5)$$

составляют основу научного обоснования выбора методов ХТП и АЭ, а также разработки методологии их применения для решения поставленных в диссертационной работе задач: диагностики и мониторинга деформированных, поврежденных и предельных состояний высоконагруженных конструкций.

Во второй главе рассмотрены ХТП, применяемые для выявления развивающихся дефектов и повреждений на ранней стадии нагружения конструкций в условиях их упругого деформирования. Изложены теоретические основы метода хрупких покрытий, включающие связь напряжений и деформаций в покрытии и подложке. Исходя из неразрывности и совместности деформаций на границе их сцепления: $\varepsilon_{1\pi} = \varepsilon_{1d}$, $\varepsilon_{2\pi} = \varepsilon_{2d}$, $\gamma_\pi = \gamma_d$, с применением уравнений термоупругости, установлены соотношения, связывающие главные напряжения в покрытии ($\sigma_{1\pi}$, $\sigma_{2\pi}$) с напряжениями на поверхности детали (σ_{1d} , σ_{2d}):

$$\begin{aligned} \sigma_{1\pi} &= \frac{E_\pi \cdot (1 - \mu_\pi \cdot \mu_d)}{E_d \cdot (1 - \mu_\pi^2)} \cdot \left(\sigma_{1d} - \frac{\mu_d - \mu_\pi}{1 - \mu_\pi \cdot \mu_d} \cdot \sigma_{2d} \right) + \frac{E_\pi \cdot (\alpha_\pi - \alpha_d) \cdot \Delta T}{1 - \mu_\pi}; \\ \sigma_{2\pi} &= \frac{E_\pi \cdot (1 - \mu_\pi \cdot \mu_d)}{E_d \cdot (1 - \mu_\pi^2)} \cdot \left(\sigma_{2d} - \frac{\mu_d - \mu_\pi}{1 - \mu_\pi \cdot \mu_d} \cdot \sigma_{1d} \right) + \frac{E_\pi \cdot (\alpha_\pi - \alpha_d) \cdot \Delta T}{1 - \mu_\pi}, \end{aligned} \quad (6)$$

α_π , α_d , E_π , E_d , μ_π , μ_d – коэффициенты температурного расширения, модули упругости и коэффициенты Пуассона покрытия и детали. Если первые составляющие напряжений $\sigma_{1\pi}$ и $\sigma_{2\pi}$ в покрытии вызваны напряжениями σ_{1d} , σ_{2d} на поверхности детали, то вторые обусловлены различной усадкой покрытия и детали в диапазоне ΔT от температуры затвердевания покрытия (T_g) до температур проведения испытаний (T_e).

На основании выражений (6) определены критерии для получения высокочувствительных ХТП со стабильными характеристиками. Для этого коэффициенты Пуассона и температурного расширения покрытия и материала детали должны быть близки. Расхождение коэффициентов Пуассона не должно превышать $|\mu_\pi - \mu_d| \leq 0,1$, а коэффициентов расширения $|\alpha_\pi - \alpha_d| \leq 5 \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$ в диапазоне от температуры формирования ХТП до проведения испытаний.

Характеристики тензочувствительности ХТП, используемые для оценки НДС на поверхности изделий в зонах трещинообразования хрупкого покрытия, определяют на плоских балках при испытаниях на консольный изгиб (Рис. 2).

Они включают величину порогового напряжения (σ_0) и пороговой деформации (ε_0) образования трещин в ХТП (величины тензочувствительности), зависимость изменения численности трещин в покрытии от уровня деформации в подложке $\Psi = f(\varepsilon_l / \varepsilon_0)$, а также напряжения (σ_e) и деформации (ε_e) отслаивания тензопокрытия от подложки.

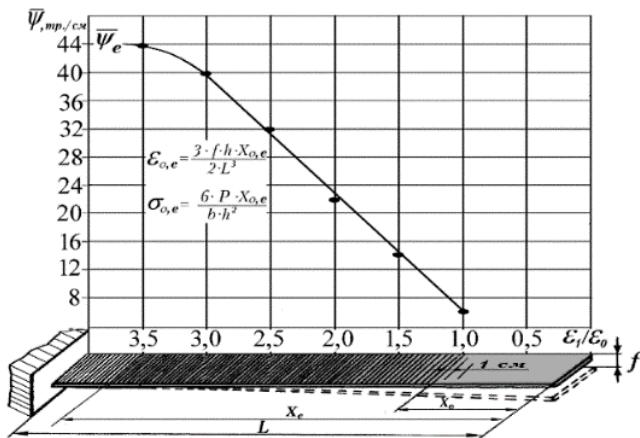


Рис. 2. Определение характеристик тензочувствительности ХТП на плоских балках: $\varepsilon_0 (\sigma_0)$ – пороговая деформация (напряжение) образования трещин; $\varepsilon_e (\sigma_e)$ – пороговая деформация (напряжение) отслаивания покрытия; Ψ – плотность трещин в покрытии на базе 1 см; Ψ_e – плотность трещин при деформации ε_e

При линейном напряженном состоянии первое из выражений (6) примет вид:

$$\sigma_{1\pi} = \frac{E_\pi \cdot (1 - \mu_\pi \cdot \mu_d)}{E_d \cdot (1 - \mu_\pi^2)} \cdot \sigma_{1d} + \frac{(\alpha_\pi - \alpha_d) \Delta T}{1 - \mu_\pi}. \quad (7)$$

Подставляя его в условие образования трещин в ХТП: $\sigma_{1\pi} \geq \sigma_\pi^B$, получаем зависимость, связывающую величину ε_0 с пределом прочности тензопокрытия:

$$\varepsilon_0 = \frac{1 - \mu_\pi^2}{E_\pi \cdot (1 - \mu_\pi \cdot \mu_d)} \cdot \sigma_\pi^B - \frac{(1 + \mu_\pi) \cdot (\alpha_\pi - \alpha_d) \Delta T}{(1 - \mu_\pi \cdot \mu_d)}. \quad (8)$$

Рассмотрено изменение напряжения $\sigma_{1\pi}$ в зоне влияния трещины, составляющей примерно семь толщин тензопокрытия ($l_0 = 7 \cdot h_\pi$). При этом его повышение относительно σ_π^B по мере удаления (l) от края трещины согласуется со следующей зависимостью:

$$\frac{\sigma_{1\pi}}{\sigma_\pi^B} = \log_2 \left(1 + \frac{l}{7 \cdot h_\pi} \right). \quad (9)$$

Как следует из зависимости (9), для образования новой трещины на расстоянии равном толщине покрытия, уровень деформаций в подложке должен быть не менее, чем в пять раз выше порогового (ε_0). Такой результат подтверждается данными тестовых испытаний ХТП, на основании которых установлена зависимость изменения численности трещин Ψ в хрупком покрытии от уровня деформации ε_1 относительно величины ε_0 :

$$\Psi = \Psi_0 + K_\Psi \cdot \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} - 1 \right), \quad (10)$$

$\Psi_0 = 4 \div 6$ – плотность трещин при $\varepsilon_1 = \varepsilon_0$, K_Ψ – коэффициент, зависящий от типа ХТП.

Для различных условий воздействия внешней среды и температур испытаний изделий разработаны наиболее эффективные типы ХТП в том числе канифольные, оксидные и стеклоэмалевые тензопокрытия. Показана возможность регулирования характеристик тензочувствительности за счет изменения состава и технологических параметров на этапах формирования тензопокрытий на поверхности изделий. По результатам тестовых испытаний ХТП установлены зависимости характеристик тензочувствительности от условий проведения испытаний, в том числе температуры, давления, режима нагружения.

Разработана методика анализа НДС на поверхности изделий по картинам трещин в ХТП с расширенным спектром характеристик тензочувствительности: ε_0 , ε_e , $\Psi=f(\varepsilon_1/\varepsilon_0)$, повышающим информативность метода и позволяющим по результатам даже одного испытания проводить количественную оценку распределения главных напряжений (деформаций) в зонах трещинообразования тензопокрытия. Сопоставление значений главных напряжений (деформаций), определенных с применением характеристик тензочувствительности в местах их локализации, с результатами аналитических решений, тензометрии и расчета МКЭ, свидетельствует о том, что наибольшие расхождения не превышали 20 %.

В третьей главе дан анализ процесса деформирования и разрушения структурных связей твердого тела, сопровождаемого возникновением явления акустической эмиссии. Рассмотрены происходящие при этом волновые процессы смещений среды, возникающие в результате трансформации и диссипации освобождающейся энергии, как в момент самого разрыва структурной связи, так и в период последействия. Показано, что при разрыве структурной связи, освобождаемая энергия упругой деформации трансформируется в кинетическую и потенциальную энергию упругих волн, распространяющихся в среде твердого тела.

Проанализированы факторы, влияющие на погрешность локации источников АЭ, а именно, определения времени прихода импульсов на преобразователи антенной решётки и их групповой скорости, а также зависимость этих параметров от амплитуды и затухания энергии высокочастотных гармоник. Рассмотрены проблемы локации источников АЭ в композитных изделиях. На примере определения АЭ свойств в композитной панели со стрингерами перед её испытаниями на сжатие рассмотрена методика подготовки к проведению АЭ диагностики исследуемого изделия, включающая расчёт групповой скорости и затухания амплитуды импульсов, выбора оптимального размера и схемы антенной решётки. Показано их влияние на погрешность локации источников АЭ.

Для селекции в процессе АЭ диагностики импульсов АЭ на характерные непересекающиеся кластеры разработана комбинационно-параметрическая концепция (КПК), основанная на гипотезе подобия форм сигналов у близких по своей природе источников АЭ. К основным параметрам сигналов, приведенным на Рис. 3, *a*, и характеризующим их форму, относят максимальную амплитуду (u_m), длительность её нарастания (τ_h) в мкс – время от момента пересечения порога дискриминации (u_{th}) до достижения максимальной амплитуды, длительность затухания (τ_c) – время спада амплитуды сигнала от u_m до ухода под порог, длительность импульса ($\tau_u = \tau_h + \tau_c$), количество выбросов (N_u) в ед. – пересечений порога u_{th} .

В качестве наиболее информативных для отображения формы сигналов, предложено использовать комбинированные параметры: N_u/τ_u , u_m/N_u , характеризующие соответственно плотность осцилляций в импульсе (усредненную частоту выбросов) и крутизну спада амплитуды на фазе его затухания, поверхность под огибающей которой характеризует энергию импульса E_u (Рис. 3, *a*).

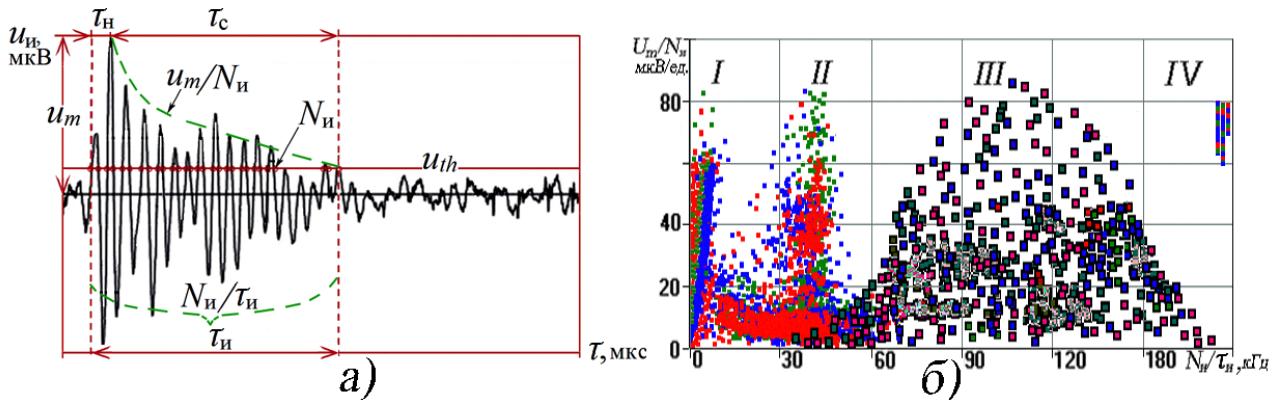


Рис. 3. Основные параметры, характеризующие форму сигналов АЭ (а), и селекция импульсов в поле дескрипторов: $u_m/N_u - N_u/\tau_u$ на кластеры, формируемые сигналами электромагнитных наводок (I), механических помех (II), разрушением структуры конструкционного материала (III) и реверберацией (IV)

На Рис. 3, б показана селекция импульсов в поле дескрипторов $u_m/N_u - N_u/\tau_u$, позволяющая формировать в процессе АЭ диагностические кластеры, вызванные электромагнитными наводками (I), механическими шумами (II), разрушением структуры материала (III) и реверберацией (IV). Используя разработанную методику, в ходе АЭ диагностики кессона стабилизатора планера МС-21-300 при его ресурсных испытаниях удалось в зоне технологического окна стенки лонжерона отфильтровать источники помех, составившие 98 % от всех зарегистрированных АЭ событий.

С применением АЭ диагностики, вибродиагностики, высокоскоростной видеосъемки и численного моделирования исследован процесс разрыва армирующих волокон полимерных композитных материалов (ПКМ). По результатам статистической обработки полученных данных на Рис. 4 построена зависимость изменения величины относительной энергии (E_u) регистрируемых импульсов АЭ при разрыве углеродных волокон от площади их сечения (Ω).

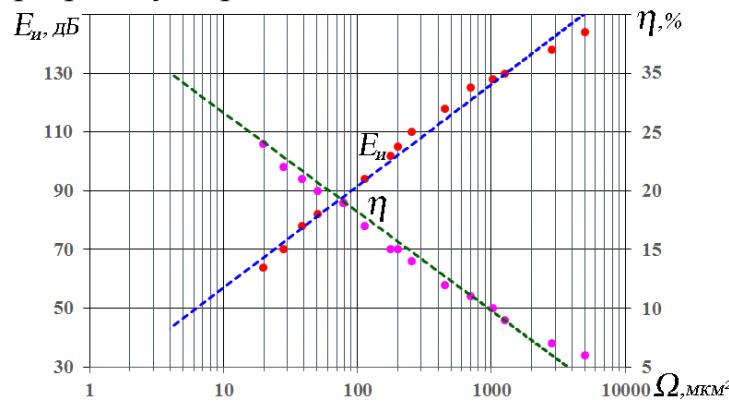


Рис. 4. Изменение максимальной энергии импульсов АЭ (E_u) и уровня её разброса (η_{E_u}) в интервале $\pm 2S$ в зависимости от площади сечения (Ω)

Сравнение спектров сигналов, зарегистрированных в момент разрыва волокон и в период последующего упругого сокращения связей, показало, что, если при разрыве волокон более 95 % энергии регистрируемой в ультразвуковом диапазоне выделяется при частотах $f \geq 30$ кГц, то в период последействия до 95 % всей энергии регистрируют в звуковом диапазоне при частотах меньших 2 кГц.

В четвертой главе рассмотрено современное состояние теории эволюции разрушения твердого тела и существующих концепций, основным недостатком которых является невозможность применения для мониторинга фактического состояния поврежденности композитного материала на разных масштабно-структурных уровнях в режиме нагружения изделий. Для решения этой проблемы предложена структурно-феноменологическая концепция (СФК) и модель эволюции разрушения твердого тела, связывающая кинетику разрушения структурных связей в режиме нагружения с перераспределением весового содержания повреждений на микро-, мезо- и макромасштабном уровне в материале изделия. В основу СФК положена синергетическая модель, которая представляет разрушение в виде взаимосвязанного накопления повреждений в диссипативной системе связей твердого тела на разных масштабных уровнях. Графики на Рис. 5 отражают изменение весового содержания повреждений (d_i/d_Σ) в композитном материале на микро- (D_H), мезо- (D_C) и макроуровне (D_B) в процессе повышения нагрузки (P) относительно критической величины (P_k).

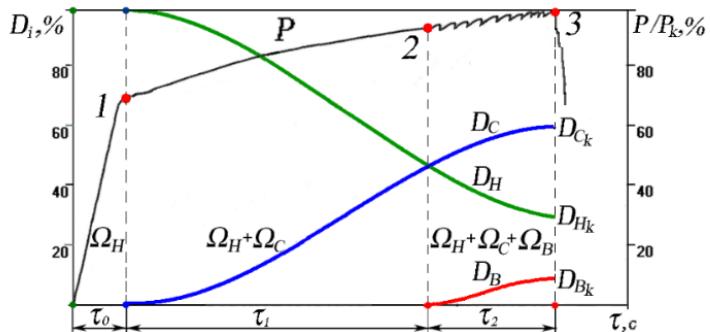


Рис. 5. Кинетика изменения весового содержания повреждений (d_i/d_Σ) в композитном материале на микро- (D_H), мезо- (D_C) и макроуровне (D_B) в режиме повышения нагрузки (P) относительно критической величины (P_k)

Концепция предполагает, что на стадии упругого деформирования τ_0 в материале возникают только рассеянные микроповреждения, поверхность разрушения которых по результатам проведенной микрометрии образцов однонаправленного ламината при растяжении не превышает $\Omega_H < 100 \text{ мкм}^2$.

При повышении нагрузки или числа циклов нагружения на стадии τ_1 в результате эволюции локальные микроповреждения достигают мезомасштабного уровня $\Omega_C = 100-1000 \text{ мкм}^2$, что сопровождается синхронным снижением параметра D_H и ростом параметра D_C . На стадии τ_2 локальные мезоповреждения достигают макромасштабного уровня $\Omega_B > 1000 \text{ мкм}^2$, что приводит к дальнейшему снижению весового содержания микроразрушений – параметра D_H и росту мезо и макроразрушений – параметров D_C и D_B , которые при достижении пороговых значений D_{Ck} и D_{Bk} вызовут разрушение материала. Если в процессе нагружения изделия контролировать перераспределение весового содержания микро-, мезо- и макроразрушений в структуре материала, суммарный уровень которых неизменно составляет $D_\Sigma = D_H + D_C + D_B = 100 \%$, то сопоставляя их с пороговыми значениями D_{Hk} , D_{Ck} и D_{Bk} , можно оценить состояние его несущей способности.

Для реализации СФК использована гипотеза, основанная на теории Гриффитса, согласно которой, чем больше поверхность разрушения структурной

связи, тем выше уровень освобождаемой энергии, а, следовательно, и энергия генерируемых импульсов АЭ. В твердом теле каждый акт нарушения структурных связей сопровождается генерацией импульсов АЭ, отражающих энергетические и темпоральные параметры произошедшего разрушения. Устанавливая соответствие между микро-, мезо-, макро-разрушениями структурных связей и регистрируемыми при этом импульсами получаем возможность контролировать кинетику повреждений в режиме нагружения на разных масштабных уровнях.

В качестве экспериментальных данных для получения такого соответствия были использованы результаты испытания на разрыв нитей армирующих волокон (Рис. 4) и образцов однородного ламината (Рис. 6, ..., Рис. 8), в ходе которых видеосъемка микро-, мезо-, макроразрушений структуры композитного материала проводилась с использованием цифрового микроскопа синхронно с регистрацией аппаратурой генерируемых при этом импульсов АЭ. Ниже представлены кадры видеосъемки типичных повреждений структуры ламината на микро-, мезо- и макромасштабном уровне, фиксируемые на стадиях упругих (τ_0), неупругих (τ_1) и предельных деформаций (τ_2), и формы регистрируемых при этом импульсов АЭ.

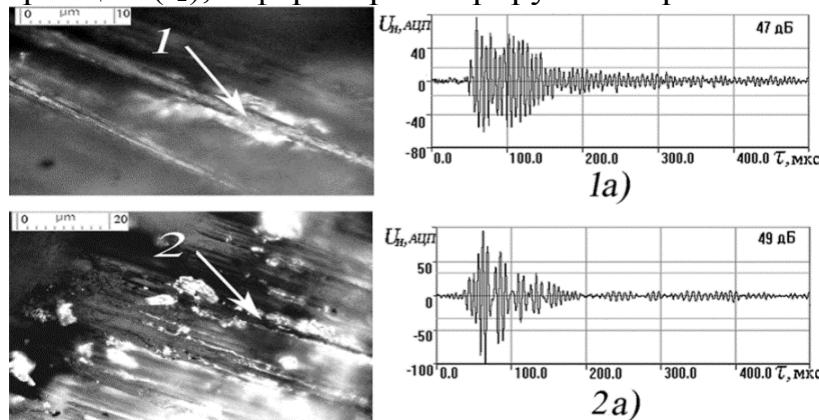


Рис.6. Типичные для стадии τ_0 микроповреждения с поверхностью разрушения $\Omega_H < 100 \text{ мкм}^2$ в виде отслаивания связующего (1), образования микротрещин (2) на границе скрепления с волокнами, и свойственные им формы импульсов (1a, 2a),

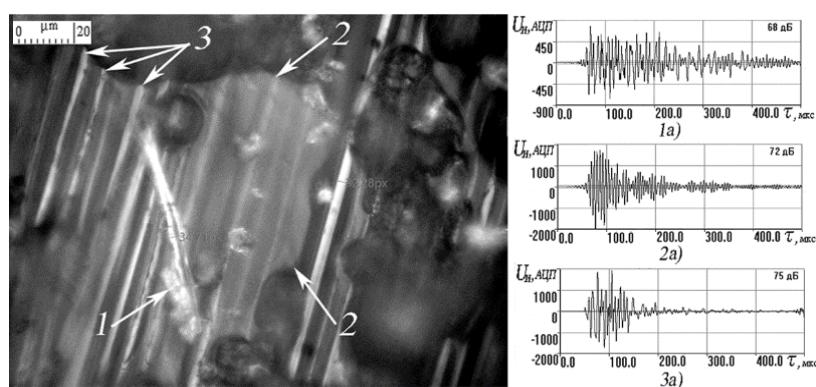


Рис. 7. Типичные для стадии τ_1 мезоповреждения с поверхностью разрушения $100 - 1000 \text{ мкм}^2$ в виде выдергивания из связующего армирующих волокон (1), образования трещин (2) в матрицах слоев, разрыва волокон (3) и свойственные им формы импульсов (1a, 2a, 3a)

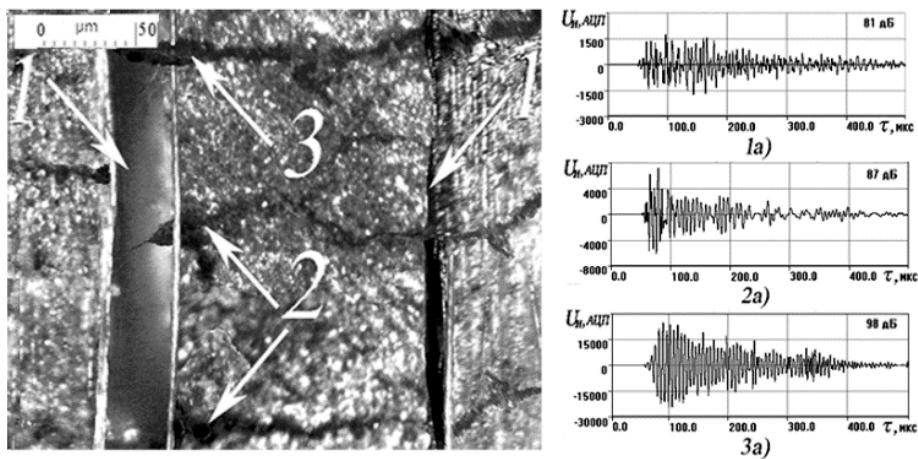


Рис. 8. Типичные для стадии τ_2 макро-разрушения с поверхностью разрушения $\Omega_B > 1000 \text{ мкм}^2$ в виде расслаивания пакета ПКМ (1), образования магистральных трещин (2), разрыва слоев (3) и свойственные им формы импульсов (1a, 2a, 3a)

Предложено регистрируемые в ходе АЭ диагностические импульсы, соответствующие микро-, мезо- и макро-повреждениям с поверхностью разрушения $\Omega_H < 100 \text{ мкм}^2$, $\Omega_C = 100-1000 \text{ мкм}^2$, $\Omega_B > 1000 \text{ мкм}^2$, объединять в кластеры нижнего (H), среднего (C) и верхнего (B) энергетического уровня. На Рис. 9 и Таблице 1 в поле параметров относительной энергии (E_u) и амплитуды (u_u) импульсов АЭ приведены границы H , C , B кластеров, соответствующие микро-, мезо- и макро-разрушениям композитного материала.

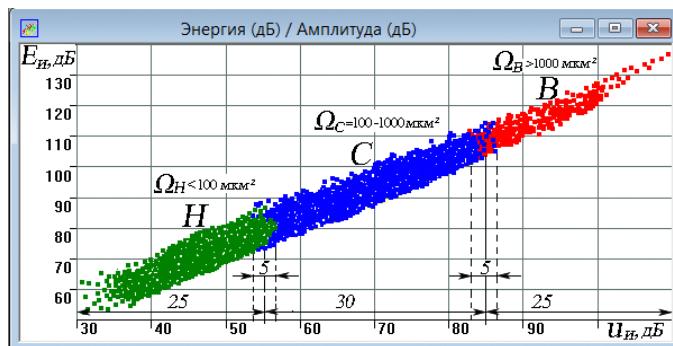


Рис. 9. Границы кластеров нижнего (H), среднего (C) и верхнего (B) уровня импульсов, установленные в поле параметров относительной энергии (E_u) и амплитуды (u_u), соответствующие микро- (Ω_H), мезо- (Ω_C) и макро-разрушениям (Ω_B) структуры композитного материала

Таблица 1.

Поверхности разрушений (Ω) структурных связей ПКМ на микро-, мезо- и макромасштабном уровне, и соответствующие им значения энергия (E_u) и амплитуды (u_u) локационных импульсов

Масштаб разрушения	$\Omega, \text{мкм}^2$	Параметры регистрируемых импульсов АЭ	
		$E_u, \text{дБ}$	$u_u, \text{дБ}$
Микро-	< 100	< 85	< 55
Мезо-	100-1000	85-115	55-80
Макро-	> 1000	> 115	> 80

Для контроля кинетики повреждений на микро-, мезо- и макромасштабном уровне в режиме нагружения предложено использовать потоковые параметры весового содержания и активности локационных импульсов в H , C , B кластерах:

$W_H = (N_H/N_{\Sigma}) \cdot 100\%$, $W_C = (N_C/N_{\Sigma}) \cdot 100\%$, $W_B = (N_B/N_{\Sigma}) \cdot 100\%$ – весовое содержание импульсов в H , C , B кластерах ($W_H + W_C + W_B = 100\%$);

\dot{N}_H , \dot{N}_C , \dot{N}_B – парциальная активность локационных импульсов в кластерах нижнего, среднего и верхнего энергетического уровня ($\dot{N}_{\Sigma} = \dot{N}_H + \dot{N}_C + \dot{N}_B$).

Разработанное программное обеспечение (ПО) при проведении АЭ диагностики обрабатывает получаемую информацию при регистрации локационных импульсах, отображая динамику их парциальной активности (\dot{N}_i) и весового содержания (W_i) в энергетических кластерах. Это позволяет, отслеживая перераспределение микро-, мезо- и макроповреждений в структуре конструкционного материала, оценивать фактическое состояние его несущей способности, сопоставляя текущие значения потоковых параметров W_i с пороговыми [W_i], регистрируемыми при испытаниях тестовых образцов на разрушение. На Рис. 10 показана последовательность обработки ПО регистрируемых АЭ аппаратурой сигналов, осуществляющей каждую секунду градацию локационных импульсов по уровню параметра E_i (а), подсчет парциальной активности \dot{N}_i (б), их кумулятивного накопления N_i , N_{Σ} (в) и весового содержания W_i (г) в H , C , B кластерах.

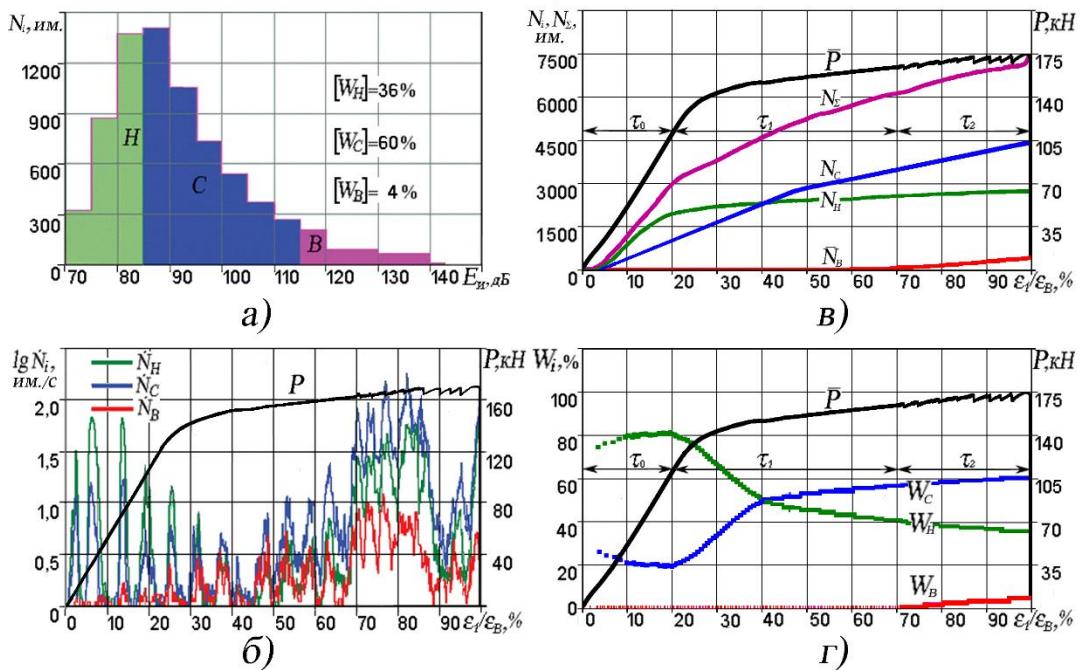


Рис.10. Градация импульсов источников АЭ по уровню относительной энергии E_i (а), подсчет парциальной активности \dot{N}_i (б), их кумулятивного накопления N_i , N_{Σ} (в) и потоковых параметров весового содержания W_i (г) в H , C , B кластерах при повышении соотношения $j=(\varepsilon_i/\varepsilon_B)$ от 5 до 100 %

Границы энергетических кластеров, формируемых локационными импульсами в процессе АЭ диагностики, устанавливают по результатам испытания образцов конструкционного материала на разрушение с учетом типа применяемых ПАЭ, их чувствительности, настроек АЭ аппаратуры, в частности полосы пропускания цифровых фильтров (Δf) и уровня порога дискриминации сигналов

(u_{th}) . Как следует из графиков на Рис. 10, z , наиболее информативными, достоверно отражающими кинетику перераспределения микро-, мезо-, макроповреждений во всём интервале деформирования конструкционного материала, являются потоковые параметры весового содержания локационных импульсов (W_i) в нижнем и среднем энергетических кластерах. Это подтвердили многочисленные экспериментальные исследования при испытаниях образцов ПКМ, сталей и сплавов на растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг, смятие.

На Рис. 11 приведены тренды изменения средних выборочных значений весового содержания локационных импульсов (W_i) в энергетических кластерах и уровни их разброса η_{W_i} в интервале $\pm 2S$ при повышении соотношения деформаций $j=(\varepsilon_l/\varepsilon_B)$ в диапазоне от 5 до 100 %, полученные при испытаниях на разрыв образцов ПКМ с размерами 300x25x6 мм.

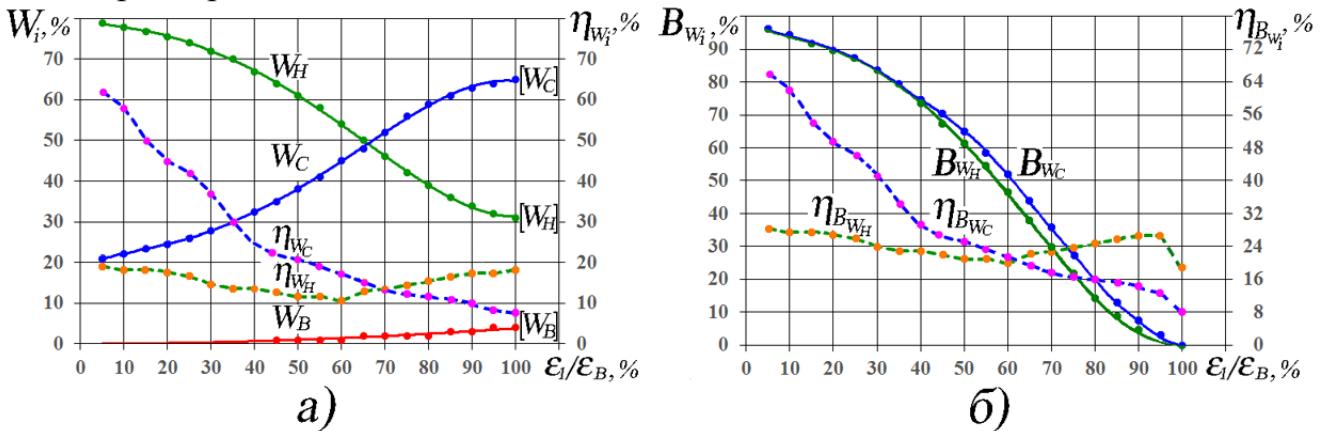


Рис. 11. Тренды изменения весового содержания средних выборочных значений локационных импульсов (W_i) в H , C , B кластерах и величина их разброса η_{W_i} в интервале $\pm 2S$ в зависимости от уровня j в диапазоне 5-100 % (a); графики показателей несущей способности B_{W_H} и B_{W_C} образцов, и оценки погрешности $\eta_{B_{W_i}}$, построенные по параметрам W_H и W_C и значениям их разброса при испытаниях (б)

Сплошными линиями на Рис. 11, a отображена динамика изменения весового содержания средних выборочных значений W_i локационных импульсов в H , C , B кластерах, а пунктирными значениями их разброса η_{W_i} в доверительном интервале $\pm 2S$ при росте уровня j от 5 до 100 %. Причем, если в режиме нагружения изделия параметр W_H позволяет контролировать кинетику суммарного накопления мезо- и макроповреждений: $W_C + W_B = 100 - W_H$, то параметр W_C отражает изменение только мезоповреждений. Сопоставление изменения этих параметров с пороговыми значениями ($100 - [W_H]$ и $[W_C]$), регистрируемыми при разрушении материала, дает возможность вычислять текущий уровень несущей способности испытываемых изделий в процессе их деформирования. Так как уровень весового содержания импульсов в нижнем и среднем кластерах на стадии рассеянного накопления повреждений τ_0 отличается от условно принятого в модели СФК, и составляющего 100 % для W_H , то для корректной оценки показателей B_{W_H} и B_{W_C} несущей способности материала, вводятся поправочные коэффициенты K_H и K_C , с учетом которых формулы их подсчета примут следующий вид:

$$B_{W_H} = K_H \frac{W_H - [W_H]}{100 - [W_H]}; B_{W_C} = K_C \frac{[W_C] - W_C}{[W_C]}. \quad (11)$$

Величина коэффициентов K_H и K_C зависит от начальной поврежденности материала изделия, т.е. от весового содержания локационных импульсов в энергетических кластерах и вычисляется с учетом экстремальных значений параметров $(W_H)_{max}$ и $(W_C)_{min}$, регистрируемых при переходе от рассеянного к локальному накоплению повреждений, и пороговых значений $[W_H]$ и $[W_C]$. Как следует из результатов испытания образцов ПКМ на разрыв (Рис. 11, *a*), при упругих деформациях на стадии рассеянного накопления повреждений наряду с микро-разрушениями регистрируют повреждения и на других масштабных уровнях. Причем при переходе на стадию локального накопления повреждений в зонах концентраторов весовое содержание локационных импульсов в нижнем и среднем кластерах достигает экстремальных значений: $W_H=75-100\%$ и $W_C+W_B\leq 25\%$. Следовательно, уровень показателя B_W несущей способности изделия при переходе от стадии рассеянного накопления повреждений к локальному может быть принят близким к 100 %, если весовое содержание локационных импульсов составляет: $(W_H)_{max}\geq 75\%$, $(W_C+W_B)_{min}\leq 25\%$. Тогда поправочные коэффициенты могут быть определены из следующих зависимостей:

$$K_H = \frac{100-[W_H]}{(W_H)_{max}-[W_H]}; \quad K_C = \frac{[W_C]}{[W_C]-(W_C)_{min}}. \quad (12)$$

С учетом поправочных коэффициентов формулы для подсчета показателей B_{W_i} несущей способности материала изделия приобретают следующий вид:

$$B_{W_H} = \frac{W_H-[W_H]}{(W_H)_{max}-[W_H]} \cdot 100\%, \quad (13)$$

$$B_{W_C} = \frac{[W_C]-W_C}{[W_C]-(W_C)_{min}} \cdot 100\%. \quad (14)$$

Как следует из графиков на Рис. 11, *b*, значения показателей B_{W_H} и B_{W_C} несущей способности, вычисляемых с использованием взаимосвязанных параметров W_H и W_C , $[W_H]$ и $[W_C]$ могут несколько отличаться, что обусловлено влиянием параметра W_B , величина которого не учитывается при подсчете показателя B_{W_C} .

По результатам тестирования кинетики повреждений и снижения значений показателей несущей способности композитных образцов при испытаниях на разрыв, представленных на Рис. 11, *a*, можно сделать следующие выводы.

На стадиях нагружения τ_0 и τ_1 при деформациях $\varepsilon_I \leq 0,65 \cdot \varepsilon_B$ оценку несущей способности изделий целесообразно проводить по значениям параметра W_H , имеющего в интервале $\pm 2S$ наименьший уровень разброса, изменяющийся от $(\eta_{W_H})_{0,05}=19\%$ до $(\eta_{W_H})_{0,65}=11\%$. При уменьшении весового содержания локационных импульсов в нижнем кластере с $(\bar{W}_H)_{0,05}=78\%$ до $(\bar{W}_H)_{0,65}=52\%$ (Рис. 11, *a*) показатель несущей способности снижался с $(B_{W_H})_{0,05}=96\%$ до $(B_{W_H})_{0,65}=30\%$ (Рис. 11, *b*). При этом максимальная погрешность оценки несущей способности, определенная по результатам статистической обработки разброса параметров \bar{W}_H и $[W_H]$, зарегистрированных при испытаниях на разрыв, вычисляемая по формуле:

$$(\eta_{B_W})_{j=0,05-1,0} = \sqrt{(\eta_{W_i})_j^2 + (\eta_{[W_i]})^2}, \quad (15)$$

составляла на стадии τ_0 – $(\eta_{B_{W_H}})_{0,05}=27\%$, а на стадии τ_1 – $(\eta_{B_{W_H}})_{0,2}=25\%$.

На стадии нагружения τ_2 при деформациях $\varepsilon_l \geq 0,7 \cdot \varepsilon_B$ наиболее информативным становится параметр W_c , имеющий наименьший разброс, снижающийся с $(\eta_{Wc})_{0,7}=14\%$ до $(\eta_{Wc})_{1,0}=8\%$ при повышении среднего выборочного значения весового содержания локационных импульсов от $(\bar{W}_c)_{0,7}=52\%$ до $[\bar{W}_c]=65\%$ (Рис. 11, *a*). При этом показатель несущей способности последовательно снижался с $(B_{Wc})_{0,7}=29\%$ до нуля, а наибольшая погрешность, вычисляемая по формуле (15), на стадии τ_2 при $j \geq 0,7$ не превышала 17 %.

В условиях сжатия механизм разрушения структурных связей в изделиях из ПКМ заметно отличается от того, который вызывает растягивающая нагрузка. По мере повышения нагрузки происходит отслаивание связующего от армирующих волокон. Освобождаясь от связующего и получая свободу перемещения, волокна в условиях сжатия теряют несущую способность, вследствие чего происходит расщепление пучков, изгиб и слом волокон. Такие процессы сопровождаются расслаиванием пакета ПКМ, выпучиванием наружных слоев, образованием полос перегиба и срезом срединных слоёв, как показано на Рис. 12.

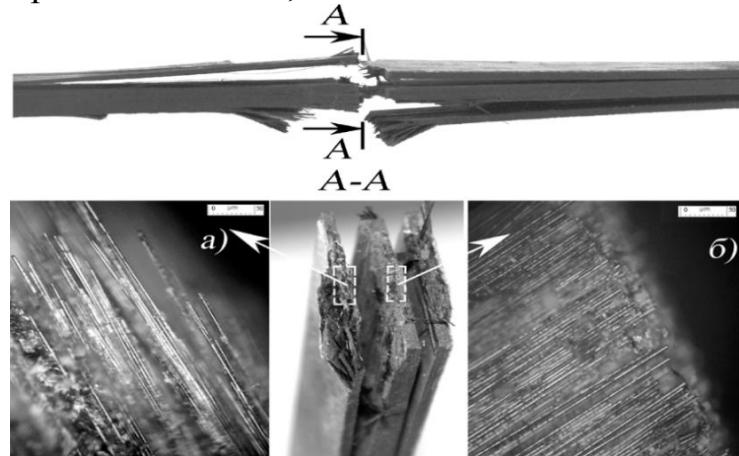


Рис.12. Вид разрушения образца ПКМ при сжатии: *а* – разрушения, возникшие в результате слома наружных слоев в результате выпучивания; *б* – разрушения, вызванные срезом срединных слоев

На Рис. 13, *a* приведены графики изменения средних выборочных значений весового содержания импульсов (W_i) в *H*, *C*, *B* кластерах и величины их разброса η_{W_i} в интервале $\pm 2S$ при повышении уровня соотношения $j=(\varepsilon_2/\varepsilon_{2B})$ от 10 до 100 %, полученные при испытаниях партии 20 многослойных образцов ПКМ прямоугольной формы с размерами 300x22x8 мм, изготовленных по технологии спекания препрегов под давлением. Сплошными линиями на Рис. 13, *a* отображена динамика изменения весового содержания локационных импульсов в *H*, *C*, *B* кластерах при повышении уровня соотношения j в диапазоне от 10 до 100 %, а пунктирными значения их разброса в интервале $\pm 2S$. В указанном диапазоне деформаций с ростом уровня j происходит практически линейное снижение средних выборочных значений параметра \bar{W}_H с 80 до 55 %, сопровождаемое синхронным возрастанием параметра \bar{W}_C от 20 до 40 % и \bar{W}_B до 5 %. При этом наибольшей достоверностью в течение всего процесса нагружения обладает параметр W_H , разброс которого в интервале $\pm 2S$ относительно средних выборочных

значений \bar{W}_H колебался в пределах $(\eta_{W_H})_{0,1-1,0}=14-21\%$, тогда как разброс параметра W_C постепенно снижался с $(\eta_{W_C})_{0,1}=68\%$ до $(\eta_{W_C})_{1,0}=19\%$.

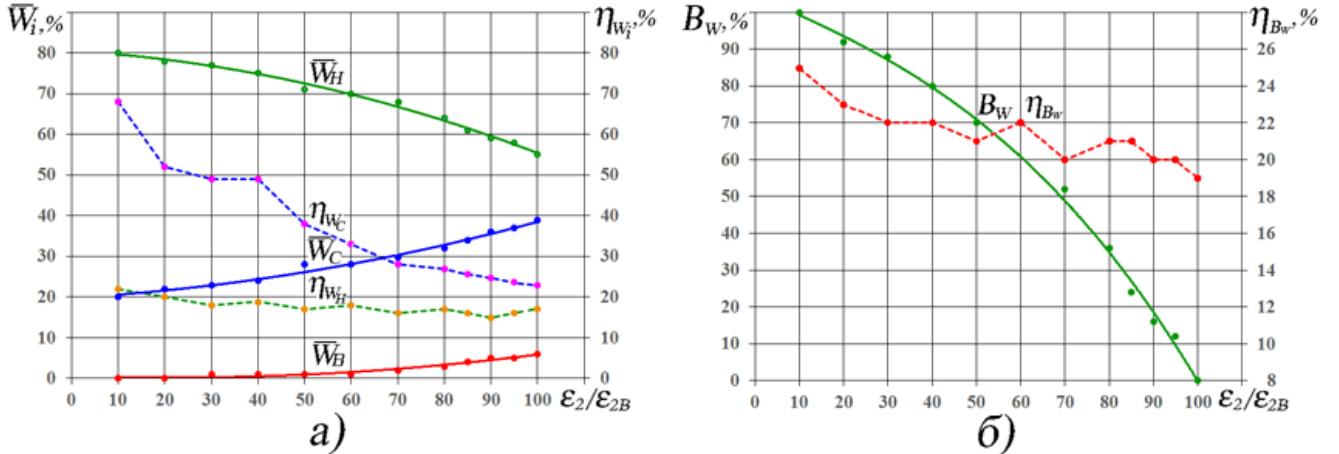


Рис. 13. Тренды изменения весового содержания средних выборочных значений локационных импульсов (W_i) в H , C , B кластерах и величина их разброса η_{W_i} в интервале $\pm 2S$ в зависимости от соотношения деформаций j в диапазоне 10-100 % (a); графики показателя несущей способности материала образцов B_{W_H} и оценки возможной погрешности η_{Bw_H} , построенные по параметрам W_H и значениям их разброса в процессе сжатия (б)

На Рис. 13, б сплошной линией показан график снижения показателя несущей способности B_{W_H} , построенный с использованием алгоритма (13) по средним выборочным значениям параметров W_H и $[W_H]$, а пунктирной график возможной его погрешности η_{Bw_H} , которая при росте уровня j снижалась с 25 до 19 %.

Разработанная методология мониторинга кинетики повреждений на разных масштабных уровнях с оценкой несущей способности была адаптирована применительно к исследованию изделий из конструкционных сталей и сплавов. В связи с более высокой пластичностью этих материалов по сравнению с ПКМ, относительная энергия (E_i) импульсов АЭ, генерируемых при разрушении структурных связей на одном и том же масштабном уровне, оказалась на 5-15 дБ ниже, чем в композитных материалах (Таблица 1), и составляла для сигналов H кластера – $E_i < 75$ дБ, C кластера – $E_i = 75-105$ дБ и B кластера – $E_i > 105$ дБ.

Изучалось влияние различных факторов на характер изменения весового содержания локационных импульсов и их пороговых значений $[W_i]$ в H , C , B кластерах при испытаниях образцов конструкционных материалов на разрушение от действия растягивающих, сжимающих и сдвиговых нагрузок, в том числе в условиях циклического воздействия. Исследования показали, что масштабный фактор, конфигурация и даже структура материала, в том числе количество слоев и направленность укладки в меньшей степени влияет на уровень основных информативных параметров W_H и W_C , чем вид нагружения, чувствительность используемых ПАЭ, уровень настроек аппаратуры, контролирующих полосу пропускания цифровых фильтров, порог дискриминации сигналов, а также границы H , C , B кластеров.

Предложенные критериальные параметры \dot{N}_i и W_i , разработанные алгоритмы и ПО расширили потенциал метода АЭ, позволили использовать его в качестве

эффективного средства мониторинга степени поврежденности конструкционного материала на разных масштабных уровнях и оценки состояния его несущей способности при испытаниях и эксплуатации изделий.

В пятой главе рассмотрено совместное применение методов ХТП и АЭ для диагностики полей и концентраторов напряжений, в том числе локации поверхностных, подповерхностных и структурных дефектов в изделиях на ранней стадии нагружения при упругих деформациях $\varepsilon_t=200-2000$ мкм/м.

Для отделения импульсов АЭ, генерируемых при разрушении ХТП от сигналов сопутствующих помех, изучены их акустические свойства. Исследования проводились при испытаниях на разрыв многослойной структуры оксидного тензопокрытия, схематически представленной на Рис. 14, *а*, и включающего хрупкий оксидный слой (1), алюминиевую фольгу (2), клеевой слой (3) и изделие (4).

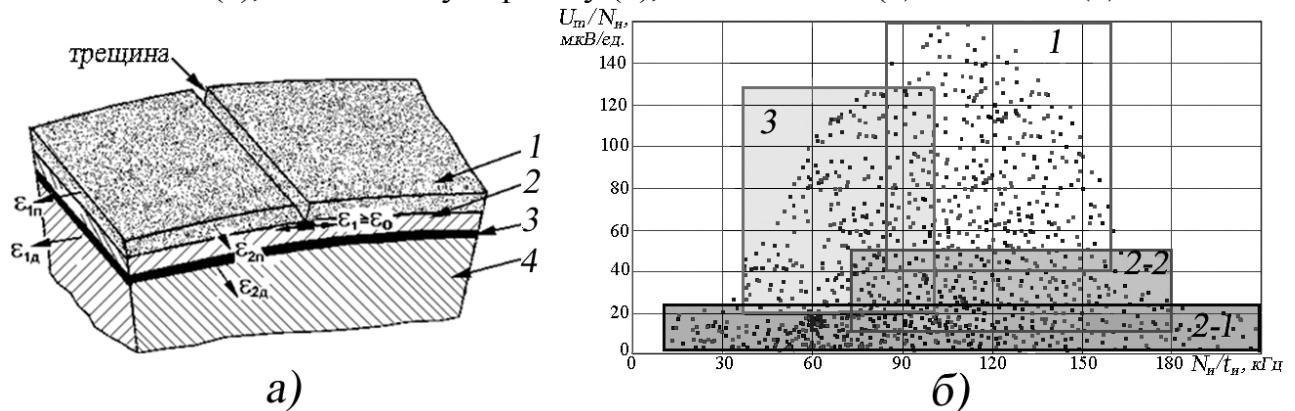


Рис. 14. Структура оксидного тензопокрытия (*а*) и кластеры сигналов АЭ (*б*), формируемые в процессе его разрушения в поле параметров $u_m/N_i-N_i/\tau_i$

На основе КПК разработано ПО, позволяющее в процессе АЭ диагностики изделий в поле дескрипторов $u_m/N_i-N_i/\tau_i$, отражающих форму сигналов, осуществлять кластерную селекцию регистрируемых импульсов, формируя в режиме нагружения изделия характерные кластеры. На Рис. 14, *б* в поле параметров $u_m/N_i-N_i/\tau_i$ представлены границы кластеров, формируемые импульсами АЭ при разрушении хрупкого слоя тензопокрытия (1), пластическом деформировании алюминиевой фольги (2-1) и её разрыве (2-2), нарушении адгезии и отслаивании тензоиндикатора (3). Как видно из Рис. 14, *б*, кластер (1), формируемый импульсами АЭ при разрушении хрупкого слоя тензопокрытия, частично перекрывает сигналами кластера (3), возникающими при нарушении адгезии и его отслаивании от подложки. Однако, регистрация этих импульсов происходит при различном уровне деформирования материала, что позволяет использовать параметры времени, нагрузки или деформации для их разделения. Трешины в хрупком слое оксидного покрытия возникают при уровнях деформации $\varepsilon_t \geq \varepsilon_0 = 200-4000$ мкм/м, тогда как разрушение клеевого слоя и отслаивание ХТП от подложки происходит при деформациях в десятки раз больше указанных.

Методология ранней диагностики локальных концентраторов напряжений на стадии упругого деформирования материала, реализуемая при совместном применении методов ХТП и АЭ, используемой для локации зон образования первых трещин в тензопокрытии, тестировалась при испытаниях на разрыв

образцов ПКМ корсетного типа с центральным отверстием диаметром 14 мм. На Рис. 15 сопоставлены кадры видеосъёмки образования первых трещин в тензопокрытии, которые точно совпадают с результатами координатной локации источников АЭ, зарегистрированных при повышении нагрузки от 22 до 40 кН, составляющих от 12 до 23 % от предельного усилия при разрушении образцов.

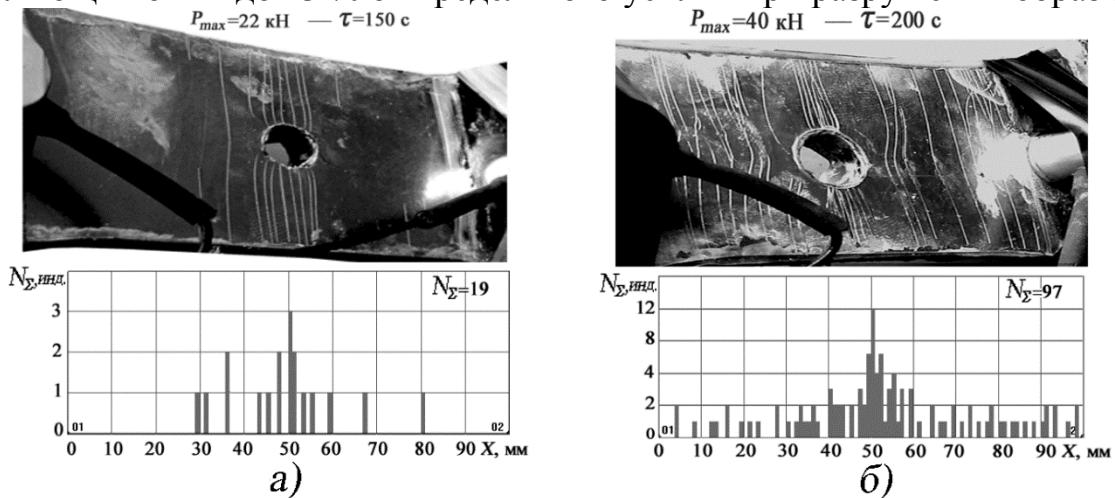


Рис. 15. Сопоставление распределения трещин в ХТП с локацией источников АЭ, зарегистрированных при повышении нагрузки до $P_1=22$ кН (а) и при $P_2=40$ кН (б)

В **шестой главе** рассмотрено научно-методические рекомендации и примеры раздельного и совместного применения методов ХТП и АЭ при исследовании высоконагруженных элементов машиностроительных конструкций.

Показано использование ХТП новых составов и разработанной методологии диагностики полей напряжений (деформаций), выявления поверхностных и подповерхностных концентраторов напряжений в критически нагруженных зонах конструкций, в частности в сварном шве тройника магистрального нефтепровода (Рис. 16) и резинометаллическом шарнире направляющей сопла твердотопливного двигателя.

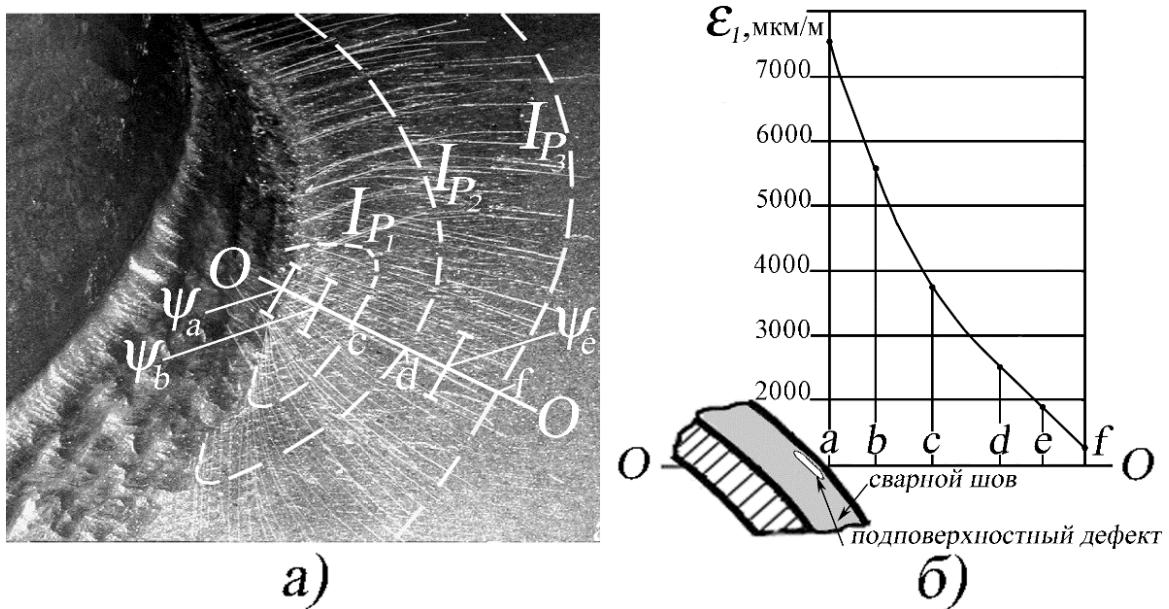


Рис. 16. Область трещинообразования в хрупком тензопокрытии вблизи сварного шва (а) и эпюра распределения деформаций ε_1 (б), построенная по линии $O-O$

Проведенные исследования наглядно продемонстрировали эффективность разработанной методологии для анализа полей и концентраторов, выявления поверхностных и подповерхностных дефектов в зонах трещинообразования хрупкого тензопокрытия. Применение ХТП разработанных составов в ходе стендовых испытаний исследуемых конструкций позволило получить новые сведения о фактическом распределении напряжений и деформаций в зонах, где ранее экспериментальная информация отсутствовала.

Рассмотрено применение разработанной методики и ПО для мониторинга кинетики повреждений в структуре конструкционных материалов на микро, мезо и макромасштабном уровне и оценки несущей способности композитных и стальных высоконагруженных элементов конструкций в условиях циклического нагружения.

Наглядным примером таких возможностей является АЭ диагностика кессона крыла планера МС-21-300, выполненная в ходе его ресурсных испытаний (Рис. 17).

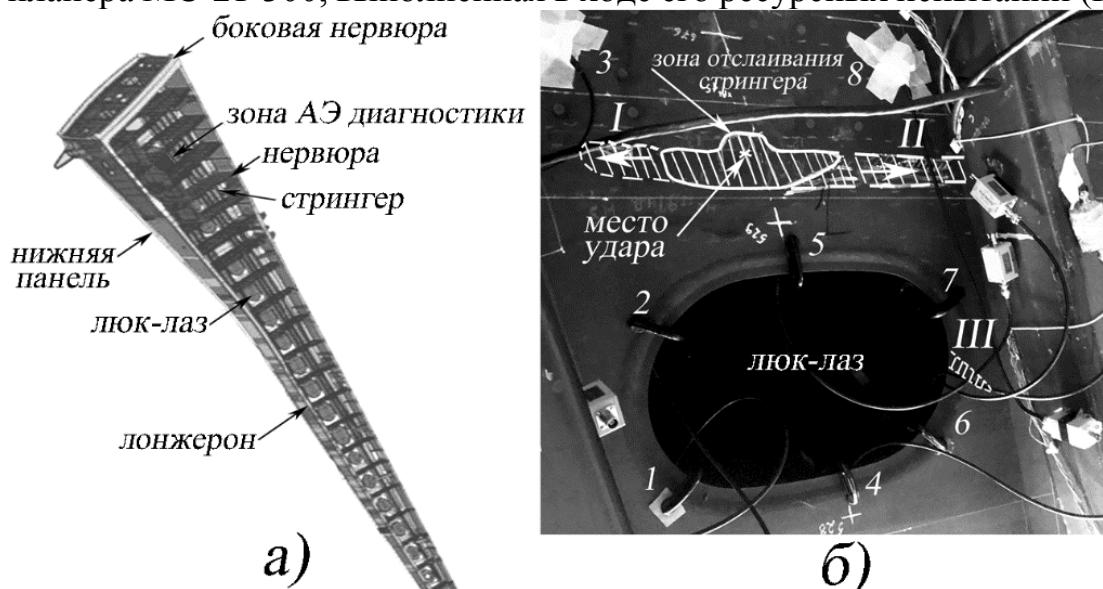


Рис. 17. Вид сверху кессона крыла МС-21 без верхней панели (а) и область АЭ диагностики нижней панели между второй и третьей нервюрами с отмеченными штриховкой зонами повреждения конструкции (I – III) в месте удара (б); 1, ..., 8 – места установки преобразователей акустической эмиссии

Исследования проводились в течение 16 лабораторных полётов уже после половины выработки ресурса в зоне искусственного ударного воздействия в нижней панели кессона между второй и третьей нервюрами вблизи от технологического окна, где регистрировали отслаивание стрингеров и усталостные разрушения ПКМ. На Рис. 17, б стрелками и пунктирной линией показаны зоны распространения отслаивания стрингеров (I и II) от места ударного воздействия в ходе АЭ диагностики, а также зона III развития усталостного разрушения ПКМ в области кромки технологического окна нижней панели.

Результаты АЭ диагностики, зарегистрированные в ходе 16 полетов с номера 31071 по 31086 в области люка-лаза нижней панели кессона между второй и третьей нервюрами, приведены на Рис. 18.

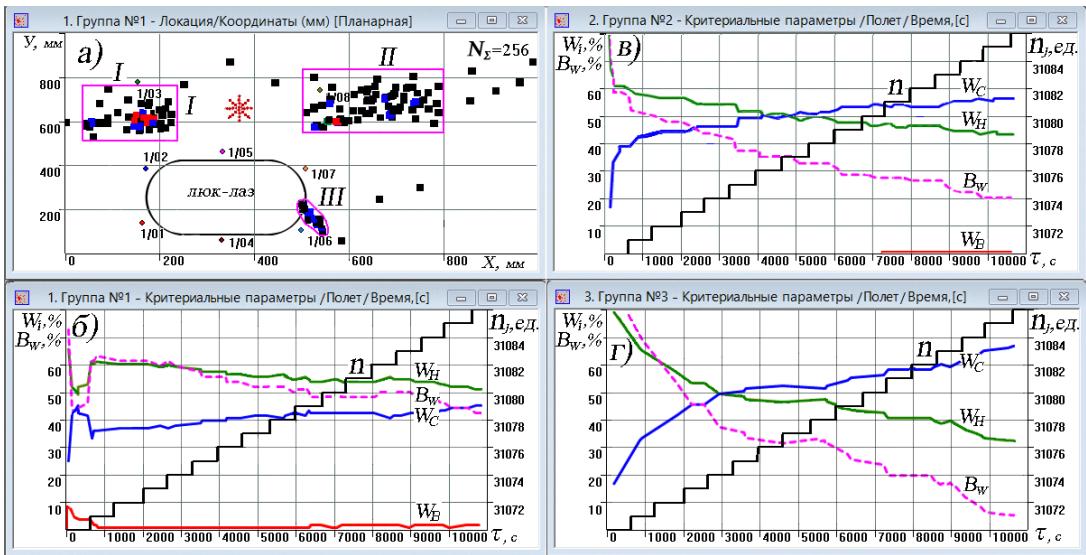


Рис. 18. Рис. 6.28. Результаты АЭ диагностики накопления повреждений в зоне удара (\odot) вблизи люка-лаза нижней панели кессона

Всего в ходе АЭ диагностики при ресурсных испытаниях консоли зарегистрировано $N_{\Sigma}=256$ индикаций источников АЭ. При этом суммарное количество индикаций источников АЭ в первой зоне составляло $N_{\Sigma_I}=84$ ед., во второй – $N_{\Sigma_{II}}=96$ ед., в третьей – $N_{\Sigma_{III}}=76$ ед. Ступенчатой линией на этих графиках, обозначенной символом « n », показана длительность нагружения в ходе лабораторных полетов.

На Рис. 18, б – г представлена динамика изменения потоковых параметров W_i локационных импульсов в H , C , B кластерах, отражающая кинетику перераспределения весового содержания микро-, мезо-, макроповреждений в зонах I – III нижней панели кессона в течение 16 лабораторных полетов. Если в зоне I (Рис. 18, б) снижение параметра W_H составляло 11 % (с 61 до 52 %) при синхронном росте параметра W_C от 36 до 46 %, в зоне II (Рис. 18, в) уровень падения параметра W_H достигал 18 % (с 60 до 42 %) при возрастании параметра W_C от 40 до 57 %, то в зоне III – развития усталостного разрушения ПКМ (Рис. 18, г), процесс структурной перестройки материала происходил более интенсивно. Падение параметр W_H составило 42 % (с 74 до 32 %) при синхронном росте параметр W_C от 26 до 68 %.

Графики снижения несущей способности материала конструкции, показанные на Рис. 18, б – г пунктирной линией, и построенные с использованием алгоритма (13), свидетельствуют о том, что в ходе ресурсных испытаний кессона крыла падение показателя B_W в области ударного воздействия составило: в зоне I – 19 %, в зоне II – 41 %, а в зоне III – 73 %.

Как следует из результатов исследования, потоковые параметры парциальной активности и весового содержания локационных импульсов в энергетических кластерах могут эффективно использоваться для мониторинга кинетики повреждений и оценки несущей способности на разных стадиях испытаний.

Наглядной иллюстрацией таких возможностей параметров N_i и W_i является АЭ диагностика стальных кронштейнов вала подъёмного механизма, выполненная в ходе циклического нагружения уже после проведения ресурсных испытаний

изделия. Исследовались стальные кронштейны опорного вала гидропривода подъемного механизма, в которых после выработки ресурса возникали усталостные трещины. С целью определения возможности продления ресурса подъемного механизма выполнялась АЭ диагностика в ходе циклического нагружения, когда в материале кронштейнов опорного вала возникали и развивались усталостные трещины. Испытания проводились путем набора и сброса давления в гидросистеме привода с частотой 0,5 Гц (Рис. 19). Рассмотрена АЭ диагностика левого кронштейна опорного вала, в котором процесс зарождения и развития усталостных трещин происходил более интенсивно и после 2316 циклов нагружения произошло его разрушение.

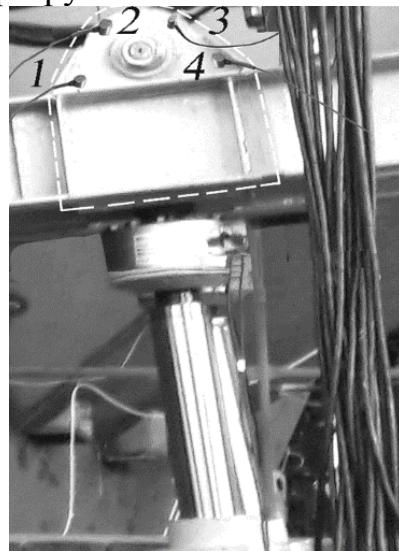


Рис. 19. Вид слева кронштейна опорного вала подъемного механизма; - - - – область АЭ контроля левого кронштейна опорного вала подъемного механизма; 1, ..., 4 – места установки ПАЭ

На Рис. 20 представлены результаты АЭ диагностики левого кронштейна вала подъемного механизма, полученные в ходе его усталостных испытаний.

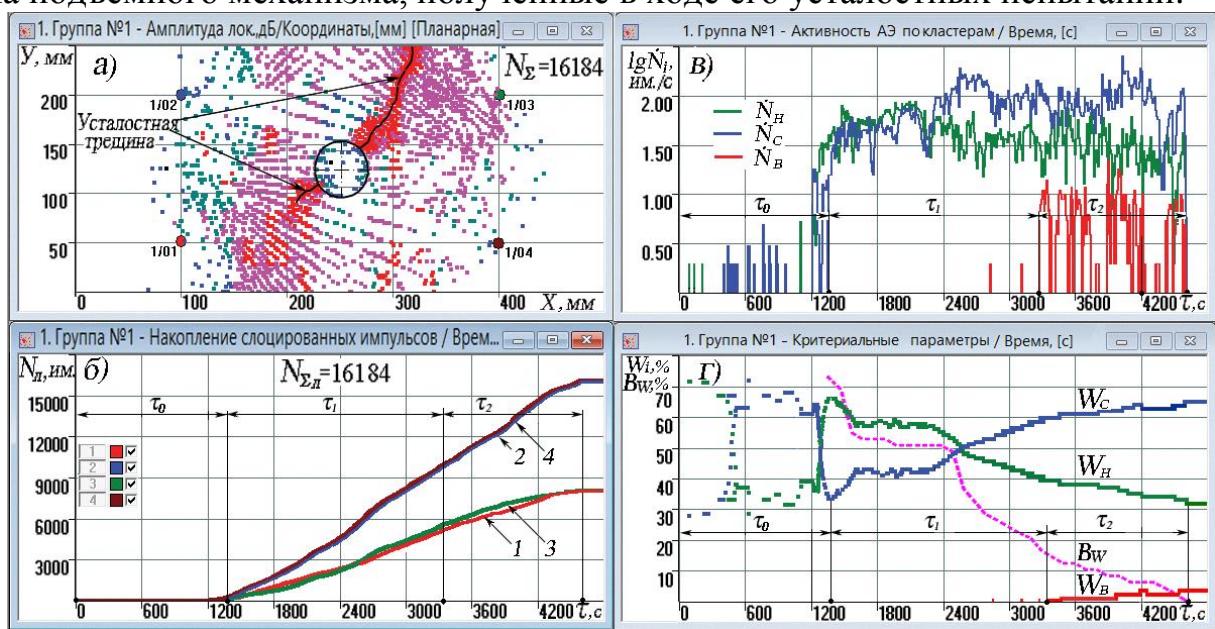


Рис. 20. Результаты АЭ диагностики, отражающие процесс накопления повреждений и разрушения стального кронштейна при усталостных испытаниях

Наиболее интенсивное накопление локационных импульсов каналами АЭ системы регистрировалось в области *I* и *III* квадрантов посадочного гнезда подшипника под углом 45-60° относительно координатных осей, где их максимальная плотность превышала 50 ед./см². Развитие усталостных трещин, отмеченных ломанными линиями на Рис. 20, *a*, происходило от кромки посадочного гнезда в тело кронштейна. Всего было зарегистрировано $N_{\Sigma}=16184$ индикаций источников АЭ. Как следует из Рис. 20, *б* – Рис. 20, *г*, процесс подрастания усталостной трещины можно разделить на три характерные стадии: $\tau_0=0$ -1400 с – латентный период развития усталостной трещины, $\tau_1=1350$ -3260 с – период устойчивого роста, $\tau_2=3260$ -4632 с – период ускоренного роста.

На Рис. 20, *б* отображена динамика накопления каналами АЭ системы локационных импульсов. В период τ_0 до 1350 с мониторинга накопление локационных импульсов было нерегулярным. Начиная с 1350 секунды – точка бифуркации, процесс развития усталостной трещины переходит на стадию устойчивого роста, что сопровождается возрастанием накопления источников АЭ. Графики на Рис. 20, *в* и *г* отражают динамику парциальной активности \dot{N}_i и весового содержания W_i локационных импульсов в *H*, *C*, *B* кластерах. На стадии τ_1 происходит резкий рост активности локационных импульсов в *H*, *C* кластерах и характерное изменение их потоковых параметров W_H и W_C . Стадия τ_2 характеризуется пиковым ростом активности высокоэнергетических импульсов, уровень которых повышается до $\dot{N}_B=10$ -30 им./с. В момент разрушения кронштейна пороговые значения потоковых параметров W_i локационных импульсов в энергетических кластерах составляли: $[W_H]=31\%$, $[W_C]=65\%$ и $[W_B]=4\%$.

Пунктирной линией на Рис. 20, *г* показан график падения показателя несущей способности стального кронштейна, уровень которого снижался с $B_W=73\%$ в точке бифуркации, регистрируемой на 1350 с, до нуля в момент его разрушения.

Апробация разработанной методологии совместного применения методов ХТП и АЭ для диагностики полей и концентраторов напряжений на стадии упругого деформирования материала выполнялась при испытаниях на разрыв авиационной панели со стрингерами (Рис. 21). Для выявления подповерхностного концентратора – надреза центрального стрингера (Рис. 21, *а*) использовалось оксидное тензопокрытие с величиной пороговой деформации $\varepsilon_0=600$ мкм/м. При повышении нагрузки от 70 до 100 кН, составляющей примерно 8-11 % от предельной, в тензопокрытии в зоне надреза центрального стрингера произошло образование первых трещин, зарегистрированных АЭ диагностикой (Рис. 21, *в*), и синхронно верифицируемых видеосъёмкой (Рис. 20, *б*).

Как видно из Рис. 21, *г*, в процессе нагружения панели локационные импульсы в поле дескрипторов $u_m/N_i-N_i/\tau_i$ сформировались два характерных кластера: *A* и *B*, генерируемые трением панели в зазорах болтовых соединений оправки и образованием трещин в хрупком слое тензопокрытия. Таким образом, АЭ диагностика позволила на ранней стадии нагружения авиационной панели достоверно контролировать процесс образования трещин в ХТП определяя координаты, время их возникновения и текущий уровень деформаций на поверхности конструкции в зоне трещинообразования тензопокрытия.

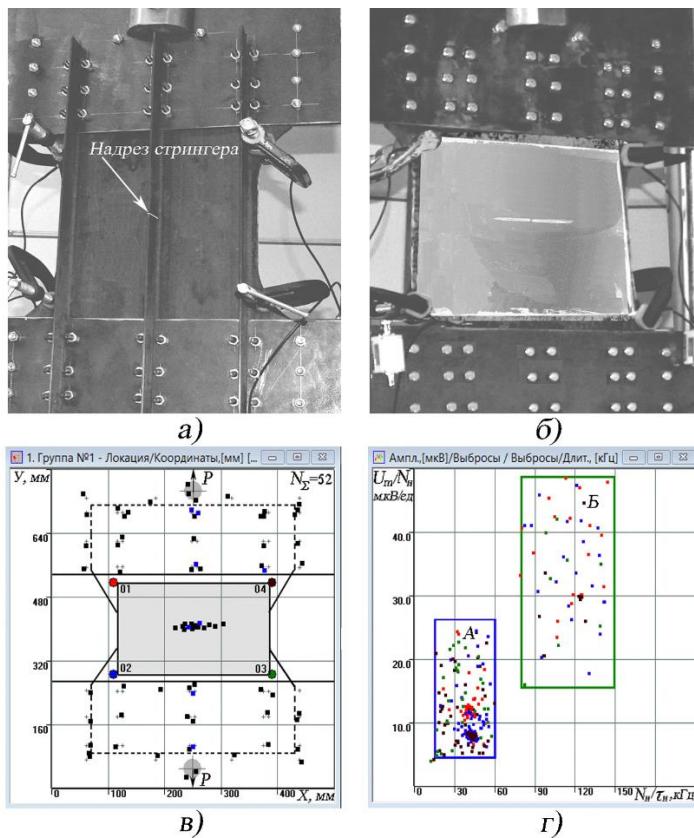


Рис. 21. Выявление надреза стрингера (а) на ранней стадии нагружения панели с использованием оксидного тензопокрытия, регистрация трещин в котором выполнялась с применением видеосъёмки (б) синхронно с АЭ диагностикой (в, г)

Проведенные эксперименты наглядно показали эффективность совместного применения методов ХТП и АЭ для ранней диагностики зон концентраторов напряжений, в том числе подповерхностных и структурных дефектов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методология ранней диагностики полей и концентраторов напряжений на стадии упругого деформирования материала в режиме нагружения конструкции, реализуемая при совместном использовании методов хрупких покрытий и акустической эмиссии, применяемой для дистанционной локации зон образования трещин в ХТП, в том числе в труднодоступных для наблюдения участках поверхности конструкций (Патенты РФ № 2403564 и № 2704575).

2. Разработаны критерии и технологии получения высокочувствительных тензопокрытий с расширенным диапазоном измеряемых деформаций от 200 до 20000 $\mu\text{мм}/\text{м}$ и рабочих сред, методика их применения с расширенным спектром характеристик тензочувствительности, позволяющая определять распределение главных напряжений (деформаций) в зонах трещинообразования ХТП с погрешностью, не превышающей 20 % (Патент РФ № 2058016).

3. Разработана структурно-феноменологическая концепция и модель эволюции разрушения твердого тела с целью мониторинга кинетики микро-, мезо- и

макроповреждений в структуре конструкционного материала для определения фактического состояния его несущей способности в режиме нагружения изделий (Патенты РФ № 2649081 и № 2704575).

4. Разработана методика применения АЭ диагностики для мониторинга эволюции разрушения твердого тела, использующая потоковые параметры парциальной активности и весового содержания локационных импульсов в кластерах нижнего, среднего и верхнего энергетического уровня, отражающие кинетику микро-, мезо- и макроповреждений в зонах накопления источников АЭ, по текущим значениям которых определяют фактический уровень несущей способности, сопоставляя их с пороговыми, регистрируемыми при разрушении конструкционного материала (Патенты РФ № 2690200 и № 2787964).

5. Разработана комбинационно-параметрическая концепция кластерной селекции импульсов АЭ, позволяющая разделять их на характерные кластеры, что даёт возможность в режиме реального времени отфильтровывать сигналы помех от импульсов разрушения структуры материала и образования трещин в ХТП (Патент РФ № 2569078).

6. С применением ХТП новых составов и разработанной методики с расширенным спектром характеристик тензочувствительности исследованы ответственные элементы конструкций:

- тройник магистрального нефтепровода, нагружаемый при испытаниях на стенде ООО «Диаскан» внутренним давлением и изгибающим усилием, в сварном шве которого выявлены локальные концентраторы напряжений (дефекты сварки), являющиеся потенциальными зонами его разрушения;

- резинометаллический шарнир сопла твердотопливного двигателя при нагружении внутренним давлением и боковой нагрузкой на стенде АО «Корпорация МИТ», по результатам которого определены предельные нагрузки.

7. С применением разработанной методики и ПО мониторинга накопления повреждений и оценки текущего уровня несущей способности изделий проведены исследования ответственных элементов машиностроительных конструкций:

- панелей МС-21 и Т-50 от действия растягивающих и сжимающих нагрузок при статических и циклических испытаниях на стендах ФАУ «ЦАГИ» и АО «ЦНИИмаш»;

- сетчатой конструкции панели крыла до и после ударного воздействия при ступенчатом повышении сжимающей нагрузки на стенде ФАУ «ЦАГИ»;

- опорной стойки МС-21 в условиях усталостных испытаний при симметричном цикле нагружения с целью мониторинга процесса отслаивания стрингеров от полок стойки на стенде ФАУ «ЦАГИ»;

- консолей крыла и стабилизатора МС-21 на стендах ФАУ «ЦАГИ» при проведении ресурсных испытаний на режимах полётных нагрузок;

- подъёмного механизма спецназначения в условиях циклического нагружения на стенде АО «ЦНИИмаш» после проведения ресурсных испытаний.

8. Результаты исследований внедрены в производственный цикл НИО-18 ФАУ «ЦАГИ», а также в комплекс работ, выполняемых в АО «НИИН МНПО «СПЕКТР» и ООО «Интерюнис-ИТ».

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ushakov B.N., Vasil'ev I.E. and Salin A.N. Analysis of stresses in complex natural structures using the method of brittle coatings // J. Mach. Manuf. Reliab. 2004. N. 1. P. 96-104. (0,75 п.л. / 0,5 п.л.).
2. Makhutov N. A., Ushakov B. N., Vasil'ev I. E. Strength Assessment and Defect Detection in Welded Pipeline Seams by Means of Brittle Tensosensitive Coatings // J. Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31, N. 2. P. 123-127. (0,42 п.л. / 0,2 п.л.).
3. Automation of Crack Recording in Brittle Strain-Sensitive Coatings / I.E. Vasil'ev [et al.] // Inorganic Materials. 2011. Vol. 47, N. 15. P. 89-94. (0,5 п.л./0,25 п.л.).
4. Integrated diagnostics of limit states and early warning of emergency conditions of structures / I.E. Vasil'ev [et al.] // J. Mach. Manuf. Reliab. 2013. Vol. 42, N. 2. P. 109-113. (0,42 п.л. / 0,25 п.л.).
5. The acoustic-emission properties of oxide tensosensitive indicators and signal recognition during the formation of cracks in a brittle coating layer / I.E. Vasil'ev [et al.] // Russ. J. Nondestr. Test. 2015. Vol. 51, N. 1. P. 39-49. (0,92 п.л. / 0,75 п.л.).
6. Acoustic-emission evaluation of the process of destruction of a composite material under tensile, compression, and cyclic loads / I.E. Vasil'ev [et al.] // Russ. J. Nondestr. Test. 2016. Vol. 52, N. 8. P. 443-456. (1,25 п.л. / 1,0 п.л.).
7. Early diagnostics of damage and fracture zones in composite materials using brittle strain gauges and acoustic emission / I.E. Vasil'ev [et al.] // Inorganic Materials. 2017. Vol. 53, N. 15. P. 1484-1495. (1,0 п.л. / 0,75 п.л.).
8. Criterion parameters for assessing degradation of composite materials by acoustic emission testing / I.E. Vasil'ev [et al.] // Russ. J. Nondestr. Test. 2018. Vol. 53, N. 12. P. 811-819. (0,75 п.л. / 0,5 п.л.).
9. Acoustic-emission monitoring of airframe failure under cyclic loading / I.E. Vasil'ev [et al.] // Russ. J. Nondestr. Test. 2019. Vol. 55, N. 8. P. 570-580. (0,92 п.л. / 0,75 п.л.).
10. Influence of dimensions and shape of process cutouts on the accuracy of locating acoustic emission sources / I.E. Vasil'ev [et al.] // Russ. J. Nondestr. Test. 2020. Vol. 56, N. 2. P. 101-109. (0,83 п.л. / 0,5 п.л.).
11. Matvienko, Yu.G., Vasil'ev, I. E., Chernov, D. V. Study of the fracture kinetics of a unidirectional laminate using acoustic emission and video recording // Inorganic Materials. 2020. Vol. 56, N. 15. P. 84-98. (1,25 п.л. / 1,0 п.л.).
12. Monitoring composite fiber failure using acoustic emission system, vibration analyzer, and high-speed video recording / I.E. Vasil'ev [et al.] // Russ. J. Nondestr. Test. 2020. Vol. 56, N. 12, P. 960-970. (0,92 п.л. / 0,75 п.л.).
13. Matvienko, Yu.G., Vasil'ev, I.E., Chernov, D.V. Damage and failure of unidirectional laminate by acoustic emission combined with video recording /Acta Mechanica. 2021. Vol. 232, P. 1889-1900. (1,0 п.л. / 0,5 п.л.).
14. Development of an Empirical Model for Damage Degree Assessment in Steel Specimens Based on the Results of Statistical Processing of Acoustic Emission Signal Flow / I.E. Vasil'ev [et al.] // Russ. J. Nondestr. Test. 2023. Vol. 59, N. 9. P. 937-944. (0,75 п.л. / 0,35 п.л.).

15. Problems of Locating Acoustic Emission Sources / I.E. Vasil'ev [et al.] // Russ. J. Nondestr. Test. 2021. Vol. 57, N. 9. P. 769-778. (0,75 п.л. / 0,5 п.л.).
16. Kinetics of damage accumulation and failure in the zones of stress raisers in sample rupture tests / I.E. Vasil'ev [et al.] // Russ. J. Nondestr. Test. 2021. Vol. 57, N. 1. P. 31-42. (1,25 п.л. / 0,8 п.л.).
17. Increasing Probability of Detecting Acoustic Emission Sources Using Artificial Neural Networks / I.E. Vasil'ev [et al.] // Russ. J. Nondestr. Test. 2022. Vol. 58, N. 5. P. 333-341. (0,75 п.л. / 0,4 п.л.).
18. Matvienko, Yu.G., Vasil'ev, I.E., Chernov, D.V. Using acoustic emission and video recording for monitoring the kinetics of damage under compression of composite samples // Inorganic Materials. 2022. Vol. 58, N. 15. P.1538-1547. (0,92 п.л. / 0,75 п.л.).
19. Estimation of Acoustic Source Positioning Error Determined by One-Dimensional Linear Location Technique / I.E. Vasil'ev [et al.] // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, N. 1. P. 224-237. (1,17 п.л. / 0,4 п.л.).
20. Rupture Tests of Reinforcing Fibers and a Unidirectional Laminate Using Acoustic Emissions / I.E. Vasil'ev [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. 2022. Vol. 65, N. 2. P. 305–313. (0,75 п.л. / 0,5 п.л.).
21. Increasing Probability of Detecting Acoustic Emission Sources Using Artificial Neural Networks / I.E. Vasil'ev [et al.] // Russ. J. Nondestr. Test. 2022. Vol. 58, N. 5. P. 333-341. (0,75 п.л. / 0,4 п.л.).
22. Adaptation of methodology for monitoring damage kinetics and assessing load-bearing capacity in relation to steel products / I.E. Vasil'ev [et al.] // Russ. J. Nondestr. Test. 2022. Vol. 58, N. 9. P. 800-813. (1,17 п.л. / 0,85 п.л.).
23. Estimation of acoustic source positioning error determined by one-dimensional linear location technique / I.E. Vasil'ev [et al.] // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, N. 1. P. 224-237. (1,17 п.л. / 0,6 п.л.).
24. Acoustic Emission Diagnostics of Damaged MS-21 Airplane Wingbox during Endurance Tests / I.E. Vasil'ev [et al.] // Russian Engineering Research. 2023. Vol. 43, N. 10, P. 1223–1233 (0,92 п.л. / 0,65 п.л.).
25. Васильев И.Е. Определение полей деформаций и напряжений при криогенных и высоких температурах с помощью хрупких стеклоэмалевых покрытий // Сб. Экспериментальные исследования напряжений в конструкциях / Под. ред. Н.А. Махутова. М.: Наука, 1999. С. 38-53. (1,25 п.л. / 1,25 п.л.).
26. Васильев И.Е., Ушаков Б.Н., Салин А.Н. Анализ напряжений в сложных натуральных конструкциях методом хрупких покрытий / Сб. Развитие методов экспериментальной механики / Под. ред. Н.А. Махутова, Б.Н. Ушакова, М.Н. Гаденина. М.: ИМАШ РАН, 2003. С. 78-90. (1,08 п.л. / 0,5 п.л.).
27. Устройство для диагностики предельного состояния и раннего предупреждения об опасности разрушения материалов и изделий: патент № 2403564 РФ / И.Е. Васильев [и др.]; заявл. 10.01.09; опубл. 10.11.10. Бюлл. № 31. (0,93 п.л. / 0,65 п.л.).
28. Васильев И.Е. Метод хрупких тензочувствительных покрытий // Напряженно-деформированные состояния ЖРД / Под ред. Н.А. Махутова, В.С. Рачука. М.: Наука, 2013. С. 221-338. (15,4 п.л. / 5,2 п.л.).

29. Способ распознавания источников сигналов акустической эмиссии, возникающих при деградации материала, образовании трещин и разрушении конструкции: патент № 2569078 РФ / И.Е. Васильев [и др.]; заявл. 24.06.14; опубл. 20.11.2015. Бюлл. № 32. (0,58 п.л. / 0,4 п.л.).

30. Диагностика сварных швов оборудования магистральных нефтепроводов / И.Е. Васильев [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. № 12. С. 618-630. (1,5 п.л. / 0,5 п.л.).

31. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Диагностика разрушений и повреждений акустико-эмиссионным методом // Приводы и компоненты машин. 2018. № 5. С. 13-18. (0,5 п.л. / 0,3 п.л.).

32. Способ мониторинга степени деградации структуры материала и определения остаточной прочности изделия: патент № 2649081 РФ / И.Е. Васильев [и др.]; заявл. 22.03.17; опубл. 29.03.18. Бюлл. № 10. (0,42 п.л. / 0,3 п.л.).

33. Применение методики ранней диагностики повреждений при исследовании авиационной панели / И.Е. Васильев [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. № 6. С. 53-63. (0,92 п.л. / 0,7 п.л.).

34. Способ акустико-эмиссионного мониторинга степени деградации структуры материала и прогнозирования остаточной прочности изделия: патент № 2690200 РФ / И.Е. Васильев [и др.]; заявл. 22.06.18; опубл. 31.05.19. Бюлл. № 16. (0,5 п.л. / 0,35 п.л.).

35. Мониторинг накопления повреждений в кессоне стабилизатора планера МС-21 с применением акустической эмиссии / И.Е. Васильев [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2020. № 2. С. 118-141. (2,0 п.л. / 1,5 п.л.).

36. Оценка остаточной прочности композитных изделий на основе структурно-феноменологической концепции повреждений и акустико-эмиссионной диагностики / И.Е. Васильев [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. № 1. С. 69-81. (1 п.л. / 0,5 п.л.).

37. Способ мониторинга несущей способности изделия: патент № 2787964 РФ / И.Е. Васильев [и др.]; заявл. 31.01.22; опубл. 13.01.23. Бюлл. № 2. (0,83 п.л. / 0,6 п.л.).

38. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Структурно-феноменологическая концепция и методология её использования для оценки несущей способности конструкций с применением акустико-эмиссионной диагностики // iPolytech Journal. Иркутск. 2023. Т. 27, № 1. С. 42-49. (0,67 п.л. / 0,5 п.л.).

39. Применение акустической эмиссии для оценки потери пластичности стальных изделий после ударного воздействия / И.Е. Васильев [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 11. С. 60-70. (0,92 п.л. / 0,6 п.л.).

40. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В. Кинетика повреждений композитных материалов на различных масштабно-структурных уровнях // Исследование и обоснование прочности и безопасности машин / Под ред. Н.А. Махутова, Ю.Г. Матвиенко, А.Н. Романова. М.: Знание, 2023. С. 90-128. (3,25 п.л. / 2,5 п.л.).