

На правах рукописи

Чернова Валентина Викторовна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ
АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ
НА РАННЕЙ СТАДИИ ИХ РАЗВИТИЯ В ИЗДЕЛИЯХ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной
среды, веществ, материалов и изделий

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель: **Степанова Людмила Николаевна**, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Буйло Сергей Иванович**, доктор физико-математических наук, Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», ведущий научный сотрудник

Панин Сергей Викторович, доктор технических наук, Федеральное государственное учреждение науки «Институт физики прочности и материаловедения» Сибирского отделения Российской академии наук, зам. директора по научной работе, заведующий лабораторией механики полимерных композиционных материалов

Ведущая организация: Учреждение науки «Инженерно – конструкторский центр сопровождения эксплуатации космической техники» (Учреждение науки ИКЦ СЭКТ), г. Санкт-Петербург

Защита состоится «04» апреля 2017 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050 г. Томск, ул. Савиных, дом 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан « » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

К.Т.Н.

Е.А. Васендина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие технологий изготовления композиционных материалов (КМ) привело к их быстрому внедрению в промышленность. С расширением области применения композитов возросла потребность в получении информации о механизмах и особенностях их разрушения. Состояние композиционных конструкций оценивается в процессе регулярных технических осмотров с использованием различных методов неразрушающего контроля (НК), таких как ультразвуковой, акустико-эмиссионный (АЭ), рентгеновский, радиографический, тепловизионный, оптический и ряд других.

Диагностика композиционных конструкций в режиме реального времени, автоматизация процесса измерения, локация дефектов на ранней стадии развития, мониторинг конструкций являются основными достоинствами метода АЭ. Развитие микропроцессорной техники позволило создавать быстродействующие диагностические системы, способные регистрировать и анализировать большие объемы информации в реальном времени, что важно при проведении прочностных испытаний конструкций из КМ. Однако его практическое применение для прочностных испытаний объектов на основе углепластиков ограничивается рядом нерешенных задач, среди которых низкая помехозащищенность метода АЭ, что приводит к погрешностям локации дефектов, влияние анизотропных свойств КМ на прочностные и механические свойства композитов, на форму сигналов АЭ. В связи с этим актуальна разработка методик, позволяющих анализировать структуру сигналов АЭ, осуществлять точную локацию дефектов на ранней стадии их развития и оценку их степени опасности при испытаниях образцов и конструкций, выполненных из КМ, в реальном времени.

Объектом исследования являются образцы и элементы авиационных конструкций, выполненные из углепластика и стеклопластика.

Предметом исследования являются методики АЭ-контроля дефектов композиционных материалов в образцах и элементах авиационных конструкций при прочностных испытаниях.

Цель работы – разработка методики определения дефектов на ранней стадии их развития при акустико-эмиссионном контроле образцов и элементов конструк-

ций из углепластика и стеклопластика в процессе статического, циклического и ударного нагружения.

Задачи исследования:

- 1) проведение экспериментальных исследований образцов и элементов конструкций из углепластика и стеклопластика при статическом, циклическом и ударном нагружении с использованием метода АЭ и тензометрии;
- 2) использование вейвлет-преобразования для оценки влияния разрушения образцов из углепластика T700 на основные информативные параметры и структурные коэффициенты сигналов АЭ;
- 3) разработка методики определения связи основных параметров сигналов АЭ с типом разрушения образцов из углепластика с использованием фрактографии зон локации;
- 4) разработка методики локации дефектов на ранней стадии их развития в образцах и конструкциях из углепластика при циклических испытаниях с использованием двухэтапной кластеризации сигналов АЭ.

Методы исследования. При проведении исследований использовались методы цифровой обработки сигналов АЭ, математического моделирования, вейвлет-преобразования, кластерного анализа и статистических методов обработки информации.

Результаты, полученные при экспериментальных исследованиях образцов из углепластика T700 с использованием разработанных методик АЭ-контроля и тензометрии, подтверждены фрактографией зон разрушения после статических испытаний. Экспериментальные исследования проводились с использованием микропроцессорных АЭ и тензометрических систем, сертифицированных в Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии.

Научная новизна.

1. Обоснована методика расчета структурного коэффициента P_D , определяемого с использованием вейвлет-преобразования, позволившего связывать изменение структуры сигналов АЭ с ранней стадией развития разрушения образцов из углепластика и стеклопластика.

2. Разработана методика исследования неупругих свойств углепластика при циклических испытаниях образцов с использованием метода АЭ и тензометрии.

3. Разработана методика локации дефектов в образцах и элементах конструкций из углепластика с различными типами укладки монослоев при статических, циклических и ударных нагрузках с использованием двухинтервального метода определения времен прихода сигналов АЭ на датчики пьезоантенны.

4. Предложена методика локации дефектов в образцах и конструкциях из углепластика с использованием двухэтапной кластеризации, что позволило сократить время обработки АЭ-информации, полученной при циклических испытаниях.

5. Разработан способ АЭ-контроля конструкций из углепластика, позволяющий определять координаты дефектов в режиме реального времени.

Практическая значимость работы.

По результатам диссертационных исследований разработана и практически реализована методика обработки АЭ-информации, зарегистрированной при испытаниях образцов и элементов авиационных конструкций из углепластика и стеклопластика. Разработанные алгоритмы контроля дефектов используются при прочностных испытаниях авиационных материалов и конструкций из углепластика в ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», а также в курсах лекций по «Автоматизации измерений, контроля и испытаний» и «Приборам неразрушающего контроля» ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Методика определения связи изменения структуры сигналов АЭ с ранней стадией разрушения материала образцов из углепластика и стеклопластика с использованием вейвлет-преобразований.

2. Методика локации дефектов в образцах из углепластика с различными типами укладки монослоев при статических, циклических и ударных нагрузках с использованием метода АЭ и тензометрии в режиме реального времени.

3. Исследование связи процесса разрушения образцов из углепластика при статическом нагружении с основными информативными параметрами сигналов АЭ и фрактографией дефектных зон.

4. Результаты прочностных испытаний образцов и элементов конструкций из углепластика и стеклопластика при статических, циклических и ударных нагрузках.

Апробация работы. Основное содержание диссертационной работы докладывалось на III Всероссийской конференции «Проблемы оптимального проектирования сооружений» (г. Новосибирск, Россия, 2014 г.), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «120 лет железнодорожному образованию в Сибири» (г. Красноярск, Россия, 2014 г.), VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке» (г. Новосибирск, Россия, 2014 г.), VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные вопросы строительства» (г. Новосибирск, Россия, 2015 г.), X Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 16-20 мая 2016 г.), Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (г. Томск, 3 – 8 октября 2016 г.); Юбилейной международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию со дня основания СибНИА (г.Новосибирск, 20 – 21 октября 2016 г.).

Публикации. По результатам исследований были опубликованы в соавторстве 17 статей, в том числе 14 статей в изданиях из списка ВАК, получен патент РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 119 наименований. Содержит 144 страницы текста, 77 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируется цель исследований, перечисляются задачи и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе анализируются различные виды КМ и их основные физико-механические свойства. В связи с активным внедрением КМ во многие отрасли промышленности, разработка и усовершенствование методик НК активно ведется в нашей стране и за рубежом. Среди российских ученых, большой вклад в работы по созданию новых материалов и конструкций на основе композитов и разработке методов НК для их контроля внесли российские ученые Каблов Е.Н., Мурашов В.В.,

Вавилов В.П., Смердов А.А. и другие. Большой вклад в развитие метода АЭ, его использования в экспериментальных и теоретических исследованиях различных материалов и ответственных конструкций внесли работы ученых Патона Б.Е., Недосеки А.Я., Дробота Ю.Б., Иванова В.И., Буйло С.И., Шемякина В.В., Бигуса В.А., Махутова Н.А., Серьезнова А.Н., Степановой Л.Н., Муравьева В.В., Панина С.В., Лексовского А.М. и ряда других. Значительный вклад в развитие данного направления исследований внесли зарубежные ученые Prosser W., Madaras E., Gorman M., Kurokawa Y., Zheng G.T. и другие.

Применение КМ при изготовлении ответственных конструкций машиностроения обуславливает высокие требования к их качеству и надежности. Поэтому важными являются задачи, связанные с обнаружением дефектов на ранней стадии развития в режиме реального времени, определением их координат, типов и оценкой степени опасности. Применение методов НК в процессе исследования КМ зависит от материала, вида изделия, его размеров, типов дефектов, условий контроля. Конструкции, выполненные из композитов, диагностировать сложно, так как необходимо обеспечивать требуемую чувствительность и разрешающую способность методов НК, устанавливать наличие разрушений на ранней стадии развития для своевременного принятия мер по предотвращению их вывода из строя.

В настоящее время среди известных методов НК, используемых для непрерывного контроля за состоянием конструкций из КМ, наиболее эффективным является метод АЭ. Он обладает высокой чувствительностью, что позволяет выявлять дефекты на стадии их зарождения. При этом процесс измерения автоматизирован, а координаты области разрушения определяются в режиме реального времени без вывода ОК из эксплуатации. С использованием метода АЭ оценивается степень опасности дефектов и рассчитывается остаточный ресурс исследуемой конструкции. Однако для применения метода АЭ для контроля КМ необходимо разрабатывать методики, позволяющие осуществлять контроль композиционных конструкций со сложной конфигурацией, а также разрабатывать критерии выбора информативных параметров сигналов АЭ, которые отражали бы разрушение объектов из КМ на стадии зарождения дефектов.

Во второй главе рассмотрены разработанные методики локации дефектов в образцах из углепластиков и стеклопластиков при статических, циклических и ударных нагрузках. Сложности в разработке методических вопросов при контроле конструкций из КМ объясняются тем, что АЭ-сигнал состоит из нескольких основных волновых составляющих, которые определяются динамическими свойствами упругих волн. При этом каждая волновая компонента имеет свою скорость распространения волны и несущую частоту, а, следовательно, обладает разным положением максимума в сигнале. Это значительно осложняет определение времени прихода сигналов АЭ на датчики пьезоантенны, из-за чего плоскостная локация, осуществляемая по разности времен прихода (РВП), затруднена и приводит к разбросу координат дефектов.

Для разработки и усовершенствования методов локации дефектов проводилось статическое нагружение образцов и объектов из КМ с использованием метода АЭ и тензометрии. Были исследованы углепластики КМКУ, *T700*, состоящий из волокна *Toray T700* и связующего *REM* и стеклопластик СППС.

В процессе локации дефектов время прихода сигнала АЭ на датчики пьезоантенны определялось двухинтервальным методом. Двухинтервальный коэффициент $K(t)$ реагирует на резкое изменение структуры сигнала АЭ и определяется как

$$K(t) = \frac{A(t + T_{ок})}{A(t - T_{ок})} - 1 = \frac{A(t + T_{ок}) - A(t - T_{ок})}{A(t - T_{ок})}, \quad (1)$$

где $A(t \pm T_{ок}) = \sum_{i=t/\tau}^{(t \pm T_{ок})/\tau} |U_i|$ – параметр структуры сигнала АЭ во временном «окне» $(t \pm T_{ок})$;

U_i – значения отсчетов оцифрованной формы сигнала АЭ;

$T_{ок}$ – длительность временного «окна», накрывающего сигнал АЭ (рисунок 1,а);

τ – интервал дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) измерительного канала АЭ-системы.

Время t_0 соответствует моменту максимальной скорости перестройки структуры сигнала, то есть моменту его прихода на преобразователь акустической эмиссии (ПАЭ). Времена t_1, t_2 (рисунок 1,а,б) задаются как:

$$t_1 = t - T_{ок}; \quad t_2 = t + T_{ок}.$$

Исследовались образцы, выполненные из обшивки руля высоты самолета *SSJ-100*, представляющие собой трехслойную панель с сотовым заполнителем ПСП-1-2,5-64 и несущими слоями из углепластика на основе монослоя КМКУ. На часть образцов (образец 1) перед испытаниями наносились удары, на другие (образец 2) – удары не наносились и они выдержали нагрузку до $P = 37$ кН.

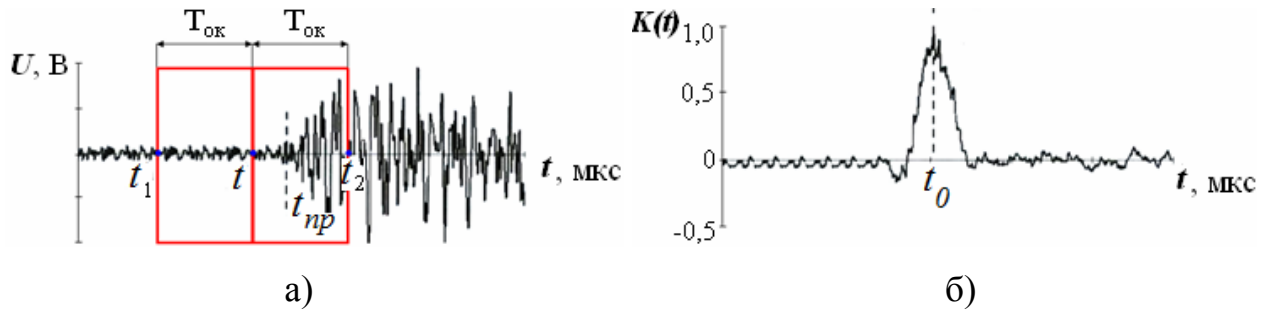


Рисунок 1 – Осциллограмма сигнала АЭ (а) и соответствующее ей изменение двухинтервального коэффициента $K(t)$ (б)

Началу разрушения образца 1 с ударным воздействием соответствовал экспоненциальный рост активности сигналов АЭ от $\dot{N}_z = 1$ сигн./с до $\dot{N}_z = 9$ сигн./с при нагрузке более $P = 13$ кН (рисунок 2). Первые сигналы от отверстия образца 2 без ударного воздействия были локализованы при нагрузке $P = 12$ кН, их активность не превышала 1 сигн./с при нагрузке, изменяющейся в пределах $P = (12...27)$ кН. Наблюдался более пологий экспоненциальный рост активности сигналов АЭ, начиная с нагрузки $P = 27$ кН.

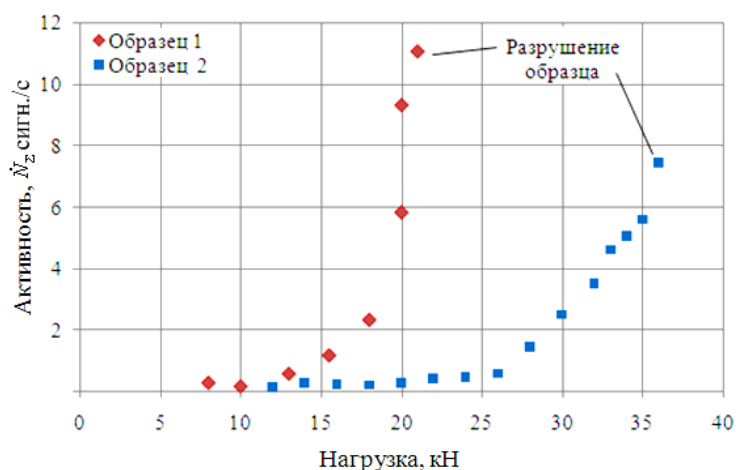


Рисунок 2 – Зависимость активности $\dot{N}_z$ от нагрузки для сигналов АЭ, локализованных в области концентратора напряжений для образцов 1 и 2

Исследовались образцы из углепластика, в которых использовалось различное число монослоев, выполненных на основе волокна *Toray T700* и связующего

REM, с концентратором напряжений в виде отверстия диаметром $d = 14$ мм. Нагружение выполнялось на электрогидравлической машине *MTS-50*. Локация сигналов АЭ осуществлялась в процессе нагружения (рисунок 3, а, б), что позволило наблюдать зарождение и развитие усталостной трещины в образцах до их полного разрушения (рисунок 3, в).

Для анализа структуры АЭ-сигналов сложной формы применяли вейвлет-преобразования (ВП). С его использованием осуществлялся частотно-временной анализ, который представляет собой разложение исходного сигнала по базису системы функций $\varphi_{j,n}(x)$, $\psi_{j,n}(x)$, порожденному материнским вейвлетом $\psi(x)$.

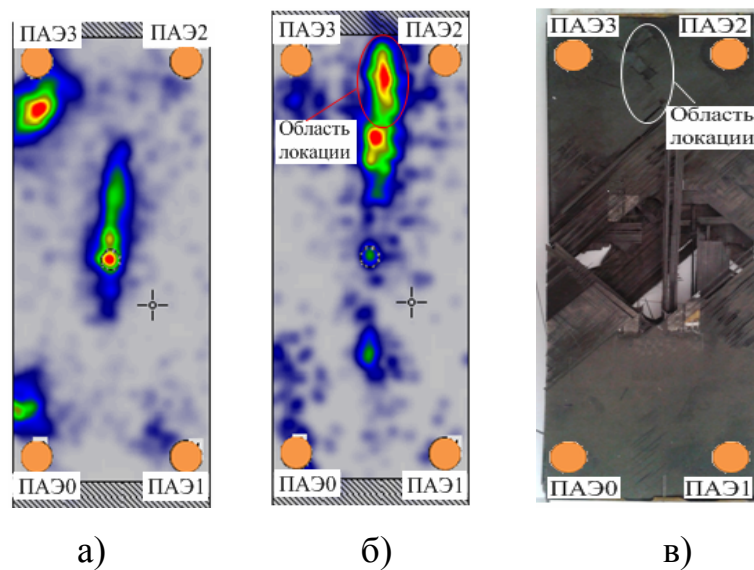


Рисунок 3 – Локация сигналов АЭ при нагрузке $P=160$ кН (а); при разрушении образца (б); вид разрушенного образца (в)

Для анализа изменения частотно-временной структуры сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении образцов из КМ и оценки их модового состава, был введен структурный коэффициент вида:

$$P_{D_{32}}(f) = \frac{\max(D_3)}{\max(D_2)}, \quad (2)$$

где D_2 и D_3 – наборы коэффициентов вейвлет-разложения второго и третьего уровней детализации, полученные при частоте дискретизации исходного сигнала, равной $f=2$ МГц.

Исследования показали, что энергия сигналов АЭ, в основном, была сконцентрирована в полосе частот, соответствующей третьему уровню (D_3) детализации коэффициентов вейвлет-разложения. Полосе частот (250...500) кГц второго уровня де-

тализации D_2 соответствовала фоновая составляющая сигнала. Первый уровень вейвлет-детализации D_1 относится к высокочастотной области, которой не было в спектре сигналов АЭ. Для графического представления преобразования построены вейвлет-скалограммы, которые показывают изменение вейвлет-коэффициентов в частотно-временной плоскости (рисунок 4).

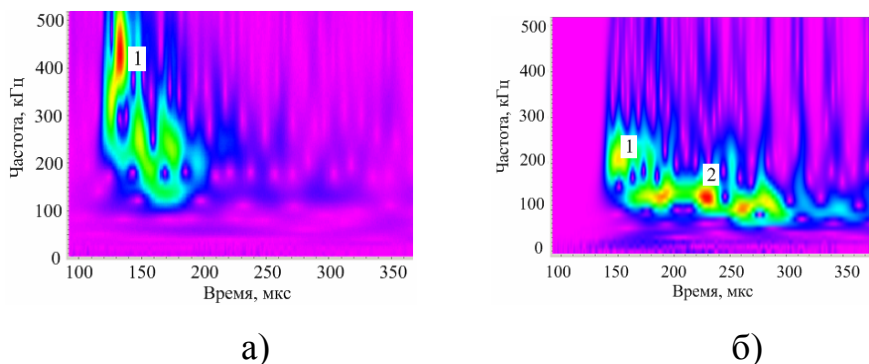


Рисунок 4, а – вейвлет-скалограмма с одним максимумом для сигналов АЭ из области концентратора напряжения; б – вейвлет-скалограмма с двумя максимумами для сигналов АЭ из области ударного воздействия

На рисунке 4,а изображена вейвлет-скалограмма сигнала АЭ, локализованного в начале испытаний вне области разрушения образца. Локальный максимум 1 на рисунке 4,б, соответствующий моменту регистрации сигнала АЭ, не совпадает по времени и по частоте с максимумом 2. При этом максимум вейвлет-коэффициентов находится в области более низких частот по сравнению с вейвлет-скалограммой на рисунке 4,а. Следовательно, сигналы АЭ из области концентратора напряжения, где произошло разрушение, структурно отличаются от сигналов, локализованных вне области разрушения.

Механические свойства углепластиков в значительной мере определяются свойствами армирующих волокон и типом укладки. За счет использования соответствующей схемы армирования, выбора количества монослоев, обеспечивающих необходимые свойства, создаются требуемые прочностные характеристики композитов на основе углепластиков. На рисунке 5 показаны графики зависимости активности сигналов АЭ от нагрузки для образцов 2, 3 и 4 групп.

Образцы группы 2 выдерживали нагрузку, при которой начинался процесс разрушения, в 2 раза большую по сравнению с образцами группы 3 и в 3,5 раза большую по сравнению с образцами группы 4.

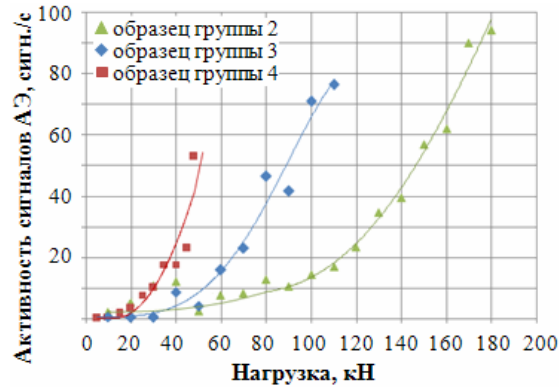
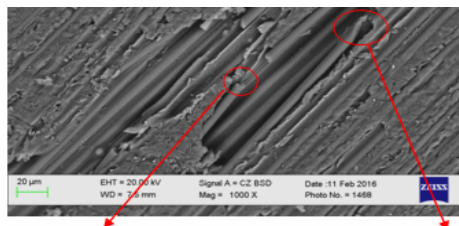
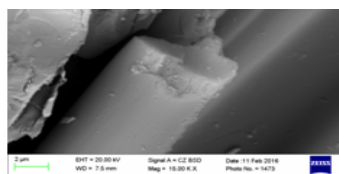


Рисунок 5 – Зависимость активности сигналов АЭ от нагрузки при испытании образцов 2, 3, 4 групп

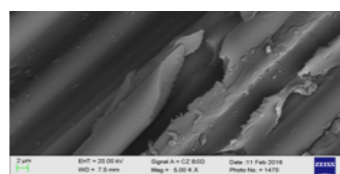
Исследовалась связь сигналов АЭ с процессом разрушения углепластика при статических испытаниях образцов с отверстием диаметром $d=14$ мм в центре. С использованием растрового электронного микроскопа *CarlZeissEVO 50 XVP* выполнен фрактографический анализ зон разрушения образцов после нагружения до нагрузок, составляющих 35 %, 45 % и 65 % от разрушающей (рисунок 6). Зоны выбирались в соответствии с полученной при испытаниях локацией сигналов АЭ.



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Результаты фрактографии в области отверстия образца 1:

а – общий вид; б, в – разрушение волокон

С использованием фрактографии было установлено, что в области кромки отверстия (рисунок 6, а) образца 1 наблюдалось отслоение матрицы от углеродных волокон. Отдельные волокна разрушались хрупко (рисунок 6, б, в) без видимых следов пластической деформации. Максимальная нагрузка для данного образца составляла 35 % от разрушающей.

При анализе изменения структурных коэффициентов P_{D32} сигналов АЭ, локализованных в области отверстия в образцах 1-3, было установлено, что до нагрузки $P = 40$ кН их значения уменьшались (рисунок 7). Это означало, что спектр сигналов АЭ смещался в область высоких частот $f = (250 - 500)$ кГц. По результатам фрактографии в исследуемых областях образцов 1 – 3 были выявлены разрушения волокон и матрицы.

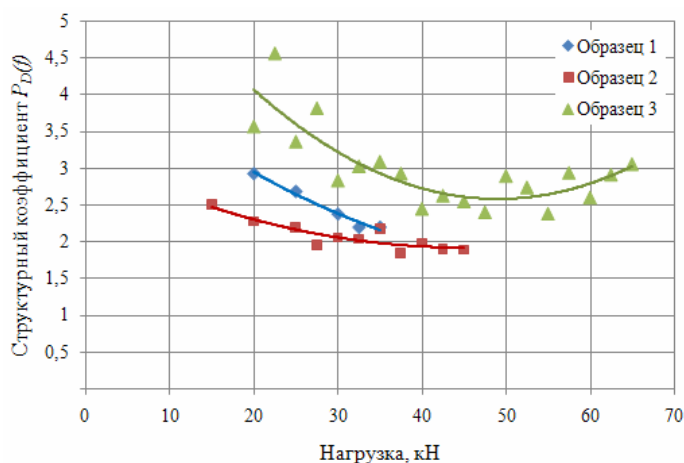


Рисунок 7 – Зависимость структурного коэффициента $P_D(f)$ от нагрузки для сигналов АЭ, локализованных в области отверстия, при испытании образцов 1 - 3

При испытании образца 3 при нагрузках от 40 кН до 65 кН наблюдалось увеличение структурного коэффициента P_{D32} , что соответствовало локации сигналов с частотой $f = (120 - 140)$ кГц. Последующий фрактографический анализ образца 3 показал наличие больших расслоений, которые не наблюдались в образцах 1 и 2.

Для проведения прочностных испытаний образцов из стеклопластика СППС размером 500x75x10 мм в центральной части образцов были выполнены пропилы длиной 20 мм и 25 мм, которые являлись концентраторами напряжений. Локализованные сигналы отражали как процесс разрушения несущих слоев, так и вытягивание стекловолокна по длине.

В третьей главе приводится методика исследования неупругих свойств углепластиков и влияние различных типов укладки на прочностные характеристики образцов.

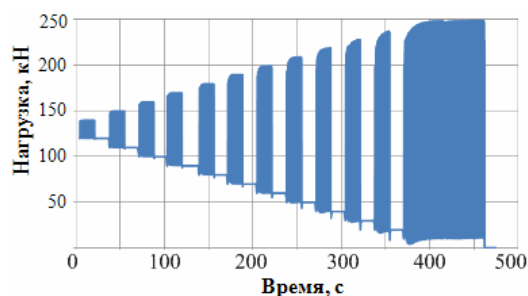
Для исследования неупругих свойств углепластика T700 проведены прочностные испытания образцов размером 100x500x1,6 мм с однонаправленной укладкой восьми монослоев. В процессе испытаний осуществлялась регистрация АЭ- и тензо-

метрической информации и выполнялся визуальный контроль с использованием сетевой видеокамеры *AXIS 213 PAL PTZ*.

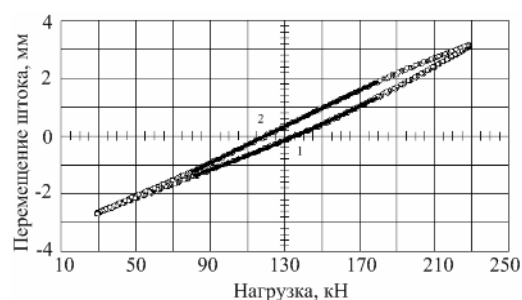
Циклические нагружения образцов вдоль армирующих монослоев проводились на электрогидравлической машине *MTS-50* с регистрацией усилия и перемещения штока силовозбудителя (рисунок 8,а). Образец линейно нагружался статической нагрузкой P_m , а затем – циклической со ступенчатым увеличением амплитуды нагрузки P_a . После установления на каждой ступени заданной нагрузки (рисунок 8,б) определялась величина раскрытия петли пластического гистерезиса dS_h (рисунок 8,в), которая характеризовала изменение неупругих свойств.



а)



б)



в)

Рисунок 8 – Схема установки ПАЭ и тензодатчиков на образце из углепластика (а);
б – изменение нагрузки; в – петля неупругости

При нагружении образца тензодатчики 3, 4, 8, расположенные перпендикулярно волокнам монослоев, с пятой ступени нагружения начинали регистрировать неупругие деформации. При этом наблюдался значительный рост величины раскрытия петли пластического гистерезиса, что указывало на изменение неупругих свойств. По информации с тензодатчиков 1 и 5 был определен момент появления видимого расслоения. До шестой ступени нагружения их показания были одинаковы, далее появились различия, а на седьмой ступени с помощью сетевой видеокамеры *AXIS 213 PAL PTZ* было обнаружено сквозное расслоение в области расположения тензодатчиков 5 и 6.

Для определения изменения структуры сигналов АЭ использовалось вейвлет-преобразование, позволившее определить структурный коэффициент $P_{D32}(f)$, его спектральные характеристики и рассчитать функционал F вида:

$$F[P_{D32}(f), MARSE(f)] = \frac{P_{D32}(f)}{G} + \frac{MARSE(f)}{H} - 1, \quad (3)$$

где $G = \varsigma_{3/4}\{P_{D32}(f)\}$, $H = \varsigma_{1/2}\{MARSE(f)\}$ – верхний квартиль для структурного коэффициента $P_{D32}(f)$ и медиана значений энергетического параметра $MARSE$ сигналов АЭ соответственно;

ς_p – квантиль порядка p скалярной случайной величины ($p=3/4$ и $1/2$);

$MARSE$ – энергетический параметр, определяемый как

$$MARSE = \int_0^t U(t)dt, \quad (4)$$

где $U(t)$ – огибающая акустического сигнала; t – заданный интервал времени.

Установлено, что появлению расслоения соответствовало изменение неупругих свойств материала образцов. При этом методом АЭ определялось начало разрушения, которое характеризовалось сигналами АЭ с высоким значением энергии и функционалом $F = (15 - 20)$.

В четвертой главе даны результаты испытаний элементов авиационных конструкций из углепластика с использованием метода АЭ и тензометрии. Регистрация и обработка информации осуществлялась АЭ-системой СЦАД-16.10 с «плавающими» порогами селекции.

Современные углепластики отвечают требованиям по снижению массы при сохранении высоких прочностных свойств, что позволяет использовать их при создании конструкций ответственного назначения. Со временем под влиянием различных факторов механические свойства композиционной конструкции постепенно ухудшаются и резко снижаются их прочностные характеристики.

Выполнены испытания образцов из углепластика $T700$, укрепленных стрингерами. Для установки образца в нагружающую машину $MTS-50$ к нему болтовыми соединениями были прикреплены металлические пластины. По результатам испытаний образцов получена локация сигналов АЭ (рисунок 9, а), соответствующая на-

блюдаемым разрушениям материала композита и болтового соединения (рисунок 9, б). Использование суммарной амплитуды при обработке АЭ-информации позволило определять наиболее активные области, приводящие при нагружении к разрушению конструкции. При обработке информации с применением структурного коэффициента $P_D(f)$ из формулы (2) и функционала F из формулы (3) определена группа сигналов, соответствующая разрушению исследуемого образца.

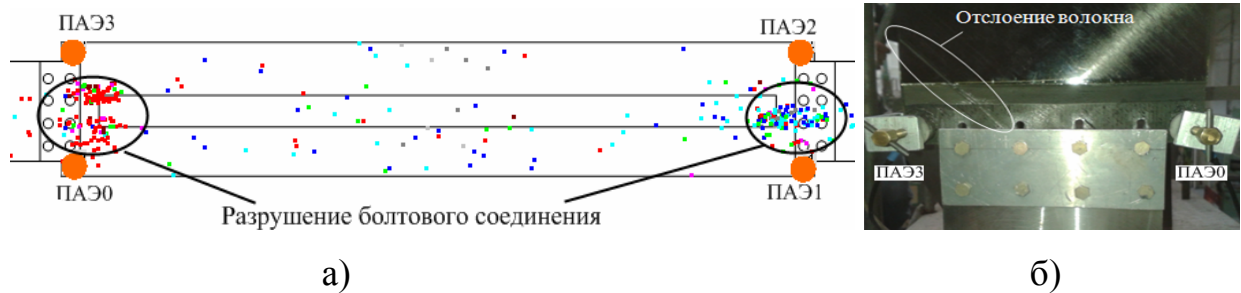


Рисунок 9 – Локация сигналов АЭ (а) и вид разрушенного образца со стрингером (б)

Для отработки методики определения координат дефектов на ранней стадии развития был выполнен мониторинг фрагмента руля высоты самолета *SSJ-100*, изготовленного из трехслойной панели с сотовым заполнителем ПСП-1 и несущими слоями из углепластика на основе монослоя КМКУ. Получена устойчивая локация (рисунок 10) и определено направление распространения усталостной трещины в процессе нагружения фрагмента руля высоты до разрушения.

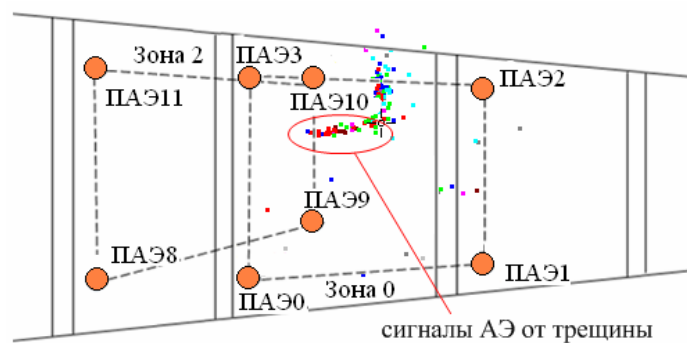


Рисунок 10 – Локация сигналов АЭ из области разрушения верхней поверхности фрагмента руля высоты самолета *SSJ-100* после потери несущей способности

Прочностные испытания различных авиационных лонжеронов, выполненных из углепластика на основе волокна *Toray*, проводились с учетом особенностей их эксплуатации. Для всех проконтролированных конструкций были определены координаты источников сигналов АЭ в режиме реального времени. Визуальный осмотр

лонжеронов после испытаний показал, что локализованные сигналы АЭ соответствуют зонам разрушения.

При обработке АЭ-информации, полученной в процессе нагружения лонжеронов, использовался модифицированный табличный метод расчета координат дефектов, который обладает повышенной устойчивостью к ошибке при оценке времени прихода сигнала АЭ на один из датчиков пьезоантенны. Для зоны контроля, ограниченной четырьмя ПАЭ, вычислялась таблица T соответствия РВП сигналов АЭ координатам ячеек зоны контроля:

$$T = \begin{bmatrix} \bar{t}_{x_1, y_1} & \bar{t}_{x_1, y_2} & \cdots & \bar{t}_{x_1, y_n} \\ \bar{t}_{x_2, y_1} & \bar{t}_{x_2, y_2} & \cdots & \bar{t}_{x_2, y_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{t}_{x_m, y_1} & \bar{t}_{x_m, y_2} & \cdots & \bar{t}_{x_m, y_n} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где n, m – количество столбцов и строк в таблице;

$x_1 \dots x_m$ – координаты x ячеек зоны контроля, соответствующие строкам таблицы;

$y_1 \dots y_n$ – координаты y ячеек, соответствующие столбцам таблицы;

$\bar{t}_{x_k, y_l}$ – элемент таблицы.

При осмотре конструкции после испытаний было выявлено разрушение на верхней полке лонжерона в области крепления подкоса (рисунок 11, а). В области 1 были локализованы сигналы АЭ, соответствующие разрушению верхней полки лонжерона в зоне крепления кронштейна, а в области 2 – разрушению материала вдоль фитинга (рисунок 11, б).

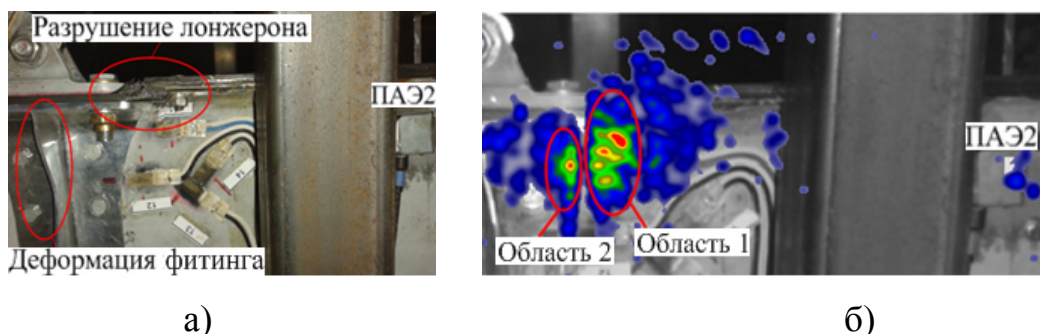


Рисунок 11 – Вид разрушенного лонжерона (а); локация сигналов АЭ табличным методом при его статическом нагружении (б)

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

1. Разработан алгоритм анализа частотно-временной структуры сигналов АЭ, основанный на расчете структурных коэффициентов P_D с использованием вейвлет-преобразования. Выполнены исследования связи изменения информативных параметров сигналов АЭ с процессом разрушения структуры материала образцов из углепластика *T700* на ранней стадии разрушения. Разработана методика определения момента появления неупругих пластических деформаций по изменению энергетического параметра *MARSE* и структурного коэффициента P_{D32} . Для их одновременного учета использовался функционал F . Автоматизация измерений, выполняемых по данной методике, позволяет осуществлять оценку состояния углепластиков в процессе прочностных испытаний без прерывания процесса нагружения.

2. Применена двухэтапная кластеризация сигналов АЭ, зарегистрированных при циклическом нагружении образцов, которая позволила выделять сигналы АЭ, соответствующие разрушению в областях концентратора напряжений и захватов. При этом время выполнения контроля сократилось в 100 раз при уменьшении точности локации не более, чем на 3 % по сравнению с кластерным анализом, выполняемым по оцифрованной форме сигналов. Данная кластеризация может использоваться при работе в бортовом оборудовании самолета.

3. Разработана методика локации дефектов в образцах из углепластиков КМКУ, *T700* и стеклопластика СППС, основанная на применении двухинтервального метода. Она позволила в процессе статических и циклических испытаний получать устойчивую локацию сигналов АЭ, соответствующую появлению и распространению дефектов в образцах и элементах авиационных конструкций.

4. Предложена методика, позволяющая осуществлять мониторинг состояния различных элементов авиационных конструкций в процессе прочностных испытаний с использованием метода АЭ и тензометрии. По результатам АЭ контроля в режиме реального времени локализованы области разрушения композита и крепежных элементов. Разработана модифицированная методика локации дефектов сигналов

АЭ с использованием табличного метода, которая повышает точность АЭ-контроля конструкций из углепластиков.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Чернова, В.В. Акустико-эмиссионный контроль образцов, выполненных из отбракованных боковых рам коробчатого сечения/ Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, К.В. Канифадин, Р.Г. Цвайгерт, В.В. Чернова // Вестник РГУПС. – 2014. – №1. – С. 19 – 25.
2. Чернова, В.В. Исследование основных параметров сигналов акустической эмиссии при статических и циклических испытаниях образцов из стали 20 ГЛ / Л.Н. Степанова, А.Л. Бобров, К.В. Канифадин, В.В. Чернова // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 6. – С. 41 – 46.
3. Чернова, В.В. Исследование процесса разрушения образцов из композиционных материалов методом акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, В.В. Чернова // Известия ВУЗов. Строительство. – 2014. – № 3. – С. 118 – 124.
4. Чернова, В.В. Методика локации сигналов акустической эмиссии при статических испытаниях образцов из углепластика / Л.Н. Степанова, В.В. Чернова, И.С. Рамазанов // Дефектоскопия. – 2015. – № 4. – С.53 – 62.
5. Чернова, В.В. Использование метода конечных элементов, тензометрии и акустической эмиссии для определения механизма разрушения образцов из углепластика при прочностных испытаниях/ Л.Н. Степанова, Н.А. Коваленко, Е.С. Огнянова, В.В. Чернова, Е.А. Дробяз, В.А. Батаев // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 4. – С.29 – 36.
6. Чернова, В.В. Вейвлет-анализ структуры сигналов акустической эмиссии при прочностных испытаниях образцов из углепластика / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, В.В. Чернова // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 7. – С. 54 – 62.
7. Чернова, В.В. Прочностные испытания фрагмента руля высоты самолета SSJ-100 методами акустической эмиссии и тензометрии / Л.Н. Степанова, В.В. Чернова, Е.С. Огнянова, Н.А. Коваленко // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 7. – С. 38 – 46.
8. Чернова, В.В. Прочностные исследования композиционных материалов, ис-

пользуемых на транспорте / Л.Н. Степанова, В.В. Чернова, В.К. Кулешов // Вестник РГУПС. – 2015. – № 3. – С. 13 – 18.

9. Чернова, В.В. Прочностные исследования образцов из углепластика с различной укладкой монослоев / Л.Н. Степанова, Г.Г. Анохин, В.В. Чернова // Дефектоскопия. – 2016. – № 1. – С. 30 – 40.

10. Чернова, В.В. Использование метода акустической эмиссии при циклических испытаниях образцов из углепластика с разными типами укладки монослоев / Л.Н. Степанова, Г.Г. Анохин, В.В. Чернова // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 2. – С. 66 – 74.

11. Чернова, В.В. Исследование неупругих свойств углепластика при циклических испытаниях образцов с использованием методов акустической эмиссии и тензометрии / Л.Н. Степанова, М.Г. Петров, В.В. Чернова, В.Л. Кожемякин, С.А. Катарушкин // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 5. – С. 37 – 41.

12. Чернова, В.В. Совершенствование акустико-эмиссионной локализации дефектов при прочностных испытаниях конструкций из углепластика / Л.Н. Степанова, Г.Г. Анохин, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов, В.В. Чернова // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 6. – С. 66 – 72.

13. Патент РФ № 2599327, МПК G 01 N 29/14. Акустико-эмиссионный способ диагностирования изделий из композиционных материалов на основе углепластика и устройство для его осуществления / Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Рамазанов И.С., Чернова В.В. – Оpubл.10.10.2016, Бюл. № 28.

14. Чернова, В.В. Прочностные испытания элементов авиационных конструкций из углепластика с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии / В.Е. Барсук, Г.Г. Анохин, Л.Н. Степанова, В.В. Чернова // Полет. – 2016. – № 7. – С. 53 – 60.

15. Чернова, В.В. Определение степени опасности дефектов боковой рамы тележки грузового вагона с использованием метода акустической эмиссии / Р.Г. Цвайгерт, Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, В.В. Чернова // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 12. – С.10 – 15.

Статьи в других научных изданиях

16. Чернова, В.В. Исследование образцов из композиционных материалов с ис-

пользованием метода акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, В.В. Чернова // Тезисы докладов III Всероссийской конференции «Проблемы оптимального проектирования сооружений» 15-17 апреля 2014 года Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин). – 2014. – С. 395 – 400.

17. Чернова, В.В. Исследование образцов из углепластика методом акустической эмиссии и тензометрии / Л.Н. Степанова, В.В. Чернова // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «120 лет железнодорожному образованию в Сибири». Красноярск: Изд-во «Касс». – 2014. – С. 125 – 130.

18. Чернова, В.В. Определение связи параметров сигналов акустической эмиссии с процессом разрушения образцов из стеклопластика / Л.Н. Степанова, В.В. Чернова // Вестник СГУПС. – 2016. – № 1. – С. 37 – 43.