

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет путей сообщения»

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

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
профессор Степанова Л.Н.

Новосибирск – 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>1 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ В ОБЪЕКТАХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	9
1.1 Виды композиционных материалов .....	9
1.2 Основные типы дефектов композиционных материалов .....	14
1.3 Методы неразрушающего контроля, используемые при контроле дефектов в композиционных материалах .....	17
1.4 Постановка задачи исследования .....	34
<b>2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА И СТЕКЛОПЛАСТИКА</b> .....	36
2.1 Исследование процесса разрушения образцов из углепластика при статическом нагружении с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии .....	36
2.2 Анализ изменения структуры сигналов акустической эмиссии с использованием вейвлет-преобразований при разрушении образцов из углепластика.....	45
2.3 Кластерный анализ сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных при статическом нагружении образцов из углепластика .....	51
2.4 Разработка методики локации дефектов в образцах из углепластика с различными типами укладки монослоев с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии .....	54
2.5 Исследование процесса разрушения образцов из углепластика при статическом нагружении с использованием метода акустической эмиссии и фрактографии .....	63
2.6 Исследование механизма разрушения образцов из стеклопластика с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии .....	73
Выводы по главе 2 .....	80
<b>3 ПРОЧНОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ</b> .....	83
3.1 Исследование неупругих свойств углепластика при циклических испытаниях образцов с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии .....	83
3.2 Разработка методики оценки влияния различных типов укладки монослоев на прочностные характеристики образцов из углепластика при циклических испытаниях .....	91
Выводы по главе 3 .....	101

<b>4 ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ТЕНЗОМЕТРИИ</b> .....	103
4.1 Испытания образцов из углепластика, укрепленных стрингерами .....	103
4.2 Прочностные испытания фрагмента руля высоты самолета <i>SSJ-100</i> .....	107
4.3 Прочностные испытания лонжеронов из углепластика .....	114
Выводы по главе 4 .....	123
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	125
<b>ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ</b> .....	127
<b>ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА</b> .....	128
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	130
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ</b> .....	140

## ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень качества композиционных материалов (КМ) позволяет использовать их во многих отраслях промышленности, таких как авиация, строительство, железнодорожный и водный транспорт, мостостроение и т.д. Сочетание высокой прочности, жесткости, относительно небольшого удельного веса, устойчивости к воздействию агрессивных сред обуславливает широкое применение композитов при изготовлении ответственных конструкций. Преимуществом КМ является возможность управлять их характеристиками при производстве путем подбора компонентов с требуемыми свойствами и варьирования типа укладки армирующих веществ.

С расширением области использования композитов возросла потребность в получении информации о механизмах и особенностях их разрушения. В процессе эксплуатации композиционных конструкций под действием ударных нагрузок, влияния окружающей среды, влаги и т.д. изменяются их механические свойства и возникают микродефекты, которые могут привести к их внезапному и несанкционированному разрушению. Дефекты в объектах из КМ появляются как в процессе их изготовления, так и при эксплуатации, что вызывает необходимость совершенствования методов и средств неразрушающего контроля (НК). Разрушению композиционной конструкции предшествует накопление повреждений на уровне структуры (волокна, слоя, включения). Их причинами могут быть растрескивания матрицы, разрыв упрочняющих волокон, расслоения, являющиеся следствием ударов, перегрузок, усталости материала, резко снижающих их прочностные характеристики.

Мониторинг и оценка технического состояния конструкций выполняется в процессе регулярных осмотров с использованием различных методов НК, таких как ультразвуковой, акустико-эмиссионный (АЭ), рентгеновский, радиографический, тепловизионный, оптический и ряд других. Однако все КМ обладают анизотропными свойствами, которые оказывают отрицательное влияние на возможность обнаружения дефектов и на точность результатов контроля таких конструкций. При выполнении НК может происходить изменение регистрируемой информации. Кроме того, составляющие (армирующие вещества и матрица) композита обладают различными характеристиками и при нагружении изменение их свойств происходит отлично от однородных материалов. Поэтому методики контроля, разработанные для изотропных металлов, не подходят для анизотропных КМ и требуют внесения изменений в порядок проведения и обработки результатов измерений.

Преимуществами метода АЭ (перед другими методами НК) является возможность проведения диагностики композиционных конструкций в режиме реального времени, способность локализации дефектов на ранней стадии развития, автоматизация процесса измерения, мониторинг

крупных объектов. Развитие микропроцессорной техники позволило создать 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. Метод АЭ обладает низкой помехозащищенностью, что приводит к большим погрешностям локации дефектов. Анизотропные свойства углепластиков оказывают существенное влияние не только на прочность и механические свойства композитов, но и существенно усложняет форму сигнала АЭ, делая ее «размытой» за счет искажения частотно-временной структуры. В процессе испытаний происходит регистрация шумов и помех, а уровень полезных сигналов АЭ снижается из-за множественного переотражения на границах раздела матрица – армирующий компонент. Таким образом, часть необходимой АЭ-информации исключается из анализа, что может приводить к ухудшению результатов контроля.

**Актуальность** исследовательской работы обусловлена необходимостью решения задачи повышения достоверности результатов контроля КМ и конструкций в процессе прочностных испытаний. Это требует разработки методик, позволяющих повысить точность локации дефектов и осуществлять диагностику композиционных конструкций в режиме реального времени.

#### **Степень разработанности темы исследования**

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.

**Объектом исследования** являются образцы и элементы 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 конструкций 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 [69].

#### **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» в 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.), Международная конференция школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых

«Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее» (г. Томск, 3 – 8 октября 2016 г.).

**Публикации.** По результатам исследований были опубликованы в соавторстве 17 статей, в том числе 14 статей в изданиях из списка ВАК, получено положительное решение о выдаче патента РФ.

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

# 1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ В ОБЪЕКТАХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

## 1.1 Виды композиционных материалов

В связи с активным внедрением КМ во многие отрасли промышленности, разработка и усовершенствование методик их НК ведется по всему миру. Изучение и экспериментальные исследования КМ позволили снизить массу конструкций, повысить их прочностные характеристики, внедрять во многие отрасли промышленности [50, 102, 111].

Композиты состоят из двух или более компонентов (армирующих элементов и матрицы), обладающих свойствами, отличными от суммарных свойств компонентов. При этом они должны быть хорошо совместимыми и не растворяться или иным способом не поглощать друг друга [8, 48]. Матрица обеспечивает их монолитность, фиксирует форму изделия и взаимное расположение волокон. Армирующие элементы в виде тонких стеклянных, углеродных, органических и борных волокон, нитей, сеток или тканей обеспечивают физико-механические характеристики материала, в частности, высокую прочность и жесткость. Дискретные элементы могут выполнять пассивную роль и служить наполнителем, либо активную – использоваться как армирующие (упрочняющие) элементы. Инертные наполнители чаще всего используют для заполнения объема. Активные наполнители применяются для модификации механических или функциональных свойств (прочность, окраска, электропроводность и т. п.).

Комбинируя объемное содержание компонентов, можно получать КМ с требуемыми характеристиками прочности, жаропрочности, модуля упругости, абразивной стойкости, а также создавать материалы с необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами. Механическое поведение композита определяется соотношением свойств армирующих элементов и матрицы, а также прочностью связи между ними. Эффективность и работоспособность материала зависят от правильного выбора исходных компонентов и технологии их совмещения, обеспечивающую прочную связь между компонентами при сохранении их первоначальных характеристик.

Среди преимуществ КМ выделяют:

- высокую удельную прочность;
- повышенную жесткость (модуль упругости 130...140 ГПа);
- большую износостойкость;
- высокую усталостную прочность.

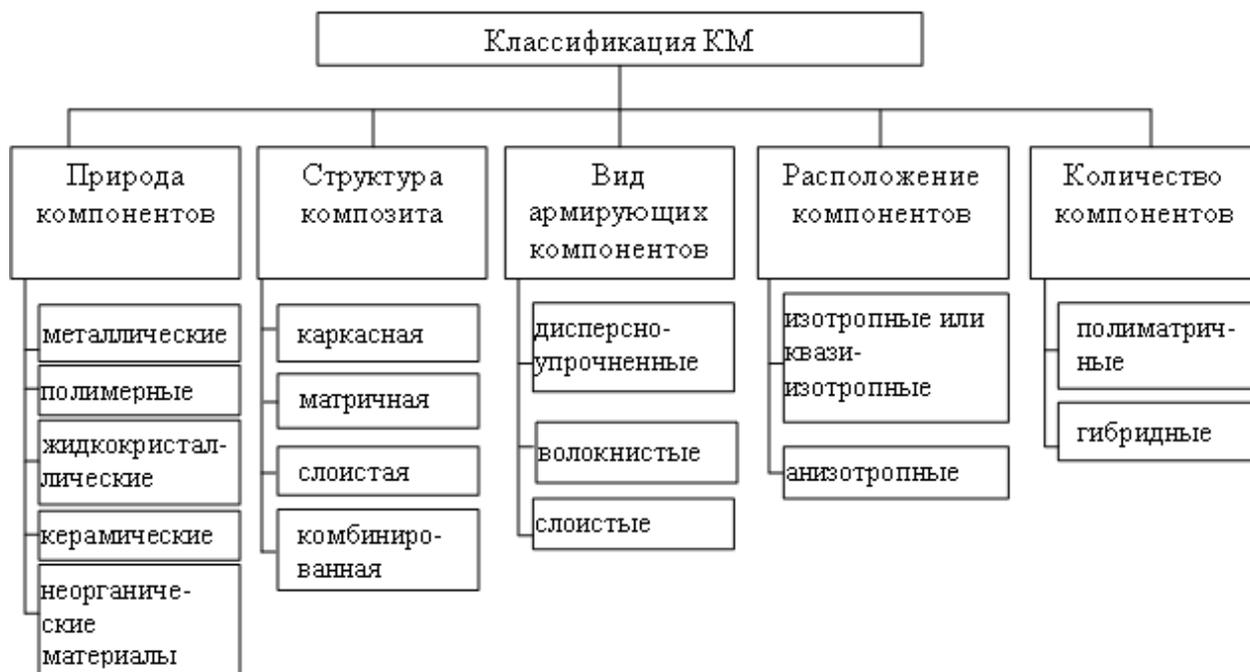
К недостаткам относятся:

- анизотропия свойств;

- повышенная наукоемкость производства, необходимость специального дорогостоящего оборудования и сырья, развитого промышленного производства и научной базы;
- высокая стоимость.

В зависимости от матрицы композиты делят на следующие типы (рисунок 1.1) [8, 48]:

- состоящие из металлической матрицы, упрочненной высокопрочными волокнами (волокнистые материалы) или тонкодисперсными тугоплавкими частицами, не растворяющимися в основном металле (дисперсно-упрочненные материалы);
- с неметаллической матрицей, в качестве которой используют полимерные, углеродные и керамические материалы. Углеродные матрицы получают из синтетических полимеров, подвергнутых пиролизу. Армирующими компонентами служат волокна (стеклянные, углеродные, борные, органические), на основе нитевидных кристаллов (оксидов, карбидов, боридов, нитридов и других), а также металлические (проволоки), обладающие высокой прочностью и жесткостью.



**Рисунок 1.1 — Классификация КМ**

В полимерных композиционных материалах (ПКМ) матрицей служит полимерный материал [67]. Они являются одними из самых многочисленных и разнообразных видов КМ, а их применение в различных областях дает значительный экономический эффект. По сочетанию прочности и модуля упругости армированные ПКМ с однонаправленной ориентацией волокон существенно превосходят все современные металлические конструкционные материалы. Основной особенностью армированных композитов является выраженная анизотропия их механических свойств, определяемая ориентацией волокон в матрице в одном или нескольких направлениях. Выбор ориентации обусловлен распределением напряжений в элементах конструкций.

В качестве наполнителей ПКМ используют различные вещества [48]. К наиболее известным относятся стеклянные и углеродные волокна.

Стеклопластики – это ПКМ, армированные стеклянными волокнами, которые формуют из расплавленного неорганического стекла. В качестве матрицы чаще всего применяют как терморезистивные синтетические смолы (фенольные, эпоксидные, полиэфирные), так и термопластичные полимеры (полиамиды, полиэтилен, полистирол). Эти материалы обладают достаточно высокой прочностью, низкой теплопроводностью, высокими электроизоляционными свойствами, они прозрачны для радиоволн.

При небольшой плотности стеклопластики обладают высокими физико-механическими характеристиками (таблица 1.1). Используя некоторые смолы и определенные виды армирующих материалов, можно получить стеклопластики, по своим удельным прочностным характеристикам превосходящие некоторые сплавы цветных металлов и сталь. Механические свойства стеклопластика определяются преимущественно характеристиками наполнителя и прочностью его связи со связующим материалом [70].

**Таблица 1.1 – Физико-механические свойства различных материалов**

Физико-механические свойства	Стеклопластик	ПВХ	Сталь	Алюминий
Плотность, т/м <sup>3</sup>	1,6-2,0	1,4	7,8	2,7
Разрушающее напряжение при растяжении, МН/м <sup>2</sup>	410-1180	41-48	410-480	80-430
Предел прочности при изгибе, МН/м <sup>2</sup>	690-1240	30-110	400	275
Модуль упругости при растяжении, ГПа	21-41	2,8	210	70
Коэффициент линейного расширения, 10 <sup>-6</sup> °С <sup>-1</sup>	5-14	54-75	11-14	2,2-2,3
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	0,3-0,35	0,3	46	140-190

Неориентированные стекловолокниты содержат в качестве наполнителя короткое волокно. Материал имеет изотропные прочностные характеристики более высокие, чем у пресс-порошков и волокнитов. Ориентированные стекловолокниты имеют наполнитель в виде длинных волокон, располагающихся отдельными прядями. Это обеспечивает более высокую прочность стеклопластика [6].

В углепластиках наполнителем служат углеродные волокна, которые получают из синтетических и природных волокон на основе целлюлозы, сополимеров акрилонитрила, нефтяных и каменноугольных пеков и т.д. В качестве сырья для получения углеродных волокон используют полимерные полиакрилонитрильные или вискозные волокна. Специальная многостадийная термическая обработка полимерных волокон при высоких температурах (2000°С и выше) приводит к их карбонизации и графитизации, в результате чего конечное волокно состоит только из углерода и имеет различную структуру и свойства в зависимости от режима термообработки

и структуры исходного сырья. На основе углеродных волокон делают различные углепластики, свойства которых приведены в таблице 1.2. Самым теплостойким композитом является углерод-углеродный, в котором матрицей служит практически чистый углерод.

**Таблица 1.2 – Свойства углепластиков на основе непрерывных волокон и углерод-углеродных композитов**

Показатель	Углепластики на основе эпоксидного и полиимидного связующих с ориентированными нитями, жгутами, лентами		Углерод-углеродные композиты с нитями, жгутами	
	Однонаправленные*	Перекрестные 1:1*	Однонаправленные**	Перекрестные 1:1*
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,45-1,50	1,4-1,5	1,50-1,55	1,4-1,8
Прочность, МПа				
при растяжении	800-1700	500-900	2500-3000	200-700
при изгибе	1000-2000	800-1200	-	400-700
при сжатии	700-1200	500-800	1200-1600	100-300
Модуль упругости, ГПа	120-150	65-85	150-160	120-160

\*Углеродное волокно прочностью 2800-3200 МПа, модуль упругости 220-250 ГПа.

\*\*Углеродное волокно прочностью 5700 МПа, модуль упругости 330 ГПа.

В соответствии с геометрией армирующих элементов композиты делятся на следующие виды:

– дисперсно-упрочненные – это КМ, в матрицу которых включены армирующие элементы в виде специально вводимых частиц (примесных или дисперсных фаз). Дисперсно-упрочненные полимерные композиты состоят из полимерной матрицы, в которой распределены частицы наполнителя размером от 0,01 до 0,1 мкм.

– волокнистые – это КМ, армированные непрерывными и дискретными волокнами. Волокнистые КМ представляют собой слоистую структуру, в которой каждый слой армирован большим числом параллельных непрерывных волокон. Каждый слой можно армировать также непрерывными волокнами, сотканными в ткань, которая представляет собой исходную форму, по ширине и длине соответствующую конечному материалу. Прочность волокнистых материалов определяется свойствами волокон; матрица, в основном, должна перераспределять напряжения между армирующими элементами, поэтому прочность и модуль упругости волокон должны быть значительно больше, чем прочность и модуль упругости матрицы. Отличительной особенностью волокнистых одноосных КМ являются анизотропия механических свойств вдоль и поперек волокон и малая чувствительность к концентраторам напряжения [9]. Волокнистые ПКМ имеют значительно меньшую плотность и более высокие удельные механические характеристики, менее теплоемки и теплопроводны, чем многие другие виды материалов. Большин-

ство являются диэлектриками, обладают высокой эксплуатационной стойкостью при действии активных сред и других внешних воздействий [98].

- пластинчатые – это КМ, армированные непрерывными и дискретными пластинами.

По степени ориентации наполнителя, анизотропии материала КМ делят на следующие группы [48]:

- композиты с хаотическим расположением частиц и волокон, с изотропной структурой;
- композиты с однонаправленной ориентацией волокон, с резко выраженной анизотропией;
- композиты с перекрестной, ортотропной ориентацией ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ), с заданной анизотропией;
- композиты с косоугольной ориентацией волокон под углами, отличающимися от  $90^\circ$ ;
- композиты с веерной структурой, состоящей из слоев с различной ориентацией волокон.

Прочность при растяжении однонаправленного слоя вдоль волокон может составлять от 1,0 до 2,5 ГПа в зависимости от уровня прочности волокон, типа и содержания связующего. При этом прочность в поперечном направлении не превышает 50-80 МПа, т.е. коэффициент анизотропии равен 20-30 [48].

Небольшое отклонение направления действия нагрузки от направления ориентации волокон практически не сказывается на прочности композита при растяжении. Поэтому допускается некоторая разориентация волокон ( $3-5^\circ$ ), создаваемая специальным раскладчиком или увеличением шага намотки в целях повышения поперечной прочности материала. При сжатии это недопустимо, так как способствует развитию сдвиговых напряжений, определяющих прочность материала при сжатии.

Классификация КМ по эксплуатационному принципу:

- общего конструкционного назначения (несущие конструкции судов, самолетов, автомобилей);
- жаропрочные материалы (лопатки турбин самолетов, камеры сгорания);
- термостойкие материалы (изделия, работающие в условиях частых изменений температурного режима);
- фрикционные материалы (тормозные колодки);
- антифрикционные материалы (подшипники скольжения);
- ударопрочные материалы (броня самолетов, танков);
- теплозащитные материалы;

- материалы со специальными свойствами.

На мировом рынке наблюдается увеличение объемов использования композитов в строительстве, позволившее уменьшить массу строительных конструкций, повысить коррозионную стойкость и стойкость к воздействию неблагоприятных климатических факторов и продлевать межремонтные сроки [17, 113]. Среди изделий из КМ в настоящее время наблюдается рост выпуска арматуры, предназначенной для армирования бетонных строительных конструкций. В качестве наполнителя в арматуре может использоваться стекловолокно, непрерывное базальтовое волокно, а также углеволокна.

## 1.2 Основные типы дефектов композиционных материалов

Различные дефекты в композитах различают по происхождению, местоположению в объекте (поверхностные, изолированные или выходящие на кромку детали), глубине залегания, раскрытию, размерам структурных неоднородностей.

По происхождению все дефекты разделены на два больших класса [19, 57]:

- производственные, появляющиеся в композиционных конструкциях в процессе их изготовления, либо в процессе изготовления составляющих материала компонентов (матрицы и армирующих элементов);

- эксплуатационные, возникающие в процессе эксплуатации конструкций из КМ [19].

В процессе эксплуатации КМ авиационного назначения на них воздействуют климатические факторы (температура, влажность, солнечная радиация), которые при совместном влиянии нагрузок приводят к их климатическому старению [39-41]. Структурные повреждения, возникающие в углепластиках при климатическом старении из-за повышения уровня внутренних напряжений, могут накладываться на остаточные технологические напряжения, образовавшиеся из-за неравномерного отверждения связующего при изготовлении конструкций, а также из-за анизотропии свойств монослоя и анизотропии структуры пакета (схемы и симметрии укладки монослоев в пакете) [16].

При эксплуатации сотовых панелей самолетов, выполненных из несущих слоев из ПКМ и бумажных сот, основными эксплуатационными дефектами являются:

- отслоение сот от обшивки вследствие непрочности и смятия сот, возникающее как из-за технологических причин, так и в процессе эксплуатации;

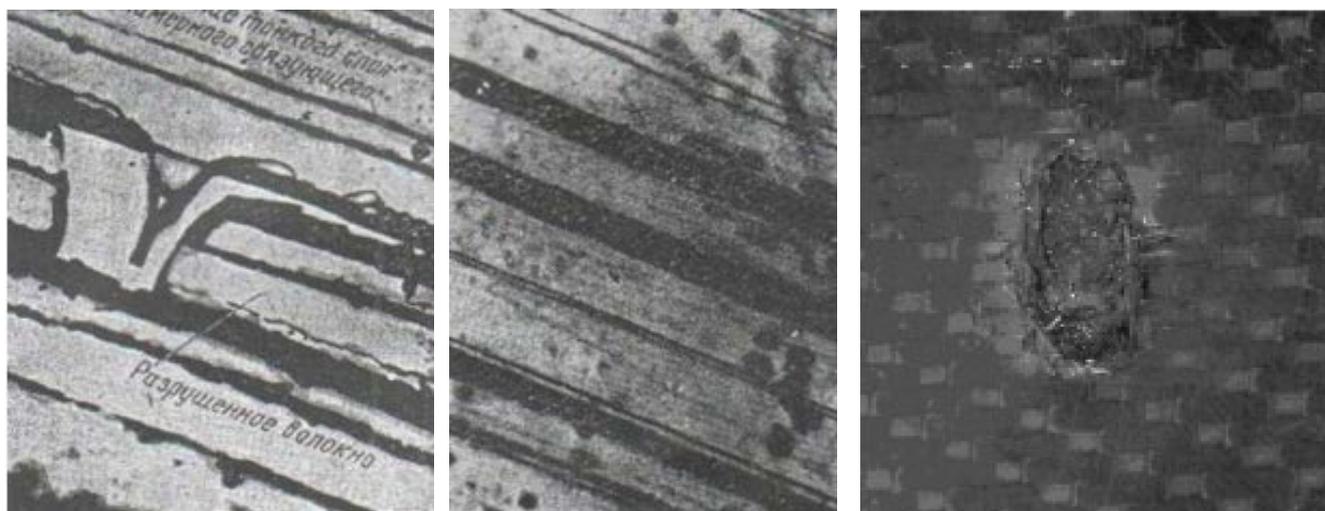
- вода, заполняющая полностью или частично одну или более ячеек, появляющаяся в процессе эксплуатации самолета в результате конденсации и прямого проникновения воды извне через технологические неплотности панелей крыльев, фюзеляжа, киля и других частей самолетов [60].

По размерам дефекты могут быть разделены на три группы [19]:

– микродефекты – дефекты армирующих волокон (микротрещины, микровключения, микропустоты, отклонения от формы, изломы). К ним относятся дефекты матрицы в промежутках между элементарными волокнами (микропоры, микротрещины, микровключения), дефекты на поверхности раздела «волокно – матрица». Размеры микродефектов сравнимы с размерами армирующих элементов или с толщиной связующего (рисунок 1.2, *а, б*);

– к минидефектам относятся искривления, разориентация волокон, крутка, мелкие риски, царапины, вмятины, обрыв отдельных нитей, жгутов или групп элементарных волокон и т.д. Дефекты миниуровня сравнимы с размером толщины элементарного слоя и связаны либо со структурным строением армирующего наполнителя, либо зарождаются в процессе технической переработки составляющих компонентов КМ [19].

Наиболее характерными дефектами данной группы являются поры. Их появление связано с наличием в связующем большого количества растворителя или влаги, с неправильным выбором режимов термообработки (большая скорость нагрева, низкое давление), а также с образованием воздушных пузырьков, возникающих на этапе пропитки материала при мокром методе формования. Поры оказывают влияние на сопротивление сдвиговым нагрузкам слоистых композитов. Также они являются концентраторами напряжений в матрице и при внешнем воздействии на конструкцию или наличии внутренних остаточных напряжений в материале могут быть источниками образования трещин, как в самой матрице, так и вдоль границы раздела «волокно-матрица».



*а)*

*б)*

*в)*

**Рисунок 1.2 – Дефекты в КМ: *а* – трещина в полимерной матрице; *б* – расслоение системы «волокно – полимерная матрица» (черная полоса показывает трещину, распространяющуюся вдоль волокна); *в* – ударное повреждение**

– к макродефектам относятся трещины, пересекающие слои вглубь, раковины, вмятины на поверхности КМ, дефекты ударного характера (рисунок 1.2,в), растрескивания, расслоения, выпучивания, непроклеи, воздушные макровключения [36, 44, 95, 99, 109].

Важнейшим достоинством КМ, содержащих высокопрочные армирующие элементы и вязкую матрицу, является эффективное перераспределение напряжений при разрушении отдельных волокон. Показатели вязкости разрушения композитов в значительной степени определяются направлением развития трещины. Как правило, трещина легко развивается вдоль границ раздела волокон и матрицы. Если же трещина развивается поперек волокон, то возможно достижение высоких значений трещиностойкости. При механических испытаниях под действием растягивающих напряжений многослойный КМ, в зависимости от угла укладки волокон, испытывает не только линейные, но и сдвиговые деформации [3, 51].

Дефекты в КМ классифицируют по степени опасности [57].

Первую группу составляют дефекты, связанные с низкой степенью отверждения полимерной матрицы и отклонения в составе материала по всему объему от нормированных показателей. При неполном отверждении матрицы снижается теплостойкость материала, ухудшается водо- и влагостойкость, снижается сопротивление материала к действию агрессивных сред, а также изменяется характер разрушения материала при статическом и циклическом нагружении.

Вторая группа – это расслоения, влияние которых на свойства материала композита зависят от вида напряженного состояния. В процессе испытаний на растяжение модуль упругости на расслоения практически не влияет. Однако при сжатии материала модуль упругости может существенно снижаться в зависимости от глубины залегания расслоения и его размеров.

К третьей группе относятся трещины, которые создают высокую концентрацию напряжений, нарушают целостность композита, подвергая материал и отдельные его компоненты воздействию окружающей среды и могут привести к расслоению материала.

В четвертую группу включены локальные зоны с повышенным содержанием волокна, матрицы и пор.

К пятой группе отнесены складки, раковины, инородные включения, стыки и нахлесты армирующего наполнителя. Складки и инородные включения приводят к местному искривлению волокон и к изменению состава материала в сечении по дефекту. Стыки и нахлесты оказывают влияние на физико-механические характеристики через изменение состава материала из-за увеличения степени армирования в зоне нахлеста.

Шестую группу составляют сколы, надрезы и отверстия, являющиеся концентраторами напряжения и уменьшающие несущую способность материала.

В седьмую группу входят дефекты, связанные с искривлением волокон в плоскости слоев, с незначительным отклонением угла армирования от заданного значения. Данный вид

дефекта, как правило, затрагивает несколько слоев композита, и их размеры значительно меньше размеров элемента конструкции.

При циклических нагрузках на сопротивление усталости КМ влияет много различных факторов. При этом разрушение является сложным процессом, протекающим неравномерно во времени и неоднородно по объему материала. Развитие продольных трещин, не приводя к катастрофическому разрушению, снижает жесткость детали из КМ [96]. На начальной стадии накопления повреждений микродефекты не взаимодействуют или слабо взаимодействуют друг с другом. Однако с некоторого момента времени их взаимодействие усиливается и начинает оказывать существенное влияние на распределение напряжений в микрообъемах материала [78].

### **1.3 Методы неразрушающего контроля, используемые при контроле дефектов композиционных материалов**

Применение КМ при изготовлении ответственных конструкций предъявляет высокие требования к их качеству и надежности. Анизотропность свойств, связанная с неоднородностью компонентов и многообразными условиями технологического процесса производства, оказывает влияние на механические характеристики и способствует возникновению дефектов. Поэтому в процессе изготовления и эксплуатации таких конструкций необходимо проводить контроль их состояния на микро- и макроскопическом уровнях. Важными задачами являются своевременное обнаружение дефектов, определение их координат, типов и оценка степени опасности.

Конструкции, выполненные из композитов, диагностировать сложно, так как их материал характеризуется существенной неоднородностью структуры, анизотропией свойств, большим разнообразием типов армирования, специфическими физическими свойствами (низкой теплопроводностью и звукоизоляцией, большим разбросом физико-механических характеристик, малыми значениями плотности). При прочностных испытаниях КМ у одних и тех же методов НК отношение сигнал/ шум меньше, чем при испытании однородных структур. Поэтому важно обеспечивать необходимую чувствительность и разрешающую способность методов НК, так как у композитов они ниже, чем у металлов [95].

Основными особенностями механических испытаний КМ с непрерывными волокнами являются [1]:

- использование больших партий образцов, так как на характеристики композитов существенное влияние оказывают состав компонентов, технология изготовления и структура материала;
- оценка их механических показателей в направлениях разных осей анизотропии;

- испытания материала в условиях сжатия и растяжения с измерением продольных и поперечных деформаций для каждой регламентированной ориентации осей анизотропии, поскольку предел прочности при сжатии часто ниже, чем предел прочности при растяжении;
- более чувствительная неоднородность поля деформаций на поверхности образца, определяемая структурой приповерхностных слоев КМ, что вызывает большой статистический разброс измеряемых деформаций;
- повышенная чувствительность образцов к анизотропии прочностных показателей, что приводит к их разрушению не в зоне однородного напряженно-деформированного состояния (НДС), а в зонах сложного НДС, формируемого контактирующими с образцом деталями испытательной оснастки.

Для определения наружных и внутренних дефектов (таблица 1.3) используются различные методы НК, среди которых наиболее распространены ультразвуковой (УЗ), акустико-эмиссионный (АЭ), рентгеновский, радиографический, тепловизионный, оптический. Они позволяют контролировать практически все характеристики КМ (таблица 1.4) [62].

**Таблица 1.3- Виды дефектов КМ и методы их контроля**

Дефекты	Методы НК	Причины
Повышенная или пониженная вязкость	УЗ, СВЧ	Нарушение температурного режима работы среды
Повышенная влажность наполнителя	СВЧ, электрический (Э), Р, ИК	Нарушение влажности среды
Избыточное содержание летучих компонентов	СВЧ, Э, УЗ	Нарушение дозировки связующего
Ухудшение адгезионных и физико-механических свойств	УЗ, СВЧ	Нарушение химического состава связующего
Недоотверждение связующего	УЗ, СВЧ	Погрешность дозировки
Расслоение, трещины	АЭ, ИК, УЗ, СВЧ, Р	Нарушение теплового режима формирования
Нарушение ориентации и соотношения волокон	Поляризационный, УЗ, СВЧ, Р	Ошибки в укладке армирующего материала
Неприклеенные слои, расслоения	АЭ, ИК, УЗ, СВЧ	Неисправности технологического оборудования
Нарушение геометрии, неоднородность свойств, пористость	УЗ, ИК, СВЧ	Неравномерность прикладываемого усилия прессования
Трещины, повышенное содержание влаги	УЗ, СВЧ, Э, Р	Несоблюдение режимов эксплуатации

Для правильной оценки ресурса конструкций из КМ необходимо осуществлять непрерывный контроль за их состоянием. Этот процесс может включать поиск возможных повреждений или измерение механических характеристик материала таких, как деформация, давление, вибрация, температура, коррозия, влажность и т.д.

Таблица 1.4

## Измеряемые при контроле параметры КМ

Метод НК	Параметры контроля	Измеряемые параметры КМ
Акустическая эмиссия	Число, активность акустических импульсов, распределение их по амплитудам и энергиям, спектральная составляющая, локация дефектов, оценка степени их опасности.	Накопление повреждений при пробном нагружении, трещинообразование, разрушение структурных элементов и адгезионных связей
УЗК	Скорость и коэффициент затухания различных типов волн	Модули упругости, размеры, прочность, степень полимеризации, напряженное состояние, морозостойкость, твердость, степень кристаллизации, расслоение, коэффициент армирования, пористость, плотность
Вибрационный (резонансный)	Собственные частоты и степень затухания различных видов колебаний	
Тепловой	Коэффициент теплопроводности и температурной проводимости, тепловая активность, удельная теплопроводность	Плотность, пористость, влажность, коэффициент армирования, расслоение
Импедансный	Механический импеданс	Плотность, модули упругости, геометрические размеры, расслоение, содержание наполнителя, пористость, твердость материалов
Электрический	Электропроводность, диэлектрическая проницаемость, коэффициент потерь	Состав и структура, коэффициент армирования, полимеризация, кристалличность, старение, влагопоглощение, геометрические размеры, плотность, радиопрозрачность
Электромагнитный	Электропроводность, магнитная проницаемость	Плотность, коэффициент армирования, пористость, накопление повреждений
Радиоволновый	Коэффициенты отражения, прохождения, поглощения, преломления, поляризации, преобразования	Геометрические размеры, влажность, нарушение сплошности материалов, амплитуды вибрации
Рентгеновский	Получение рентгенограмм	Внутренние несплошности, плотность, геометрические размеры, параметры кристаллической решетки, ориентация структуры, внутренние напряжения
Оптический	Коэффициенты светового пропускания и отражения	Наружные дефекты, степень повреждения арматуры, коэффициент армирования, накопление усталостных трещин

Внешние параметры эксплуатации (условия нагружения, условия влияния внешней среды) на этапе проектирования изделия не всегда хорошо известны. Возможность контроля состояния конструкции в процессе эксплуатации с регистрацией истории нагружения, деформаций и температур позволяет получать информацию не только о проектных условиях, но и данные, необходимые для внесения изменений в существующие стандарты и правила [106, 107, 112, 116].

Новые методы НК позволят устранить чрезмерные допуски при проектировании композиционных конструкций, повысив при этом экономическую эффективность.

Для выявления дефектов, возникающих в процессе изготовления и эксплуатации конструкций из КМ, применяют различные методы технической диагностики и НК, которые можно разделить на локальные и интегральные. К локальным относятся тензометрический и ультразвуковой методы. Они могут дать информацию об НДС конструкции в зоне действия датчиков или зарегистрировать процессы ее разрушения. К интегральным относятся АЭ-метод, тепловой, оптической голографии, фотоупругих и хрупких покрытий. Эти методы позволяют получать интегральную картину НДС в зоне исследования, своевременно обнаруживать зарождение повреждений и их развитие, определять пространственные координаты очагов разрушения, устанавливать их характер и степень опасности [43].

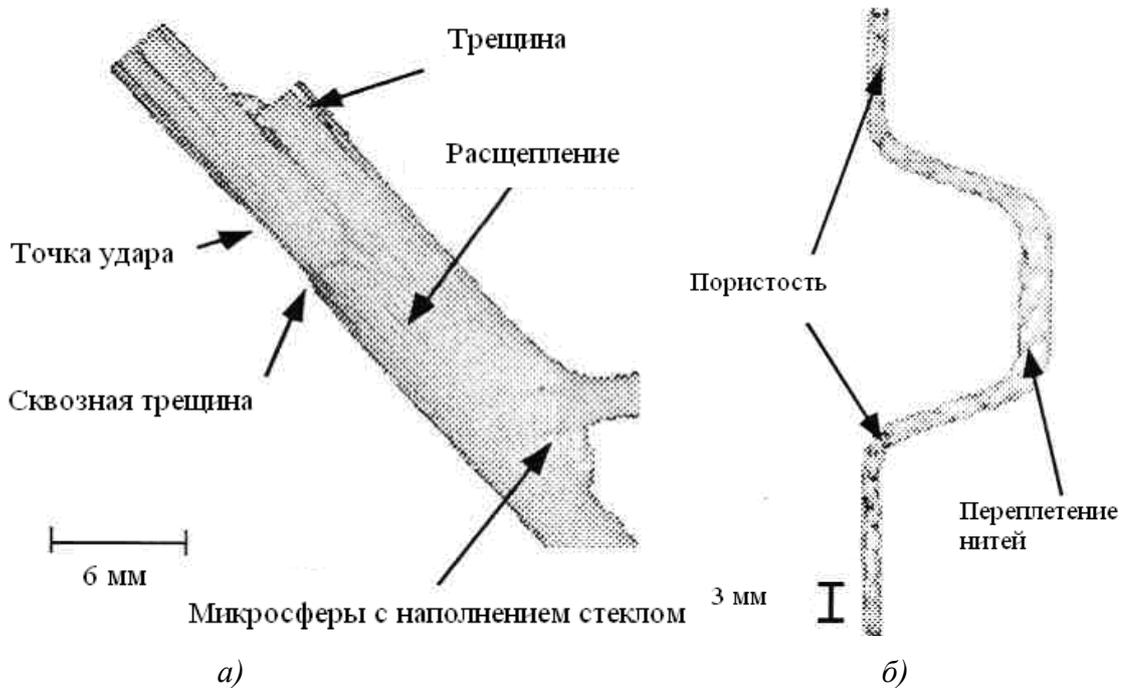
#### Радиационные методы контроля

При использовании радиационных методов НК осуществляется регистрация и анализ проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия его с объектом контроля (ОК). Рентгенографический метод обеспечивает выявление дефектов протяженностью (1...2) % от толщины просвечиваемого объекта. Гаммаграфический метод определяет дефекты протяженностью до (2...4) %. Радиационные методы НК особенно эффективно использовать при определении различных пустот, посторонних включений, для структурных неоднородностей, таких как пропуски, обрывы армирующих элементов [95].

В зависимости от вида применяемого излучения различают:

- рентгенографию (рентгеновский снимок);
- гаммаграфию (гамма-снимок).

Микроструктура КМ влияет на прочность, механические свойства, количество сигналов при НК, от чего зависит точность интерпретации результатов. Для исследования микроструктуры композитов, свойств их составляющих в NASA была разработана микрофокусная рентгеновская СТ-система с разрешением одного приемного элемента в 12,5 микрон [50]. В процессе нагружения образцы сканировались данной системой. По результатам исследований графитно-эпоксидного композиционного компонента, имеющего ударное повреждение, в нем было выявлено наличие трещин и расслоений (рисунок 1.3,а). При контроле элемента композиционного жесткостного укрепления были обнаружены слоистые переплетения нитей и поры (рисунок 1.3,б).



**Рисунок 1.3 – Микрофокусные рентгеновские изображения композитов: а – с ударным повреждением; б – элемент композиционного жесткостного укрепления с пористостью**

Другим радиационным методом НК является метод радиометрии, при использовании которого объект просвечивается коллимированным пучком излучения, преобразуемым детектором в электрический сигнал. Если в исследуемом объекте имеются дефекты, то детектор реагирует на изменение потоков излучения.

К радиационным методам контроля также относится рентгеновская вычислительная томография. Данный метод заключается в сканировании выделенного слоя объекта коллимированным пучком рентгеновского излучения и измерением его интенсивности радиометрическими детекторами в достаточно большом числе точек и ракурсов. После этого вычисляется распределение линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения (плотность объекта) в каждой точке исследуемого сечения.

Среди радиационных методов НК выделяют специальные методы контроля, к которым относятся рентгеновская томоденситометрия и нейтронная радиография. Нейтронная радиография позволяет выявлять дефекты в слоистых пластиках, сотовых конструкциях и клеевых соединениях. Рентгеновская томоденситометрия основана на анализе распределения плотности материала отдельных слоев ОК. Этот метод реализуется с помощью радиометрических многоканальных систем и применяется для определения свойств конструкционных материалов.

При динамической (щелевой) радиографии выполняется просвечивание контролируемого объекта на укрепленную за ним рентгеновскую пленку узким веерным пучком рентгеновского излучения. При контроле изделие с пленкой перемещают относительно источника излу-

чения. Применяют при контроле неразъемных сборочных единиц, таких как многослойные сотовые панели.

Преимущество метода заключается в высокой достоверности результатов. К недостаткам относятся: сложность аппаратуры, необходимость защиты персонала от действия излучений, длительность и высокая стоимость контроля, сложность использования в режиме реального времени.

Для КМ может использоваться капиллярно-радиационный метод, при котором контрастность элементов просвечиваемого объекта повышается введением жидкого рентгеноконтрастного пенетранта. Он наносится на поверхность контролируемого объекта, выдерживается 30 минут и удаляется с поверхности абсорбирующей тканью. В этом случае рентгеновское излучение, проходящее через несплошность, заполненную пенетрантом, достаточно сильно поглощается, что позволяет обнаруживать повреждения, которые невозможно выявить обычным просвечиванием [95].

Преимущество радиационных методов – высокая достоверность результатов. Однако для них характерна необходимость защиты персонала от действия излучений, длительность и высокая стоимость контроля, сложность использования в режиме реального времени. Данные методы НК применяют при контроле неразъемных сборочных единиц, таких как многослойные сотовые панели.

#### Вихретоковый метод

В основе метода лежит анализ взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в ОК. При наличии дефектов картина вихревых токов в материале изменяется, что будет отражаться на выходном сигнале преобразователя. Основным информативным параметром является напряжение, вносимое в измерительную обмотку первичного преобразователя. Данная величина зависит от состава и структуры материала, вида дефектов, частоты переменного электромагнитного поля, возбуждающего вихревые токи, конструкции и параметров датчика. Вихретоковый метод НК обладает чувствительностью к изменению интегральных электропроводящих свойств изделий, обусловленных наличием дефектов. Контроль можно проводить без контакта преобразователя с поверхностью объекта, он отличается высокой производительностью, сигналы преобразователя не чувствительны к параметрам окружающей среды, таким как влажность, давление, загрязненность и др. Применяют для контроля объектов из электропроводящих материалов, поэтому из композитов контролируются только материалы, армированные углеродными волокнами, обладающие хорошей проводимостью [8].

## Инфракрасная термография

Тепловой контроль – один из видов НК, основанный на регистрации и преобразовании инфракрасного (ИК) излучения в видимый спектр. Тепловой метод применяется во всех отраслях промышленности, где по неоднородности теплового поля можно судить о техническом состоянии контролируемых объектов. Он является бесконтактным методом контроля, основанным на регистрации излучения в инфракрасном диапазоне. Существует активная и пассивная ИК-термография.

Пассивная методика основана на естественном излучении тепла с поверхности ОК в процессе его эксплуатации или изготовления. Используют для контроля зданий и технологических процессов. Пассивная методика ИК-термографии позволяет получать качественную оценку и применяется только для обнаружения неоднородностей [13, 14, 22, 60, 61].

В активной ИК-термографии используется внешний источник тепла для нагрева ОК (лампы, лазеры и т.д.). Распределение температур регистрирует ИК-камера. При наличии дефектов на температурных полях наблюдаются неоднородности. Для получения достоверных результатов контроля необходим равномерный нагрев объекта [13, 61].

Наиболее используемым источником стимуляции является оптический нагрев. Применяются ксеноновые импульсные лампы мощностью 1,6 кДж и длительностью светового импульса около 5 мс. При ультразвуковой синхронной и импульсной ИК-термографии стимуляция осуществляется пьезоэлектрическими или магнитными устройствами мощностью до нескольких кВт на частоте 22 кГц. Метод основан на тепловых эффектах, сопровождающих механический гистерезис и внутреннее трение, и является эффективным для обнаружения трещин малого раскрытия, а также для определения направления их распространения [13, 14, 22, 60, 61].

Для модернизации процесса обработки результатов теплового контроля в США разработаны алгоритмы с применением вычислительного моделирования. Данные методики позволили рассчитывать область расположения трещины и предсказывать ее глубину в исследуемом КМ. Внедрение тепловых линейных сканеров увеличило скорость проведения измерений. Исследования показали, что разработанное оборудование выявляет разрывы волокон, поры, ударные повреждения, а также наличие воды в композитах.

Методы ИК-термографии используются для диагностики различных конструкций из волокнистых КМ. Их применяют для выявления таких макродефектов, как расслоения, пористость, а также для определения наличия воды в сотовых конструкциях [12-14, 60]. Исследования показали, что тепловые методы НК позволяют выявить повреждение, определить его размеры, глубину залегания, площадь области расслоения, возникающего при ударных воздействиях на углепластик [12]. В авиапромышленности тепловой метод при контроле конструкций из КМ решает следующие задачи:

- обнаружение воды в сотовых панелях эксплуатируемых самолетов и теплоизоляции космических аппаратов;
- обнаружение производственных и эксплуатационных дефектов в композиционных панелях и заплатках при ремонте.

При этом данная технология имеет ряд преимуществ, среди которых высокая чувствительность, простота при архивации данных, большое отношение сигнал/шум. К преимуществам метода также относятся быстрота получения первичной информации, эффективность в обнаружении поверхностных неоднородностей, возможность сканирования до 100 % поверхности ОК. Среди недостатков выделяют уменьшение чувствительности при повышении толщины материала.

#### Метод корреляции цифровых изображений

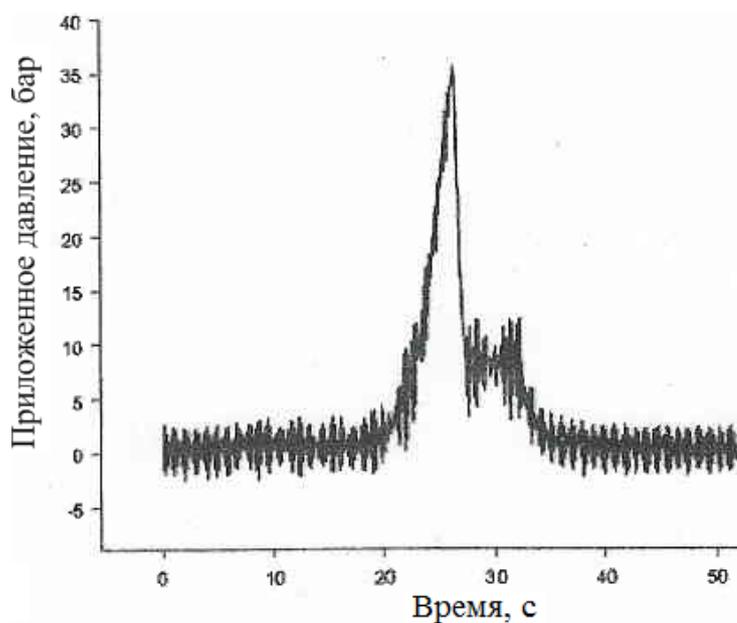
Метод корреляции цифровых изображений основан на их анализе и определении коэффициента корреляции, который находится по смещению точек, предварительно нанесенных на области распознавания образов ОК [118]. Данный метод применяется для изучения процессов деформации и разрушения различных КМ.

В работах [30, 31, 42, 54, 81] представлены результаты комбинированного применения методов корреляции цифровых изображений, АЭ и тензометрии при исследовании образцов из углерод-углеродного КМ для определения деформации сдвига в процессе нагружения, что позволило регистрировать начало роста трещины. Однако при испытании КМ выполняется наблюдение только за разрушением верхнего слоя, что не позволяет давать оценку состоянию конструкции в целом.

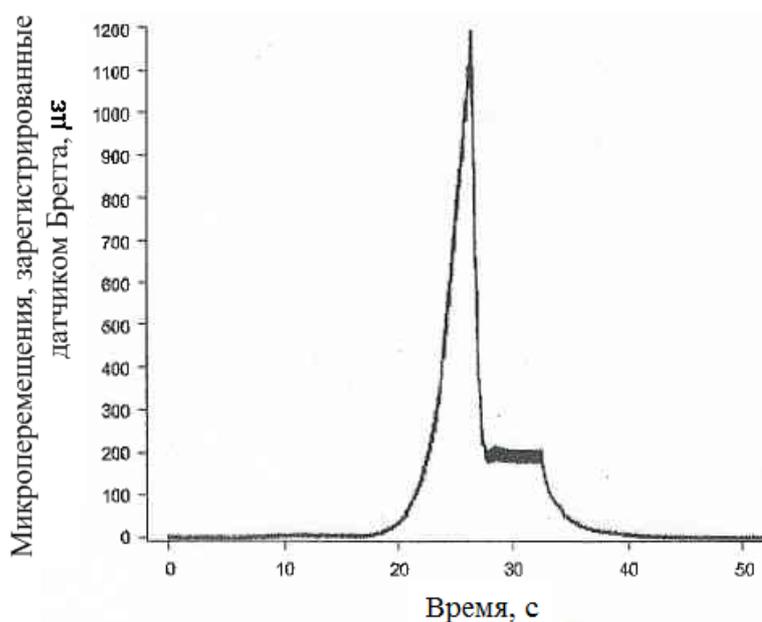
#### Оптоволоконные сенсорные элементы

Оптоволоконные датчики, интегрированные в материал композита, позволяют устранить такие недостатки закрепляемых на поверхности контролируемой конструкции датчиков, как качество их крепления, наличие высокого уровня шумов и вибраций во время эксплуатации, сильные электромагнитные поля и дополнительный вес [52, 71]. Наиболее популярными являются оптоволоконные сенсорные элементы на основе брегговских решеток [52].

В работах [106, 107] представлены результаты применения исследования композиционных сосудов высокого давления с использованием встроенных датчиков Брегга. При давлении 36 бар произошло его резкое снижение (рисунок 1.4,а), что было вызвано утечкой в резиновой камере сосуда [106]. Сигналы микроперемещений, зарегистрированные датчиками Брегга, соответствовали процессу нагружения и разрушения исследуемой конструкции (рисунок 1.4,б).



а)



б)

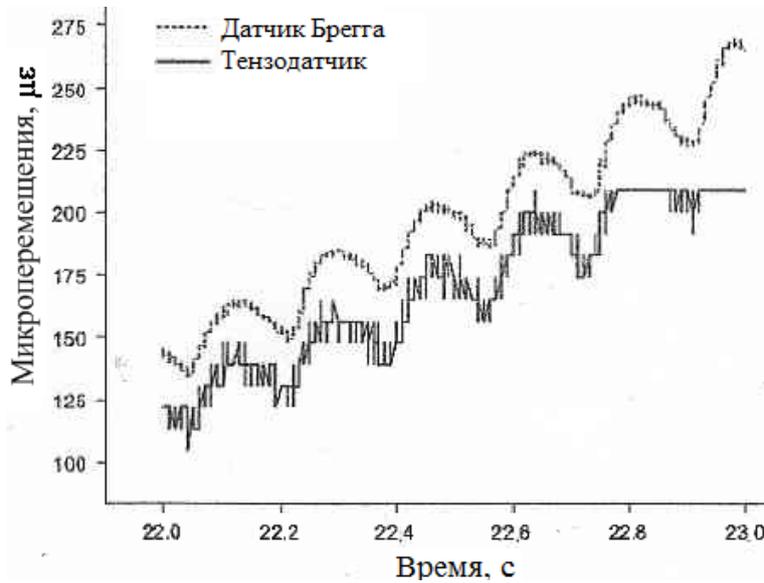
**Рисунок 1.4 – Результаты измерения давления при испытании композиционного сосуда высокого давления (а); б - зависимость микроперемещений, зарегистрированных датчиками Брегга, от времени**

Одновременно выполнялось измерение НДС с использованием тензодатчиков. Зависимости микроперемещений от времени, измеренные датчиками Брегга и тензодатчиками, хорошо согласовывались. Однако максимальное значение микроперемещений у тензодатчиков было на 10 % ниже, чем у датчиков Брегга.

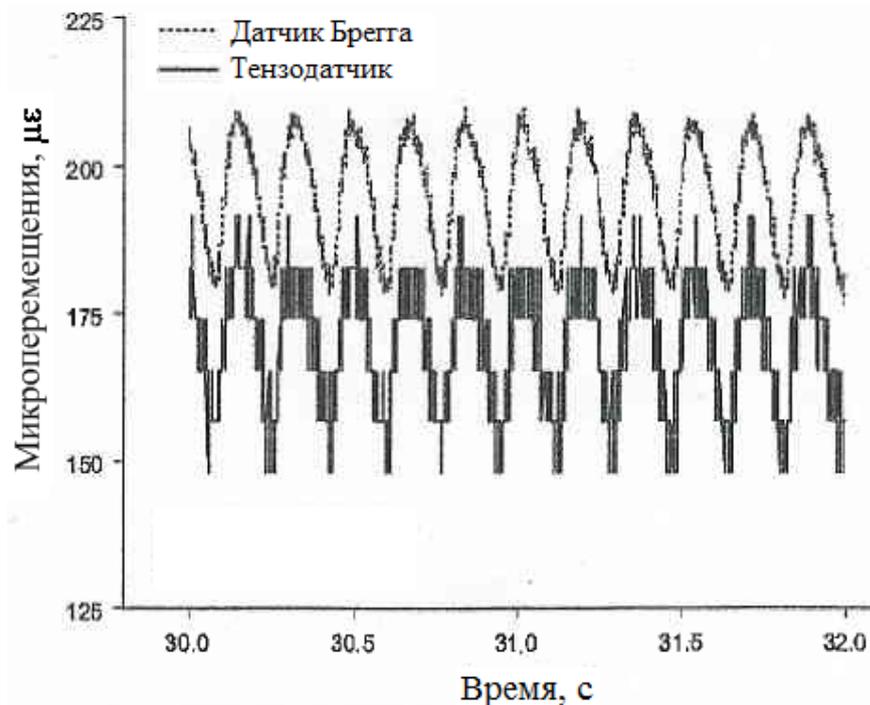
При анализе результатов измерений получено, что наблюдалось смещение зависимостей относительно друг друга на 20 – 30 мк, как при увеличении давления (рисунок 1.5,а), так и в состоянии равновесия после резкого снижения давления из-за утечки воды в резиновой каме-

ре (рисунок 1.5,б). При этом датчики Брегга обладали лучшей разрешающей способностью и чувствительностью, а также характеризовались более высокой стабильностью показаний во времени.

Применение разработанной технологии совместно с методом АЭ и моделированием на основе метода конечных элементов позволило определять наличие повреждений на начальной стадии зарождения процесса разрушения [106, 107].



а)



б)

**Рисунок 1.5 – Зависимость микроперемещений, зарегистрированных датчиками Брегга и тензодатчиками, при увеличении давления (а); б - после резкого падения давления**

В NASA спроектированы оптоволоконные элементы с плотной решеткой Брега для измерения напряженности и температуры. Особенность разработки состоит в том, что на волокне размещается несколько тысяч датчиков. Были проведены испытания коробчатой конструкции крыла *Rockwell Northrop Grumman* с использованием двух оптических волокон. Затем при исследованиях применяли четыре волокна, на которых было расположено 3000 датчиков. Данные волокна использовались для контроля НДС при испытаниях цистерны космического аппарата X-33 [50].

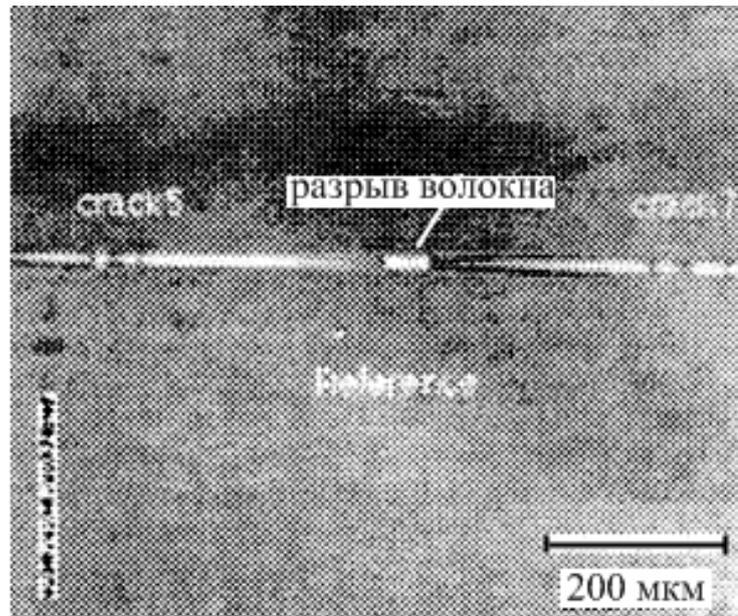
Промышленность, производящая строительные конструкции гражданского назначения, и другие традиционные пользователи технологий измерительных датчиков весьма неохотно переходят на оптоволоконные датчики, главным образом из-за ценовых ограничений. Другой недостаток оптоволоконных датчиков в приложениях к КМ – это то, что они очень хрупкие. Потому при их монтаже и подключении необходимо быть предельно осторожным [106 – 107].

#### Акустические методы контроля

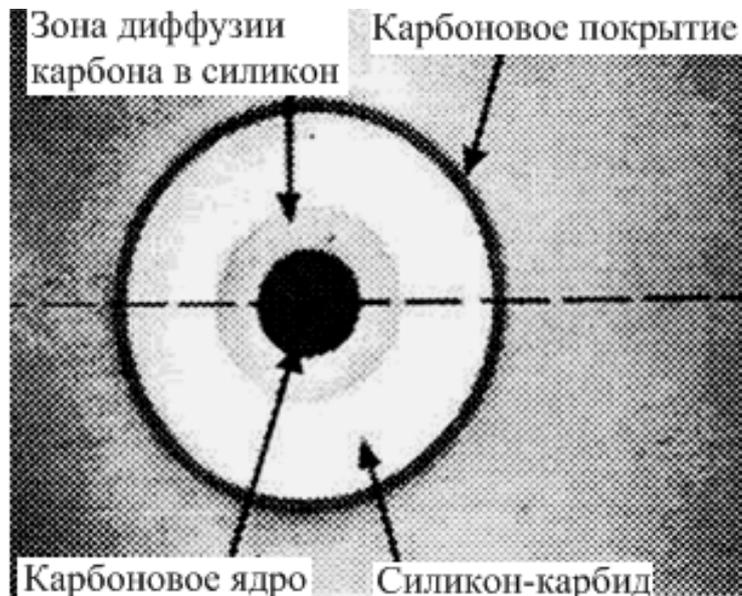
При использовании для контроля КМ акустических методов НК возникает ряд трудностей, связанных с низкой чувствительностью к тем или иным видам дефектов в связи с высоким затуханием упругих колебаний, большого технологического разброса плотности, анизотропии акустических характеристик, низкого качества контактной поверхности, неомогенностью структуры, приводящей к высокому уровню структурных помех, соизмеримых или превышающих уровень сигналов от дефектов [11, 94].

Для исследования поверхности композитов с разрешением в доли микрон в NASA разработаны акустический микроскоп *SAM* и сканирующий электронный акустический микроскоп *SEAM*, принцип действия которых основан на свойствах термоэластичности. Результатами контроля являются изображения поверхности, около поверхностных трещин и остаточных напряжений при разрыве волокон КМ (рисунок 1.6,а). С помощью данного оборудования выявляют разрывы волокон и их размеры, делаются выводы о прочности исследуемого материала и оценивается взаимодействие волокон и матрицы в КМ (рисунок 1.6,б).

Традиционно для дефектоскопии волокнистых КМ используют УЗ-метод, который позволяет обнаружить крупные дефекты типа несплошностей, расслоений, нарушения адгезии. Его применяют также на этапе входного контроля изделий из КМ. Известные УЗ-методы основаны на установлении корреляционных связей между параметрами диагностики и его физико-механическими свойствами, сопоставлением результатов неразрушающих и разрушающих испытаний.



a)



б)

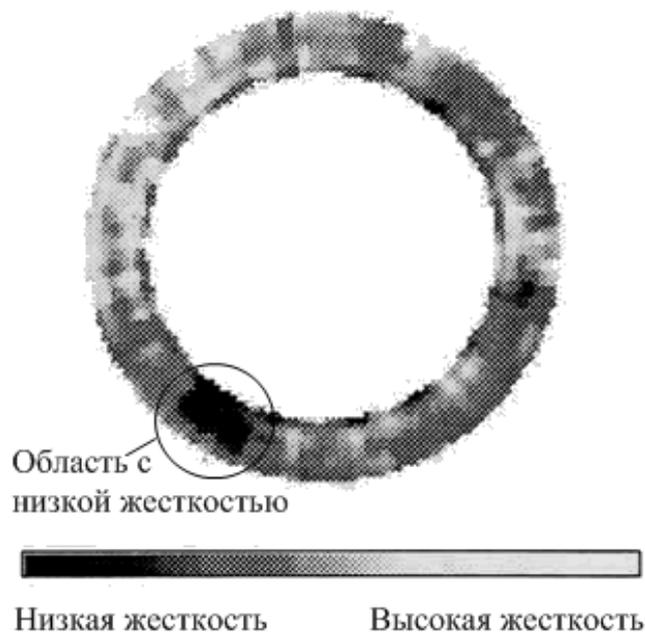
**Рисунок 1.6 – Результаты контроля с помощью акустического микроскопа SAM:**

***a* – разрыв волокна; *б* – поперечное сечение силикон-карбидного волокна**

В работе [58] предложена методика расчета физико-механических характеристик полимерных композитов (модуля упругости при растяжении, предела прочности при межслойном сдвиге, предела прочности при сжатии) по комплексному параметру, включающему значения скорости распространения УЗ-импульса и частоты основной составляющей спектра УЗ-импульса, прошедшего изделие по толщине в прямом и обратном направлениях. Исследованы пластины из углепластика КМУ-3Л (лента углеродная ЛУ-3, эпоксидно-анилиноформальдегидное связующее 5-211-Б), полученных прямым прессованием препрегов, предварительно пропитанных связующим.

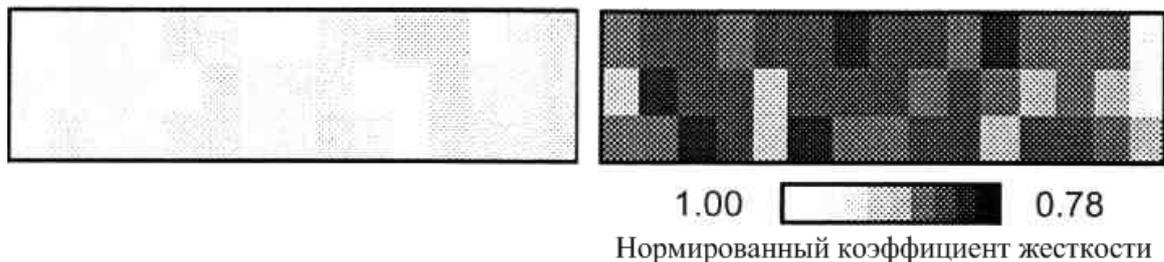
Для изменения соотношения объемных содержаний наполнителя и матрицы в образцах изменяли удельное давление формования. Исследовали корреляцию между прочностными показателями и акустическими параметрами материала. Установлено, что изменение давления формования приводит к увеличению прочности на сжатие на 30 % и к уменьшению прочности на межслойный сдвиг на 29 %, что вызвано изменением содержания наполнителя [58].

Сотрудниками *NASA* разработаны методы УЗ-контроля, позволяющие визуализировать упругость КМ. По результатам проведенного ультразвукового измерения было получено изображение, на котором выделена область с потерей жесткости (рисунок 1.7). Эти данные предсказывали области с локальными напряжениями и реакции упругости [50].



**Рисунок 1.7 – Результаты ультразвукового измерения жесткости**

Другое направление исследований *NASA* связано с анализом волн Лэмба. Были получены коэффициенты жесткости материала при циклических нагружениях, а также в процессе термического воздействия. При сравнении результатов измерений образца до испытаний (рисунок 1.8,*а*) и после  $10^4$  часов циклической нагрузки при высокой температуре (рисунок 1.8,*б*) были получены изображения, отображающие потерю жесткости.



*а)*

*б)*

**Рисунок 1.8 – Исследуемый образец до (*а*) и после (*б*) испытаний**

Для улучшения качества приема сигналов при УЗ-контроле была разработана система на ультразвуковых фазированных решетках *UPATS*, состоящая из 100 независимых каналов. Данной системой были выполнены исследования с использованием фазированных решеток сложной формы, что позволило повысить точность результатов измерений и качество изображений. Для улучшения ультразвуковых исследований были разработаны неконтактные сканирующие системы, позволившие увеличивать зону сканирования, выполнять исследования на открытых пространствах.

Среди УЗ-методов НК наиболее известными являются импедансный метод, фазовый велосимметрический, метод свободных колебаний и эхо-импульсный метод [24]. Применяют эти методы при контроле дефектов в тонкостенных конструкциях из стеклопластика с толщиной не выше 10 мм. С помощью эхо-импульсного метода возможен контроль расслоений в объектах толщиной до 30 мм. Для изделий, толщина которых превышает 30 мм, применяют амплитудно-временной метод.

Акустический импедансный метод основан на различии механических импедансов бездефектного и дефектного участков конструкции. Он позволяет выявлять расслоения, непроклеи, непропаи, регистрируют степень полимеризации. Преобразователь возбуждает упругие колебания в ОК, регистрирует величину акустического импеданса и амплитуду. При наличии дефектов под поверхностью ОК, импеданс уменьшается, амплитуда колебаний увеличивается. Данный метод предназначен для контроля композиционных конструкций с сотовым и вспененным наполнителем, клеевых соединений, обшивок с элементами жесткости [21].

Чувствительность импедансного метода зависит от конкретных условий его применения и определяется параметрами ОК:

- жесткость обшивки или отделенного дефектом слоя;
- модуль упругости внутреннего элемента;
- шероховатость и кривизна поверхности ОК.

Главным недостатком метода является необходимость изготовления и аттестации большого количества контрольных образцов для настройки дефектоскопа [59].

Велосимметрический метод применяется для контроля слоистых композитов. Преобразователь имеет излучающий и приемный пьезоэлементы, расположенные на фиксированном расстоянии. Источник возбуждает в изделии упругие изгибные волны, которые регистрируются приемником. При этом в качестве информативного параметра используют скорость распространения, влияющей на фазу волны в точке приема, по значению которой судят о наличии дефекта. Метод может использоваться и с двусторонним соосным расположением источника и приемника. В этом случае расслоение огибается асимметричной волной нулевого порядка, преобразуемой из продольных волн, генерируемых излучателем. В месте приема фаза волны в дефектной

зоне значительно отстает от фазы, регистрируемой на бездефектном участке. По изменению амплитуды сигнала судят о наличии дефекта и его параметрах. Этим методом эффективно выявляются расслоения площадью от  $1,5 \text{ мм}^2$  и более.

Метод свободных колебаний позволяет регистрировать нарушения жесткой связи в слоистых КМ. Если изделие обладает определенной массой, механическим сопротивлением и жесткостью и будет возбуждено резким ударом, то в нем возникнут свободные затухающие колебания. При определенных размерах, формах и однородности состава материала композита частота его собственных колебаний будет свойственной именно этому изделию. В случае, если в КМ имеется дефект (трещина, расслоение, пустоты), то параметры колебательной системы изменятся, что зарегистрирует преобразователь.

Однако УЗ-методы НК для оценки физико-механических свойств КМ как в нашей стране, так и за рубежом, широко не используются. Это связано с невысокой точностью и нестабильностью получаемых результатов диагностики [55, 58].

Неэффективными для контроля композитов являются и высокочастотные УЗ-методы, так как УЗ-волны с частотой выше (1 – 5) МГц значительно ослабляются и рассеиваются матрицей, волокнами, различными включениями. Это существенно ограничивает диапазон контролируемых толщин КМ.

#### Метод акустической эмиссии

Наиболее известный в настоящее время метод непрерывного контроля состояния конструкций из КМ основан на явлении АЭ. Он используется для осуществления непрерывного контроля за объектами из КМ в процессе их нагружения и является наиболее эффективным методом НК при контроле композитов, так как обладает высокой чувствительностью при локации дефектов на ранней стадии развития, позволяет осуществлять автоматизацию процесса измерения, определять координаты области разрушения в режиме реального времени без вывода ОК из эксплуатации, оценивать степень опасности дефектов и определять остаточный ресурс исследуемой конструкции [27, 34, 101, 110, 117].

При нагружении исследуемого объекта происходит излучение упругих волн материалом в результате внутренних изменений его структуры. Акустические колебания распространяются в материале ОК и регистрируются преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ), установленными на поверхности конструкции. В процессе нагружения конструкции все большее число дефектов образуется и распространяется в материале, что приводит к появлению большего количества сигналов АЭ [106, 107]. Основными источниками АЭ при исследовании разрушения материалов являются пластическая деформация и разрыв межатомных связей, вызванные ростом трещины.

Данный метод особенно эффективен на ранних стадиях разрушения материалов, когда выявление дефектов другими методами практически невозможно. Он является одним из наиболее перспективных методов НК, поскольку обладает высокой чувствительностью и позволяет выявлять дефекты на стадии их зарождения. Разработанные методики локации сигналов АЭ позволяют определять координаты разрушения и направление его распространения, а также оценить степень опасности выявленного дефекта [3]. Известны работы, в которых рассматривают такие информативные параметры сигналов АЭ, как линейная локация, амплитудное распределение, активность, длительность, время нарастания, энергия [34, 76, 100, 115].

Однако одной из главных проблем применения метода АЭ для контроля КМ является плоскостная локация сигналов АЭ, решение которой осложняется анизотропной структурой углепластиков, которая влияет не только на прочность и механические свойства композитов, но и существенно изменяет форму сигналов АЭ и затрудняет определение координат источников дефектов.

Контроль образцов из КМ с использованием метода АЭ осуществляется по всему миру. Разрабатываются различные алгоритмы расчета координат дефектов при решении задач плоскостной локации с применением частотной фильтрации [111]. Сигналы АЭ в тонких пластинах, изготовленных из углепластиков, распространяются в виде волн Лэмба и их скорость зависит от частоты [46, 111]. Определять время прихода сигналов АЭ достаточно сложно из-за их дисперсионной природы. Кроме того, в анизотропных структурах скорость волн АЭ зависит от направления их распространения. В [111] предлагается два алгоритма ускорения вычисления координат дефектов. В соответствии с первым алгоритмом при решении локационной задачи в качестве частотного фильтра используется непрерывное вейвлет-преобразование. Второй алгоритм предполагает применение аффинного преобразования при вычислении координат источника сигналов АЭ. Система координат преобразуется для устранения эффекта скоростной анизотропии. Данные алгоритмы достаточно сложны и требуют существенных затрат машинного времени.

В NASA для контроля КМ были предложены методы, в основе которых был анализ различных мод сигналов АЭ. Получено, что применение разработанной методики локации сигналов позволило выявить трещину и определить ее размер (рисунок 1.9). Максимальная погрешность измерений составила 3,2 мм на длине 152 мм.



**Рисунок 1.9 – Результаты АЭ-контроля КМ с использованием улучшенной методики**

Существуют подходы к идентификации или классификации повреждений, в которых используются методы идентификации волновых характеристик, методы частотного анализа и методы измерений времени проявления источника сигналов АЭ. Общей чертой этих методов является то, что вместо рассмотрения количественных величин, характеризующих события АЭ, используются количественные величины, описывающие динамические свойства волн распространения сигналов АЭ. Соотношения между характеристиками сигналов и повреждениями определяются из данных эксперимента. Сигналы будут модулироваться по-разному, поскольку в зависимости от материала будут изменяться пути прохождения сигнала от источника к датчику. Следовательно, для различных материалов и разных конструкций необходимо проводить экспериментальные исследования с тем, чтобы обеспечить удовлетворительное функционирование системы мониторинга состояния, основанной на анализе сигналов АЭ [103].

В общем случае картина распространения волн АЭ в КМ, усиленных волокнами и имеющих конечные размеры, сложная. Волна содержит не только продольную и поперечную составляющую, но также и составляющие, генерируемые эффектами отражения и рассеяния ввиду наличия границ материала [103, 119].

Применение метода АЭ при испытаниях образцов из стеклопластика позволило устойчиво локализовать сигналы АЭ [35, 105]. Результаты комбинированного применения метода АЭ и тензометрии для раннего обнаружения развития дефектов в образцах из стеклопластика с надпилотом при статическом и циклическом нагружениях приведены в [35].

При анализе сигналов АЭ необходимо решать задачи идентификации типов повреждений в КМ, определять связи параметров зарегистрированных сигналов АЭ с условиями нагружения и состоянием материала. Наиболее часто определяют корреляционную зависимость между типом повреждения и такими информативными параметрами, как амплитуда, энергетичес-

кий параметр *MARSE*, частота [32, 74, 108]. Методики АЭ-контроля предполагают классификацию источников по степени опасности, как правило, основанную на анализе энергетических параметров процесса излучения и динамике их изменения во времени [10].

При контроле углепластиков методом АЭ необходимо учитывать влияние анизотропии на скорость распространения упругих волн. Поэтому прочностные исследования образцов и объектов из КМ методом АЭ и разработка методик обработки получаемой в процессе испытаний информации, являются актуальными.

Метод АЭ применяют для определения стадий развития разрушения. Характер разрушения волокнистых материалов может быть различен из-за особенностей структуры. При изучении процессов разрушения матрицы, волокон, отслоения волокон от матрицы, адгезии, развития трещины широко применяют метод АЭ. Стадии развития растрескивания КМ можно находить по спектральному анализу сигналов АЭ, а именно – по изменению ширины спектра и его доминантной частоты. Исследования показали, что перед скачкообразным подрастанием трещины происходят подготовительные стадии, на которых проявляются механизмы микроразрушения. Момент начала развития макроразрушения определяется по появлению дискретных высокоамплитудных сигналов с малым временем нарастания переднего фронта и узким спектром частот.

В настоящее время исследования с использованием метода АЭ являются перспективными и развиваются в направлении определения дефектности, прочности и долговечности материалов и конструкций. Однако далеко не в каждом случае удается установить однозначную связь между измеренными характеристиками сигнала и конкретными параметрами дефекта. Поэтому интерпретация результатов измерений в значительной мере зависит от используемых математических моделей образования и развития дефектов, результатов теоретических и экспериментальных исследований распространения различных видов акустических волн в твердых телах, характеристик применяемых преобразователей и т.д. [18].

#### **1.4 Постановка задачи исследования**

В настоящее время композиты занимают особое место в авиа- и ракетостроении, строительстве, в транспортной отрасли. Актуальной задачей является обеспечение целостности конструкций из КМ и их безопасной эксплуатации. Необходимость диагностики состояния конструкций из КМ, своевременное обнаружение зарождающихся и развивающихся дефектов требует развития методов НК и разработки методик анализа результатов.

При анализе работ, посвященных разработке методик мониторинга состояния конструкций из КМ, было установлено, что значительная часть исследований направлена на опреде-

ление напряженно-деформированного состояния (НДС) материала. Выявление зарождающихся дефектов в конструкции в процессе эксплуатации является важной задачей и требует правильного выбора технологий контроля и проведения испытаний. Применение метода АЭ для локации источников сигналов, соответствующих появлению и распространению разрушений на ранней стадии развития, при контроле объектов из КМ позволит решить данную задачу.

Метод АЭ является общепризнанным методом НК для оценки качества КМ, но его практическое использование ограничивается рядом проблем [97]:

- отсутствие адекватной математической модели, позволяющей оценивать достоверность метода АЭ на основе корреляции между характеристиками повреждений в КМ;
- проблема идентификации типа источников сигналов АЭ в КМ;
- проблема предсказания механизмов разрушения объектов из КМ.

Необходимо разработать методики локации сигналов АЭ и обработки АЭ-информации, позволяющие давать оценку состоянию конструкций в режиме реального времени. Поэтому исследования образцов и элементов конструкций с целью создания алгоритмов обработки регистрируемой АЭ-информации являются актуальными.

На основании этого были поставлены следующие задачи:

- 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.

## 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА И СТЕКЛОПЛАСТИКА

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 [103, 111]. 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 [28, 86, 88, 93].

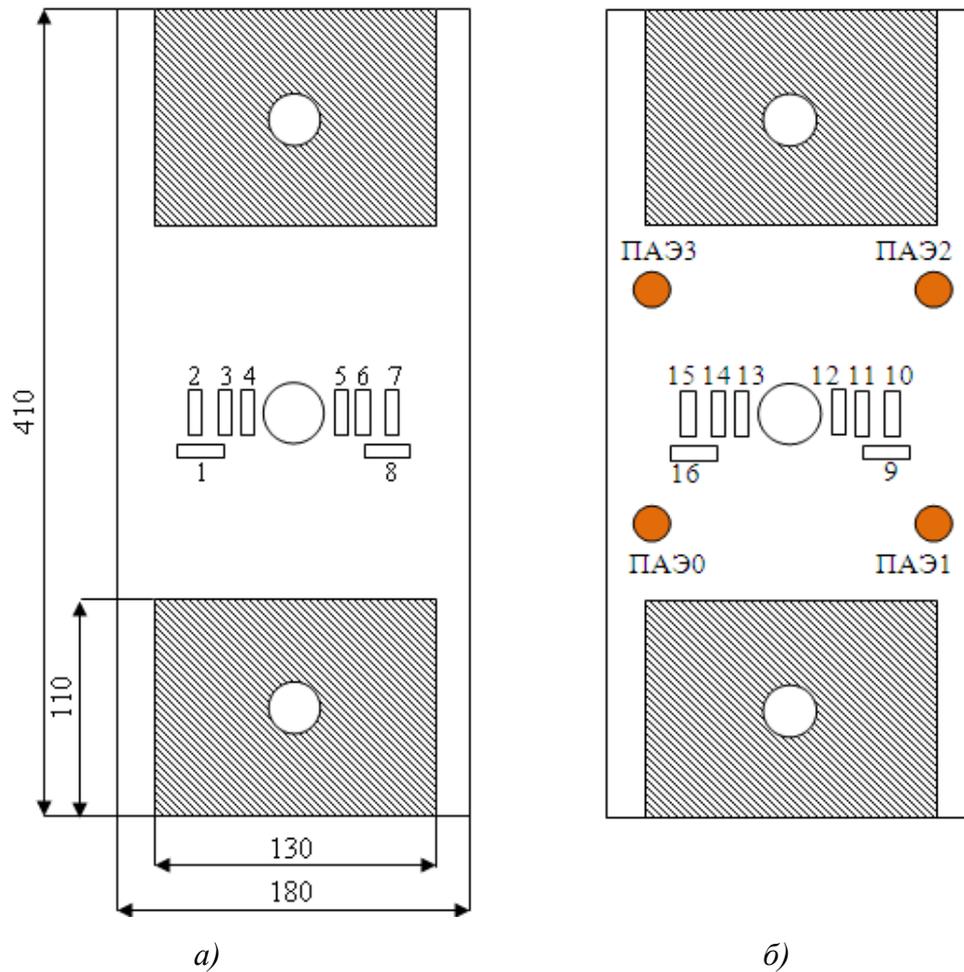
Для разработки и усовершенствования методов локации дефектов на ранней стадии развития проводилось статическое нагружение образцов из волокнистых композитов с использованием метода АЭ и тензометрии. Были исследованы авиационные углепластики КМКУ (композиционный материал клеевой на основе углепластика), *T700*, состоящий из волокна *Toray T700* и связующего *REM*, и стеклопластик СППС (стеклопластик профильный пултрузионный строительный), применяемый для изготовления мостовых конструкций.

Регистрация и обработка информации осуществлялась с использованием диагностической АЭ-системы СЦАД-16.10 с «плавающими» порогами селекции (свидетельство RU.C.27.007.A № 40707, зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений под номером 45154-10) [29, 53, 63, 77]. При испытании образцов частота оцифровки составляла  $f = 4$  МГц, что позволило получать точность локации сигналов АЭ не ниже 2-3 %. На образцы устанавливалась пьезоантенна из четырех ПАЭ типа ПК-01-07 с полосой пропускания (0,1... 0,7) МГц. Для измерения НДС в процессе нагружения образцов использовали тензометрическую систему ММТС-64.01 (свидетельство RU.C.34. 007.A № 44412) класса точности 0,2. Измерения деформации выполняли тензодатчиками типа ПКС (свидетельство RU.C. 28. 007.A № 30935) сопротивлением  $R = 200$  Ом, базой  $L = 12$  мм, коэффициентом тензочувствительности  $K = 2,12$ .

### 3.1 Исследование процесса разрушения образцов из углепластика при статическом нагружении с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии

Исследовались образцы, изготовленные из обшивки руля высоты самолета *SSJ-100*, представляющие собой трехслойную панель с сотовым наполнителем ПСП-1-2,5-64 (полимерсотопласт) и несущими слоями из углепластика на основе монослоя КМКУ. Проведены испытания на растяжение десяти образцов размером 410x180x5 мм с отверстием диаметром  $d = 32$  мм

в центре. Для снижения вероятности разрушения образцов в районе захватов на них с двух сторон были наклеены пластины из дюралюминия размером 110x130x1 мм (рисунок 2.1, а).



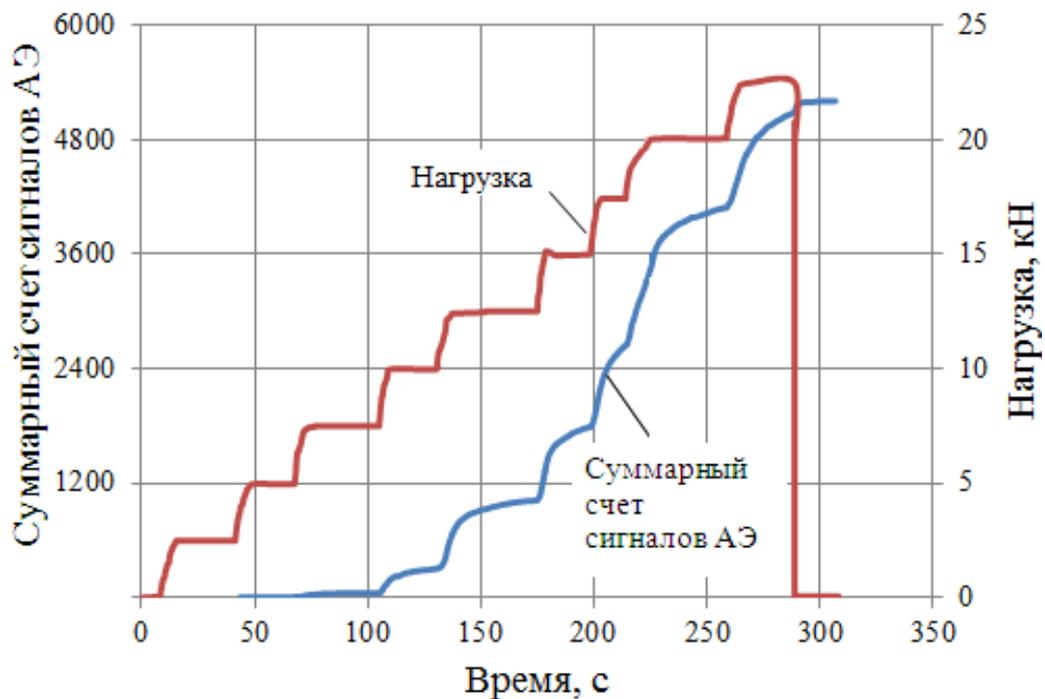
**Рисунок 2.1 – Схема установки тензодатчиков и ПАЭ на образце: а – на нижнем несущем слое; б – на верхнем несущем слое с установленными ПАЭ 0 – 3**

Нагружение осуществлялось электрогидравлической машиной *MTS-10* ступенчато с шагом  $\Delta P = 2,5$  кН до полного разрушения образцов. В таблице 2.1 приведены результаты, полученные при испытании десяти образцов из углепластика. В образцах (1 – 2) разрушение произошло в области концентратора напряжений. При нагружении образцов (3 – 6) разрушение происходило в области нижнего захвата. Поэтому в образцах (7 – 10) было уменьшено рабочее сечение за счет введения двух дополнительных концентраторов напряжения, которые располагались по разные стороны от основного отверстия и имели тот же диаметр.

**Таблица 2.1 – Результаты испытания образцов из углепластика КМКУ с сотовым наполнителем**

Номер образца	Разрушающее напряжение, МПа	Разрушающая нагрузка, кН	Суммарный счет	Количество концентраторов. Область разрушения
1	640	22,5	5095	Один концентратор. Разрушение в области концентратора
2	430	37,0	10200	
3	157	18,0	5000	Один концентратор. Разрушение в области нижнего захвата.
4	210	33,2	6100	
5	260	22,0	2720	
6	230	38,3	8320	
7	202	20,2	360	Три концентратора. Разрушение в области концентраторов.
8	200	22,5	490	
9	250	20,3	330	
10	210	23,0	890	

На образец 1 перед испытаниями в зоне расположения ПАЭ 3 (рисунок 2.1,б) было нанесено точечное ударное повреждение. В процессе нагружения выполнялось наблюдение за этой зоной. Регистрация сигналов АЭ при нагружении образца 1 началась при минимальной нагрузке  $P_{\min} = 2,5$  кН (рисунок 2.2).



**Рисунок 2.2 – Зависимость распределения суммарного счета сигналов АЭ и нагрузки от времени при нагружении образца 1**

На начальном этапе нагружения до нагрузки  $P = 7,5$  кН активность  $\dot{N}_\Sigma$  всех зарегистрированных сигналов АЭ составила 20 сигн./с, а их устойчивая локация наблюдалась при достижении нагрузкой  $P = 15$  кН при активности  $\dot{N}_\Sigma$ , равной 53 сигн./с. Его разрушение произошло при нагрузке  $P_{\text{макс}} = 22,5$  кН.

При контроле волокнистых КМ методом АЭ из-за наличия нескольких составляющих (матрицы и армирующих волокон) акустические волны отражаются в процессе прохождения через материал. Это приводит к уменьшению амплитуды сигналов АЭ и при использовании порогового метода локации оказывает влияние на определение времен прихода сигналов АЭ на ПАЭ. Для уменьшения разброса координат время прихода сигнала АЭ на датчики пьезоантенны предложено определять двухинтервальным методом [23, 56]. Двухинтервальный коэффициент  $K(t)$  реагирует на резкое изменение структуры сигнала АЭ и находится как [23, 56]:

$$K(t) = \frac{A(t + T_{\text{ок}})}{A(t - T_{\text{ок}})} - 1 = \frac{A(t + T_{\text{ок}}) - A(t - T_{\text{ок}})}{A(t - T_{\text{ок}})}, \quad (2.1)$$

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

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

$U_i$  – значения отсчетов оцифрованной формы сигнала АЭ;

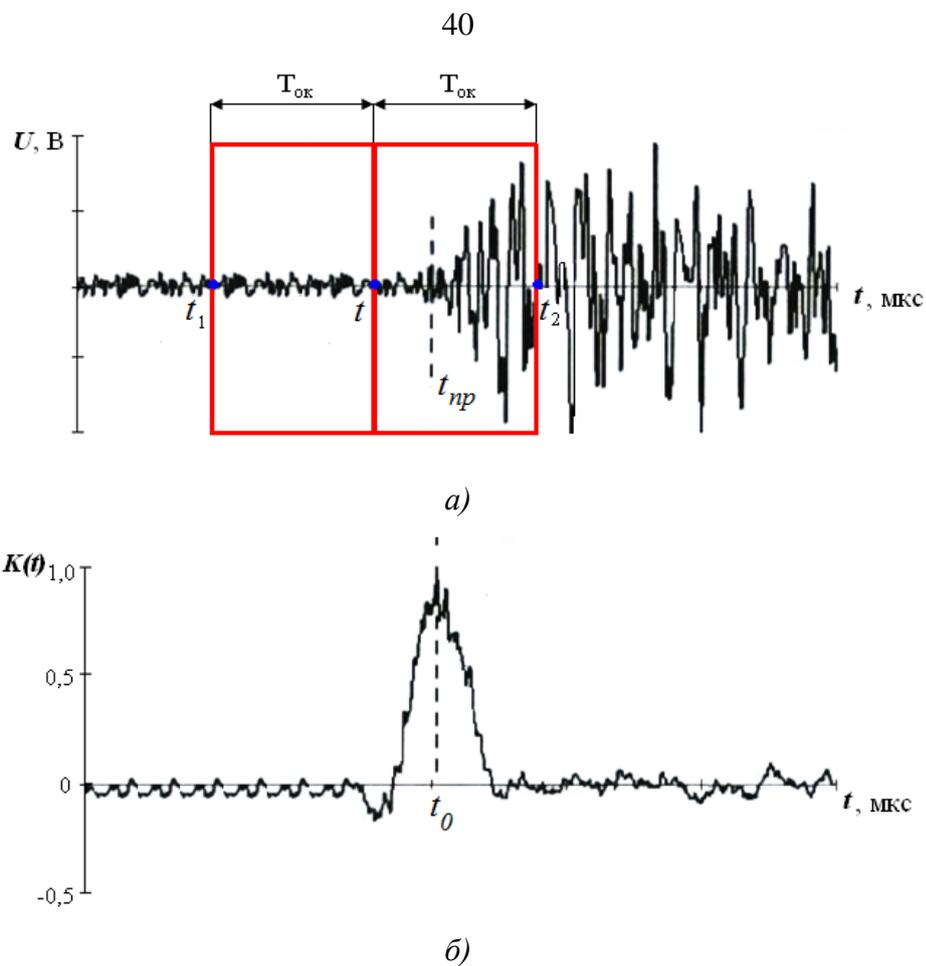
$T_{\text{ок}}$  – длительность временного «окна», накрывающего сигнал АЭ (рисунок 2.3,а);

$\tau$  – интервал дискретизации аналого-цифрового преобразователя (АЦП) измерительного канала АЭ-системы.

В двухинтервальном методе время прихода  $t_{\text{пр}}$  сигнала АЭ на ПАЭ (рисунок 2.3,а) принимают равным моменту времени  $t_0$ , при котором двухинтервальный коэффициент  $K(t)$  достигает максимального значения (рисунок 2.3,б). Время  $t_0$  соответствует моменту максимальной скорости перестройки структуры сигнала, то есть моменту его прихода на ПАЭ. Времена  $t_1$ ,  $t_2$  (рисунок 2.3,б) находятся как:

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

Преимущество использования двухинтервального коэффициента  $K(t)$  заключается в том, что за счет суммирования параметров структуры во временном «окне» исключаются случайные выбросы, что позволяет более точно определять время  $t_0$  прихода сигнала АЭ на соответствующий ПАЭ и, следовательно, уменьшить разброс координат дефектов.



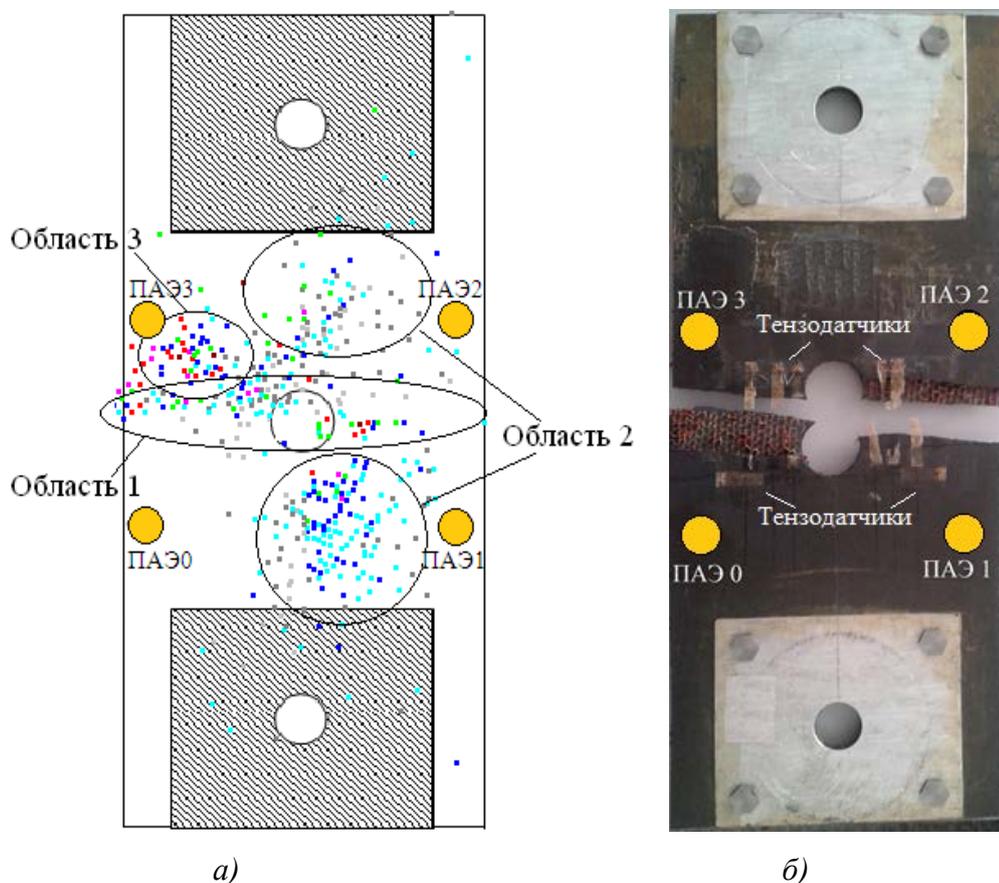
**Рисунок 2.3 – Осциллограмма сигнала АЭ (а) и соответствующее ей изменение двухинтервального коэффициента  $K(t)$  (б)**

На рисунке 2.4,а показана локация сигналов АЭ для образца 1, которые группировались в трех областях: область 1 – сигналы от отверстия; область 2 – сигналы от гидравлических захватов машины *MTS-10*; область 3 – сигналы от ударного повреждения [88].

Анализ времен регистрации сигналов АЭ показал, что в области 1 они локализовались на заключительном этапе испытаний при нагрузке более  $P = 15$  кН. После появления первых сигналов АЭ из области концентратора напряжений их дальнейшая регистрация продолжалась непрерывно до разрушения образца (рисунок 2.4,б). Сигналы АЭ из области 3 (рисунок 2.4,а) соответствовали разрушению нижнего несущего слоя образца и их регистрировали группами. Первая группа сигналов АЭ была локализована при нагрузке  $P = 7,5$  кН. В дальнейшем при каждом новом увеличении нагрузки в области 3 регистрировались сигналы вплоть до разрушения образца.

В таблице 2.2 приведено сравнение основных информативных параметров сигналов АЭ (амплитуда, двухинтервальный коэффициент  $K(t)$ , доминантная частота и энергетический параметр *MARSE*) из областей 1 и 3 образца 1 (рисунок 2.4,а), связанных с разрушением структуры композита. Получено, что в области 3 образца 1, где было выполнено точечное ударное воздействие, значения рассмотренных параметров больше, чем в области 1. Время нарастания огибаю-

шей переднего фронта сигналов АЭ в области 3 меньше, чем в области 1, т.е. в области 3 осуществлялось активное разрушение материала образца. Анализ данных параметров позволил предположить, что точечный удар повредил структуру слоев КМ, в результате чего в области 3 более активно протекали процессы разрушения материала образца.

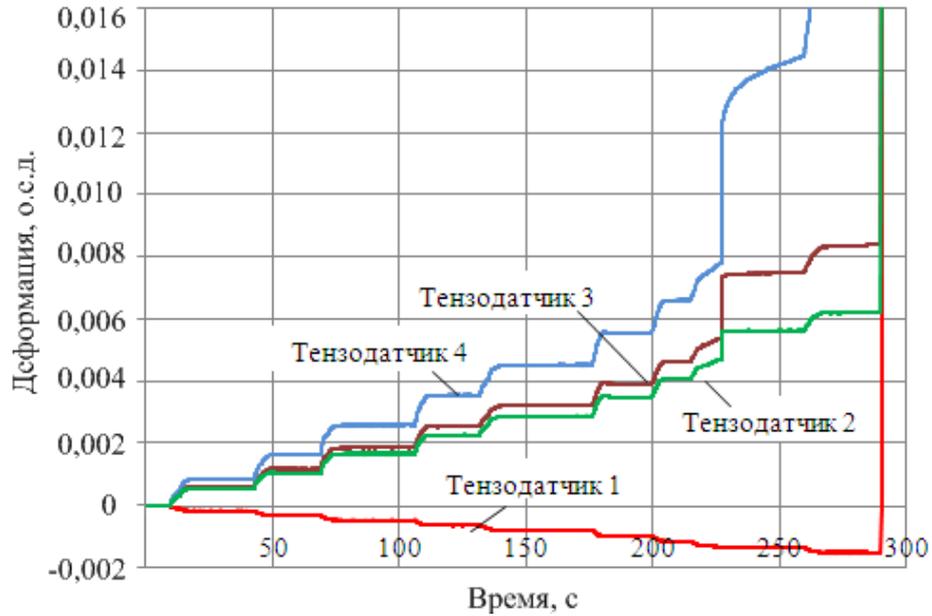


**Рисунок 2.4 – Локация сигналов АЭ, зарегистрированных в процессе нагружения образца 1 (а); внешний вид образца после разрушения (б)**

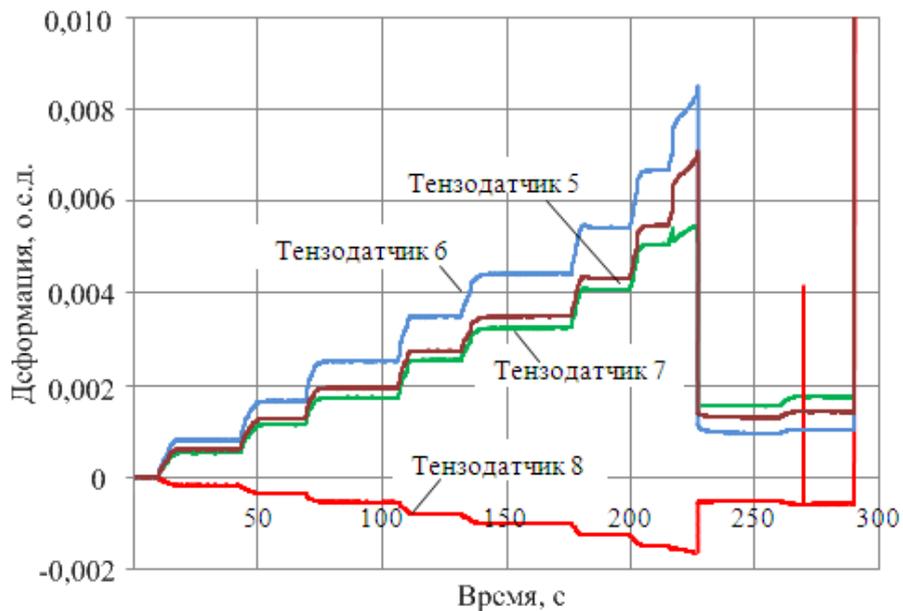
**Таблица 2.2 – Основные информативные параметры сигналов АЭ в областях 1 и 3, полученные при локации сигналов АЭ в образце 1 (рисунок 2.4)**

Параметры сигналов АЭ		Область 1		Область 3	
		Среднее	Медиана	Среднее	Медиана
Амплитуда сигналов АЭ, мВ	канал 0	213,67	100,50	667,80	196,00
	канал 1	1129,96	668,00	1180,32	528,00
	канал 2	420,54	174,50	706,45	247,00
	канал 3	674,43	349,00	2521,50	2284,50
Доминантная частота, кГц		160,91	144,00	204,16	216,00
Время нарастания, мкс		55,22	42,50	23,69	16,00
Двухинтервальный коэффициент $K(t)$		43,89	28,20	220,31	143,45
$MARSE$ , мВ·с		82,52	31,95	204,42	116,34

На образец 1 с двух сторон наклеивали 16 проволочных тензодатчиков. На одной стороне образца (рисунок 2.1,*а*) наклеивали тензодатчики 1 – 8, а на другой стороне – тензодатчики 9 – 16 (рисунок 2.1,*б*). Анализ результатов тензометрирования при испытании образца 1 показал, что тензодатчики 2 – 7, 10 – 15 (рисунок 2.1) испытывали деформацию растяжения, тензодатчики 1, 8, 9, 16 – деформацию сжатия. Поскольку тензодатчики образца 1 относительно концентратора напряжений с двух сторон были наклеены симметрично (рисунок 2.1), то и зависимости изменения деформации (рисунок 2.5) от времени у них были аналогичные (за исключением показаний тензодатчиков 5 – 8 на последнем этапе нагружения).



а)

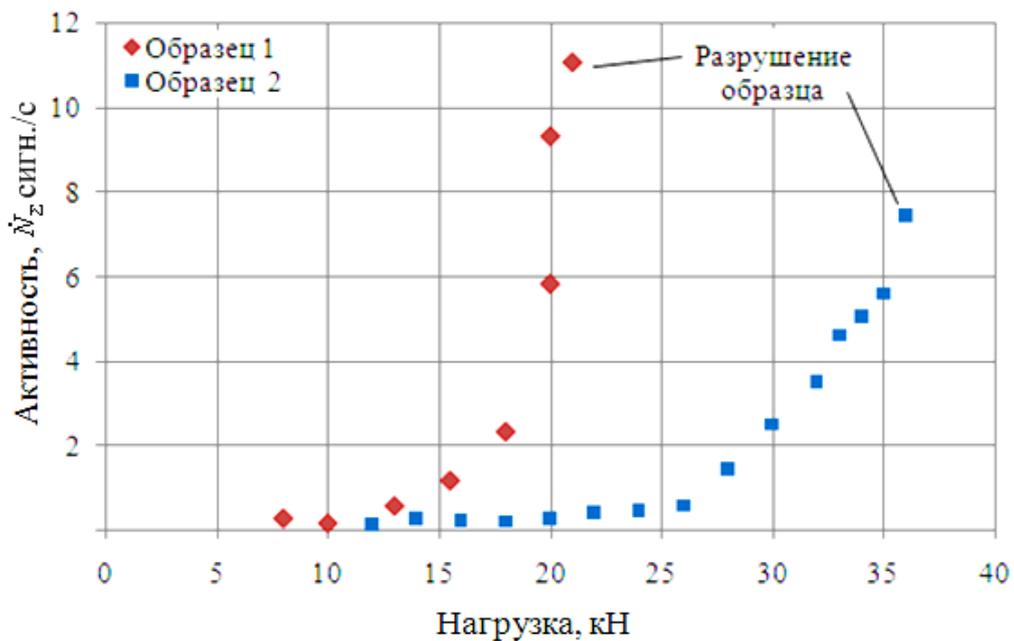


б)

**Рисунок 2.5 – Зависимость изменения деформации от времени при нагружении образца 1: а – для тензодатчиков 1 – 4; б – для тензодатчиков 5 – 8**

Деформация, определяемая тензодатчиками 5 – 8, перестала изменяться с начала нагружения через промежуток времени  $t_{\text{разр}} = 230$  с (рисунки 2.2, 2.5,б) при нагрузке  $P = 20$  кН. Для тензодатчиков 1–4 деформация изменялась до конца нагружения образца (рисунок 2.5,а). Обрыв тензодатчиков 1– 4, 9 – 16 (рисунок 2.1,б) произошел при полном разрушении образца. Следовательно, при нагрузке  $P = 20$  кН нижний несущий слой образца 1, где был нанесен точечный удар, находящийся между ПАЭ 0 – ПАЭ 3, разрушился.

На образец 2 перед испытаниями удары не наносили, и он выдержал нагрузку до  $P = 37$  кН. На рисунке 2.6 для сравнения показаны экспериментальные зависимости активности  $\dot{N}_{\Sigma}$  сигналов АЭ от нагрузки, зарегистрированные из области концентратора напряжений для образцов 1 и 2. При нагружении образца 1 локация сигналов АЭ от отверстия началась при нагрузке  $P = 8$  кН. Начиная с нагрузки  $P = 13$  кН, наблюдали экспоненциальный рост активности  $\dot{N}_{\Sigma}$ , что соответствовало началу разрушения образца. При увеличении нагрузки от  $P = 13$  кН до  $P = 20$  кН данный параметр изменился от  $\dot{N}_{\Sigma} = 1$  сигн./с до  $\dot{N}_{\Sigma} = 9$  сигн./с (рисунок 2.6), а максимальная активность составила  $\dot{N}_{\Sigma} = 11$  сигн./с.



**Рисунок 2.6 – Зависимость активности  $\dot{N}_{\Sigma}$  от нагрузки для сигналов АЭ, локализованных в области концентратора напряжений, для образцов 1 и 2**

В процессе нагружения образца 2 первые сигналы от отверстия были локализованы при нагрузке  $P = 12$  кН, и активность не превышала 1 сигн./с при нагрузке  $P = (12...27)$  кН. Для образца 2 наблюдали более пологий экспоненциальный рост активности  $\dot{N}_{\Sigma}$  сигналов АЭ, начиная с нагрузки  $P = 27$  кН. Перед разрушением образца активность сигналов, локализованных из области концентратора напряжения, составляла  $\dot{N}_{\Sigma} = 7,5$  сигн./с.

При нагружении образцов 7 – 10 с тремя концентраторами разрушающие напряжения были меньше, чем в образцах 1 и 2 с одним концентратором. Разрушающие нагрузки в образце 1 с внесенным точечным ударом и в образцах 7 – 10 были практически одинаковы и составили (20 – 23) кН. В образце 2 разрушающая нагрузка составила 37 кН.

Исследовались образцы из углепластика размером 500x100 мм, в которых использовались монослои, выполненные на основе волокна *Toray T700* (таблица 2.3) и связующего *REM*. Для исследования прочностных характеристик и контроля развития дефектов образцы были ослаблены концентратором напряжений в виде отверстия диаметром  $d = 14$  мм.

**Таблица 2.3 – Паспортные данные монослоя Torayca T700**

Марка ПКМ	t, мм	$X_t$ , МПа	$E_{x+}$ , ГПа	$Y_t$ , МПа	$E_{y+}$ , ГПа	$\mu_{xy}$
Torayca T700	0,192	2300	123	50	8,6	0,34
$X_c$ , МПа	$E_{x-}$ , ГПа	$Y_c$ , МПа	$E_{y-}$ , ГПа	$S_{xz}$ , МПа	$S_{xy}$ , МПа	$G_{xy}$ , ГПа
1200	112	207	8,5	73	118	4,6

Примечание:

t – толщина монослоя;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $X_t$ ,  $X_c$ ,  $Y_t$ ,  $Y_c$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{xz}$  – пределы прочности на растяжение, сжатие, сдвиг в соответствующих направлениях;  $E_+$ ,  $E_-$ ,  $G$  – модуль упругости на растяжение, сжатие, сдвиг;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – оси местной системы координат вдоль волокон, поперек во-локон, по высоте.

Нагружение выполнялось на электрогидравлической машине *MTS-50*. Нагрузка прикладывалась ступенчато до полного разрушения образцов. Локация сигналов АЭ осуществлялась в процессе нагружения, что позволило наблюдать зарождение и развитие усталостной трещины в образцах. На рисунке 2.7,*а* показана локация сигналов АЭ, зарегистрированных в области концентратора напряжения, в процессе нагружения.

При нагружении до нагрузки  $P = 160$  кН наблюдалась локация сигналов АЭ от отверстия к области расположения датчиков ПАЭ2 и ПАЭ3. Перед разрушением суммарное значение амплитуды всех локализованных сигналов АЭ было максимальным, что отражено в области локации (рисунке 2.7,*б*) красным цветом. Внешний осмотр образца (рисунок 2.7,*в*) показал, что между отверстием и датчиками ПАЭ 2, ПАЭ 3 произошло разрушение волокон всех монослоев (рисунок 2.7,*в*). При этом выполненная локация сигналов АЭ точно отражала процесс данного разрушения (рисунок 2.7,*а,б*).

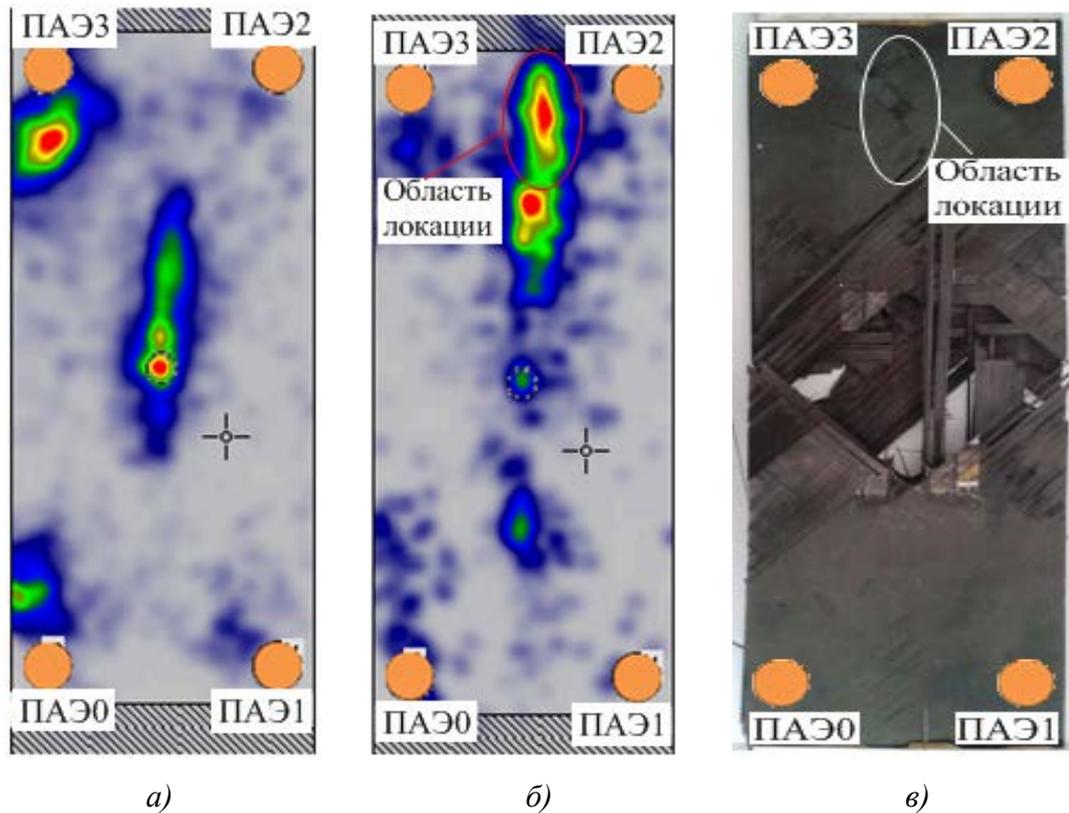


Рисунок 2.7 – Локация сигналов АЭ при нагрузке  $P=160$  кН (а); при разрушении образца (б); вид разрушенного образца (в)

### 3.2 Анализ изменения структуры сигналов акустической эмиссии с использованием вейвлет-преобразований при разрушении образцов из углепластика

Одним из методов анализа структуры АЭ-сигналов сложной формы, позволяющих осуществлять определение дефектов, является вейвлет-преобразование (ВП). С его использованием осуществляют частотно-временной анализ, который представляет собой разложение исходного сигнала по базису системы функций  $\varphi_{j,n}(x), \psi_{j,n}(x)$ , порожденному материнским вейвлетом  $\psi(x)$  [25, 83]. Обеспечивая локацию энергии сигнала по времени и частоте, ВП позволяет наблюдать закономерности распространения различных волновых мод и оценивать параметры сигнала с учетом особенностей волновой картины [7, 9, 79, 114].

Для анализа сигналов АЭ используются непрерывное и дискретное ВП. Непрерывное ВП функции  $f(x)$  является двумерным интегральным преобразованием. Оно вычисляется с использованием свертки сигнала с двухпараметрической вейвлетной функцией и записывается как [3, 10, 45, 64]:

$$CWT_{\psi}[f](a,b) = (f, \psi_{a,b}) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \quad a, b \in R, a \neq 0, \quad (2.2)$$

где  $\psi(x)$  – материнский вейвлет;

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) - \text{сдвиги и растяжения вейвлета};$$

$a, b$  – соответственно масштаб и смещение по оси времени вейвлета;

$R$  – множество рациональных чисел.

Применение дискретного ВП при обработке цифровой АЭ-информации позволяет сократить число выполняемых операций и объем требуемой памяти [3, 10, 45, 64]. При этом применяются дополнительные условия для материнского вейвлета. Распространенным случаем является вычисление значений формулы (2.2) только для масштаба  $a$  и смещения  $b$  вида:

$$a = 2^{-i}, \quad \frac{b}{a} = j, \quad i, j \in Z,$$

где  $Z$  – множество целых чисел.

Наилучшим аналогом непрерывного преобразования для дискретных сигналов являются вейвлет-фреймы, вычисляющиеся по формуле (2.2) для следующих значений масштаба  $a$  и смещения  $b$  по оси времени [64]:

$$a = 2^{-i}, \quad i \in Z, \quad b \in R.$$

При вычислении вейвлет-фреймов значения масштаба  $a$  выбираются так же, как для дискретного преобразования (вейвлеты соседних уровней являются масштабированными в два раза копиями друг друга). Однако при каждом значении масштаба разложение сигнала ведется по всем значениям смещения  $b$  по оси времени вейвлета, как в случае непрерывного преобразования [45, 64].

Для анализа изменения частотно-временной структуры сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении образцов из КМ, предложено определять структурный коэффициент. Для оценки модового состава зарегистрированных сигналов АЭ был введен структурный коэффициент вида [82]:

$$P_{Dij}(f) = \frac{\max D_i}{\max D_j}, \quad (2.3)$$

где  $D_i, D_j$  – наборы коэффициентов вейвлет-разложения  $i$ -го и  $j$ -го уровней детализации, полученные при частоте дискретизации исходного сигнала  $f = 2$  МГц.

Структурный коэффициент отражает энергию сигналов АЭ на одной частоте и позволяет определять их отличие от энергии на другой частоте. С использованием вейвлета Добеши четвертой степени исходный сигнал АЭ разделялся на четыре полосы частот. При этом использовались частоты (1000 – 500) кГц, которым соответствовал коэффициент детализации  $D_1$ , частотам (500 – 250) кГц соответствовал коэффициент детализации  $D_2$ , частоты (125 – 250) кГц

были для коэффициента детализации  $D_3$  и частоты (0 – 125) кГц - для коэффициента детализации  $D_4$ .

Детализация вычислялась как модуль вейвлет-преобразования на выбранной частоте. Для ускорения расчетов использовалось быстрое ВП [82]. При вычислении быстрого ВП применяются минимальный набор значений параметра смещения  $b$  по оси времени, достаточный для выполнения условия полного восстановления сигнала [10].

Уровни вейвлет-разложения вычислялись с использованием алгоритма Мала [10, 18], в результате которого сигнал АЭ преобразуется в набор вейвлет-коэффициентов разложения вида:

$$\{A_K, D_K, D_{K-1}, \dots, D_1\},$$

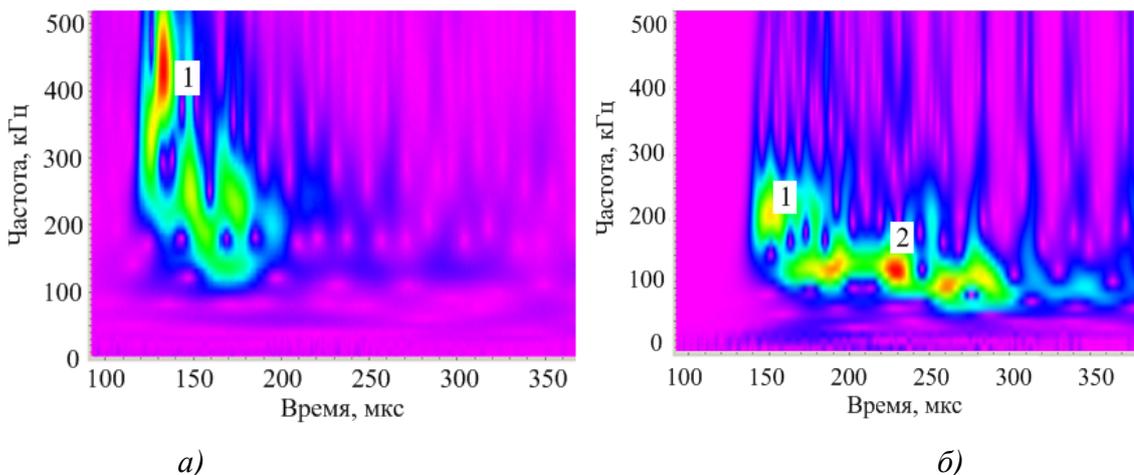
где  $D_j = \{d_{1j}, d_{2j}, \dots, d_{N^{(j)},j}\} = \{d_{i,j}\}$ ,  $0 < i < N^{(j)}$ ;

$j \leq K$  – коэффициенты уровня разложения  $j$ ;

$N^{(j)}$  – длина вектора коэффициентов вейвлет-разложения уровня  $j$ ;

$A_K = \{a_{1K}, a_{2K}, \dots, a_{N^{(K)},K}\} = \{a_{i,j}\}$  – масштабирующие коэффициенты уровня разложения  $K$ .

С применением методики локации были обработаны результаты испытаний образцов из углепластика на основе монослоя КМКУ с сотовым наполнителем ПСП1. Для определения соответствия между процессом разрушения образцов и данными АЭ-контроля выполнялся анализ структуры сигналов АЭ из различных областей локации с использованием непрерывного ВП. Для графического представления преобразования построены вейвлет-скалограммы, которые показывают изменение вейвлет-коэффициентов в частотно-временной плоскости (рисунок 2.8). Было использовано программное обеспечение *AGU-Vallen Wavelett*, где в качестве материнского вейвлета был применен дискретный аналог вейвлета Габора.



**Рисунок 2.8, 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

Локальный максимум расположен в области высоких частот. На рисунке 2.8,б приведена вейвлет-скалограмма сигнала АЭ, локализованного в области разрушения образца. Локальный максимум 1 на рисунке 2.8,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 2.8,а. Это означает, что сигналы АЭ из области концентратора напряжения, где произошло разрушение, структурно отличаются от сигналов, локализованных вне области разрушения.

Разработка методики локации дефектов в образцах из углепластика осуществлялась на основе ВП с вычислением структурного коэффициента  $P_D(f)$ . На рисунке 2.9,а показана локация сигналов АЭ при нагружении образца 1, а на рисунке 2.9,б – локация после фильтрации с использованием структурного коэффициента  $P_D(f) > 5$  и выполненной градации по энергетическому параметру

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

который является чувствительным и к амплитуде, и к длительности сигнала АЭ. Кроме того, он менее зависим от установленного амплитудного порога селекции и рабочей частоты [68].

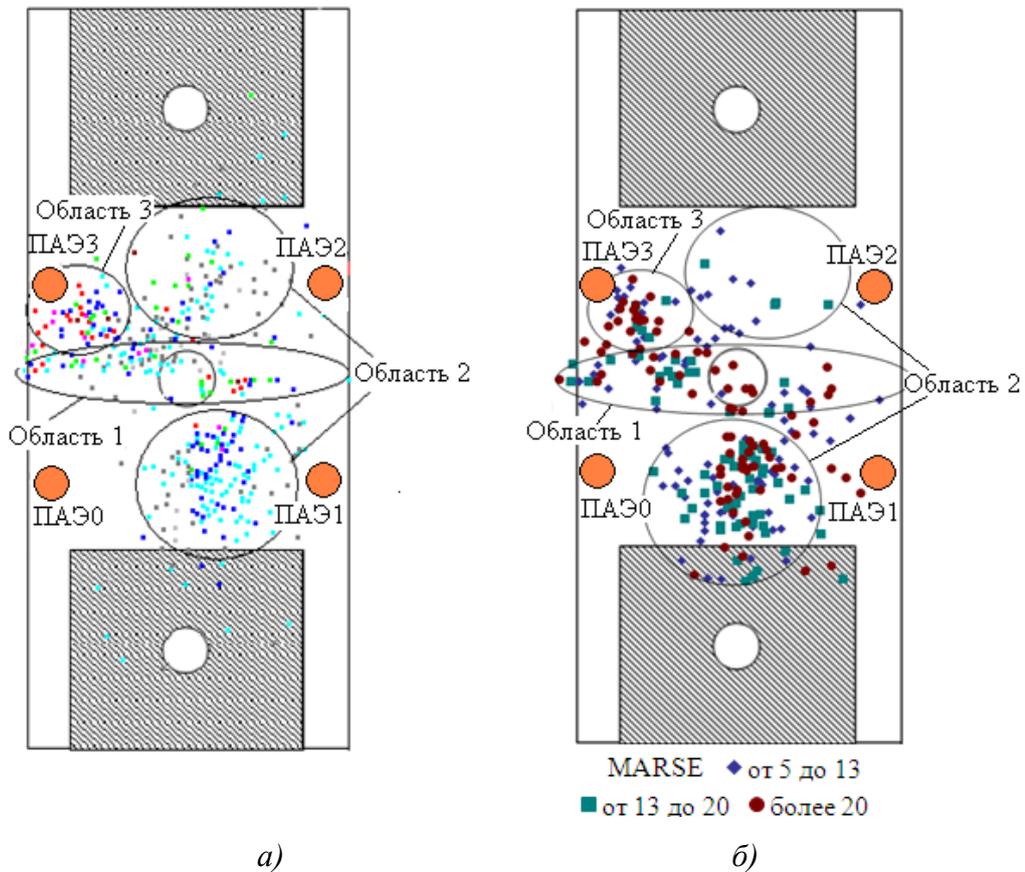
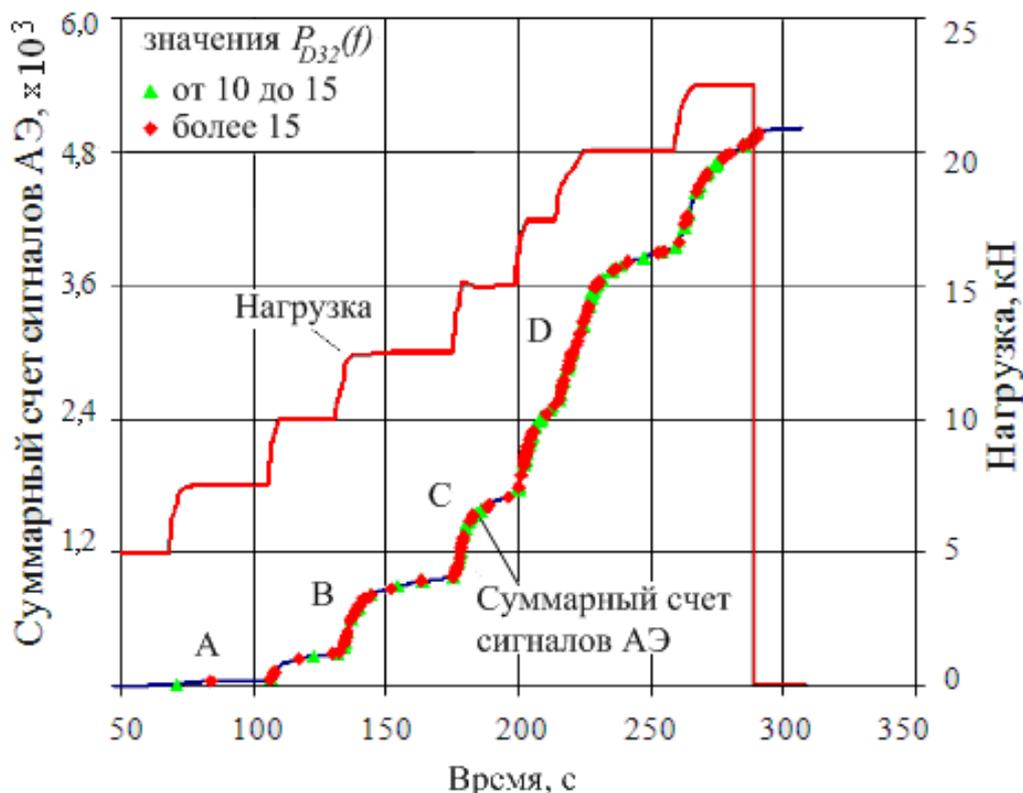


Рисунок 2.9, а – локация сигналов АЭ; б – локация сигналов АЭ

после фильтрации с использованием структурного коэффициента  $P_{D32}(f)$  и градации по энергетическому параметру  $MARSE$

На рисунке 2.10 показана экспериментальная зависимость изменения нагрузки и суммарного счета сигналов АЭ от времени. На зависимости суммарного счета отмечены сигналы с разными значениями структурных коэффициентов  $P_{D32}(f)$ , зарегистрированные во временных интервалах  $A, B, C, D$  и показана закономерность появления сигналов с различными значениями структурного коэффициента.

В начале нагружения образца из углепластика малыми нагрузками сигналы АЭ с высокими значениями структурного коэффициента  $P_{D32}(f)$ , отмеченные красным цветом, регистрируются либо во время, либо после увеличения нагрузки. Следовательно, расчет структурного коэффициента  $P_{D32}(f)$  при АЭ-контроле композитов может способствовать обнаружению дефектов на ранней стадии их развития. Анализ рисунков 2.9,б и 2.10 показал, что в зоне начинающегося разрушения образца были зарегистрированы сигналы АЭ, характеризующиеся высоким значением структурного коэффициента  $P_{D32}(f)$  и энергии.



**Рисунок 2.10 – Зависимость нагрузки и суммарного счета сигналов АЭ от времени на участках  $A, B, C, D$  разрушения образца при различных значениях структурного коэффициента  $P_{D32}(f)$**

Для фильтрации сигналов АЭ с одновременным учетом величины структурного коэффициента  $P_{D32}(f)$  и энергии  $MARSE$  рассчитывалось значение функционала вида  $F[P_{D32}(f), MARSE(f)]$  для каждого сигнала [82]:

$$F[P_{D32}(f), MARSE(f)] = \begin{cases} \frac{P_{D32}(f)}{G} + \frac{MARSE(f)}{H} - 1 & \text{при } \begin{matrix} P_{D32}(f) \geq G \text{ или} \\ MARSE(f) \geq H \text{ или} \\ \frac{P_{D32}(f)}{G} + \frac{MARSE(f)}{H} \geq \frac{3}{2} \end{matrix} \\ 0 & \text{при } \begin{matrix} P_{D32}(f) < G \text{ и} \\ MARSE(f) < H \text{ и} \\ \frac{P_{D32}(f)}{G} + \frac{MARSE(f)}{H} < \frac{3}{2} \end{matrix} \end{cases}, \quad (2.4)$$

где  $G = \zeta 0,75\{P_{D32}(f)\}$  – верхний квартиль для значений структурного коэффициента  $P_{D32}(f)$ ;  $H = \zeta 0,5\{MARSE(f)\}$  – медиана значений энергетического параметра  $MARSE$ .

Данный функционал рассчитывается для того, чтобы из анализа одновременно исключались сигналы АЭ с низкими значениями энергии  $MARSE$  и структурного коэффициента  $P_{D32}(f)$ , которые можно отнести к паразитным сигналам. Для таких сигналов величина функционала из формулы (2.4) равна нулю.

Преимущества использования оценки значимости сигналов АЭ по формуле (2.4) перед оценкой, выполняемой только по их энергии, заключается в возможности учета сигналов с малой амплитудой и высоким значением структурного коэффициента  $P_{D32}(f)$ . При отдельном рассмотрении сигналов с малым значением энергии  $MARSE$ , для которых структурный коэффициент  $P_{D32}(f)$  превысил установленное пороговое значение  $H$ , было отмечено, что они относятся к области разрушения рассматриваемых образцов. Однако при этом сигналы из-за малой амплитуды локализуются с большой погрешностью, что затрудняет их учет при выполнении автоматической диагностики. При этом часть таких сигналов регистрируется уже на первых этапах нагружения образца, до начала видимого процесса разрушения. Это позволяет повысить чувствительность метода АЭ.

В таблице 2.4 приводится общее количество сигналов АЭ и количество сигналов, локализованных в области разрушения образца. Для образцов (7 – 10), выполненных с концентраторами в виде трех отверстий и пропила, область разрушения совпадала с положением концентраторов. Образцы (3 – 6) разрушились в области захватов нагружающего устройства. Для образцов, разрушившихся в области концентратора, доля сигналов из зоны разрушения, для которых значение функционала отлично от нуля, достигает 84 %.

Среди всех зарегистрированных сигналов АЭ процент сигналов с ненулевым значением функционала  $F$  для образцов с разрушением по концентратору, составляет (67,3 – 74,4) %. Следовательно, использование данного функционала позволяет отсеять часть сигналов, не несущих полезной информации, и выделить сигналы АЭ от реального дефекта. С повышением порогово-

го значения функционала  $F$  превышение процента сигналов из области разрушения над общим числом выделенных сигналов возрастает для всех образцов с разрушением по концентратору.

**Таблица 2.4 – Количество сигналов АЭ, зарегистрированных при испытаниях образцов из КМ**

Но- мер образ- ца	Количество кон- центраторов напряжения. Область раз- рушения	Количество сигналов АЭ					
		Зарегистрированных			Локализованных из области разрушения		
		Всего	Функционал $F>0$	Функционал $F>2$	Всего	Функционал $F>0$	Функционал $F>2$
1	Один концентратор напряжения.	5210	3524 (67,6%)	2275 (43,6%)	281	209 (74,3%)	71 (25,3%)
2	Разрушение в области концентратора	10264	7398(72%)	2196(21,4%)	378	256(67,7%)	116(30,9%)
3	Один концентратор напряжения.	5000	3783(75,7%)	1128(22,6%)	2520	1907(75,7%)	560(22,2%)
4		6100	4722(77,4%)	1503(24,6%)	2837	2441(86,0%)	915(32,3%)
5	Разрушение в области нижнего захвата	2720	1830(67,3%)	715(26,3%)	493	367(74,4%)	167(33,9%)
6		8320	5830 (70,1%)	2111 (25,4%)	2921	2402 (82,2%)	1037 (35,5%)
7	Три концентратора. Разрушение в области концентраторов	360	268(74,4)%	94((26,1%)	208	175(84.1%)	83(39.9%)
8		490	275(56,1%)	134(27,3%)	299	224(74,9%)	100(33,4%)
9		330	242(73,3%)	73(22,1%)	248	191(77,0%)	65(26,2%)
10		890	738(82,9%)	301(33,8%)	323	270(83,6%)	163(50,5%)

Для образцов с разрушением в области захватов наблюдается аналогичная картина, за исключением образца 1, на локационной картине которого присутствует большое количество сигналов, как с верхнего, так и с нижнего захватов (рисунок 2.9).

### 3.3 Кластерный анализ сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных при статическом нагружении образцов из углепластика

Для локации дефектов применяют кластеризацию либо по оцифрованной форме, либо по набору основных параметров сигналов АЭ (локация, доминантная частота, число осциллиций, скорость нарастания огибающей переднего фронта) [3, 5, 38, 73, 92].

Кластеризация сигналов по оцифрованной форме наиболее полно характеризует описываемый сигнал АЭ. Максимум коэффициента корреляции двух сигналов определяли как [3]:

$$R_{i,k} = \max_a \frac{\sum_{l=1}^S U_{m_i}^l \cdot U_k^{l+a}}{\sqrt{\sum_{l=1}^S (U_{m_i}^l)^2 \cdot \sum_{l=1}^S (U_k^{l+a})^2}},$$

где  $R_{i,k}$  – коэффициент корреляции «текущий сигнал – опорный сигнал кластера»;

$U_k^l$  – отсчет с индексом  $l$  текущего сигнала АЭ с номером  $k$ ;

$U_{m_i}^l$  – отсчет с индексом  $l$  опорного сигнала АЭ;

$S$  – количество отсчетов в «окне» расчета корреляции;

$a$  – смещение, в пределах которого рассчитывается коэффициент корреляции  $R_{i,k}$ .

Если рассчитанный коэффициент корреляции  $R_{i,k}$  превышает заранее заданное пороговое значение, то исследуемое событие относится к текущему кластеру. При расчете корреляционной функции сравнивают два сигнала [23].

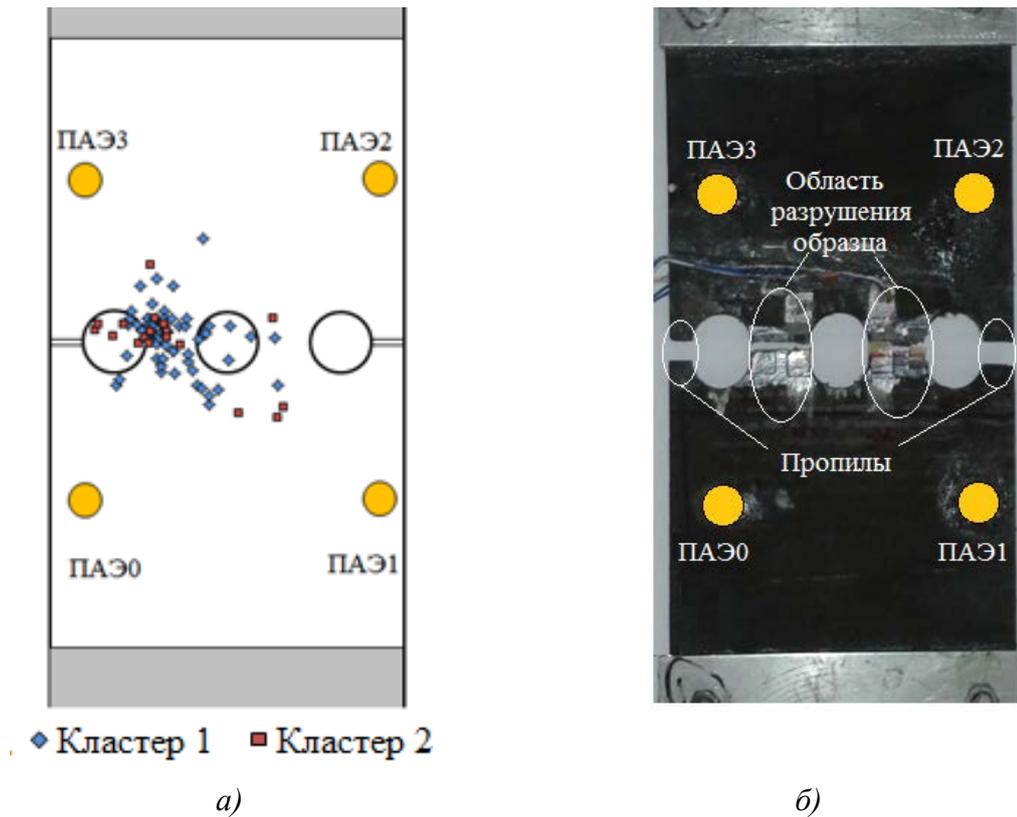
На рисунке 2.11,*a* показана локация сигналов АЭ с использованием кластеризации с пороговым значением коэффициента корреляции, равным  $R_{i,k} = 0,5$ . При расчете корреляционной функции сравнение базового сигнала АЭ выполнялось не только по первому принявшему каналу, но и по следующему (дополнительному), что позволило более детально проводить анализ.

Как показал анализ, в кластере 1 были сгруппированы сигналы с амплитудой  $U = (60 - 100)$  мВ и временем нарастания переднего фронта  $t_{нар} = (15 - 30)$  мкс. В кластере 2 амплитуда сигналов составила  $U = (130 - 600)$  мВ и время нарастания  $t_{нар} = (11 - 13)$  мкс. Сигналы кластеров 1 и 2 были зарегистрированы при нагрузке  $P = 15$  кН.

Кластеризация по набору основных параметров сигналов АЭ проводилась в два этапа [23, 73]. На первом этапе осуществлялась их группировка по координатам, а на втором – по выбранному набору основных параметров. Предполагается, что при локации сигналы от одного источника должны располагаться близко друг к другу. Первый из зарегистрированных сигналов выбирается в качестве базового. При определении последующих кластеров в качестве базовых выбираются те сигналы, которые не отнесены к тому или иному кластеру.

Для оценки принадлежности каждого из сигналов, прошедших первый этап кластеризации, к тому же кластеру, что и базовый, значения его четырех выбранных основных параметров поочередно сравнивались с параметрами базового сигнала. Если значения всех параметров

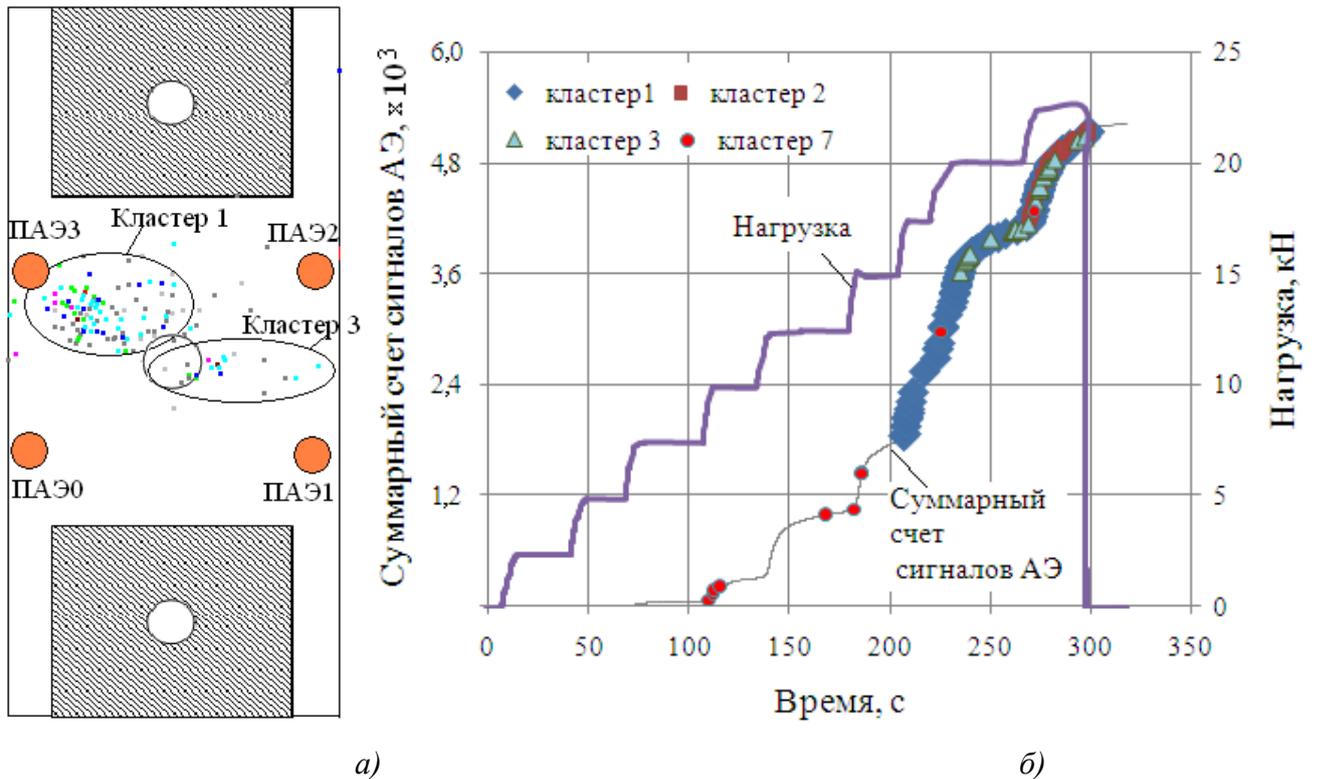
сравниваемого сигнала АЭ близки к значениям базового сигнала, то считалось, что они принадлежат к одному кластеру.



**Рисунок 2.11 – Локация сигналов АЭ, зарегистрированных в процессе нагружения образца 9 (а) и его внешний вид после разрушения (б)**

Для анализа результатов кластеризации по набору основных параметров на графике зависимости суммарного счета и нагрузки от времени, построенного для всех зарегистрированных сигналов, были выделены сигналы, которые были распределены в кластеры 1 – 3 и 7 (рисунок 2.12).

В кластер 1 были отнесены сигналы, локализованные в области ударного воздействия образца (рисунок 2.12,а). На графике зависимости суммарного счета от времени (рисунок 2.12,б) сигналы данного кластера располагались во временном интервале  $\Delta t = (210 \dots 300)$  с, что соответствовало нагрузке  $P = (15 \dots 22,5)$  кН. Кроме того, в данной области были локализованы сигналы кластера 7, зарегистрированные в начале испытания при нагрузке  $P = (7,5 \dots 10)$  кН. Сигналы кластера 2 были зарегистрированы при выдержке под нагрузкой  $P = 22,5$  кН (рисунок 2.12,б) и локализованы в области расположения кластера 1 (рисунок 2.12,а). Сигналы, зарегистрированные в области концентратора напряжения между датчиками ПАЭ 1 и ПАЭ 2 при нагрузке  $P = (20 \dots 22,5)$  кН, были определены в кластер 3 (рисунок 2.12,а). Таким образом, было образовано несколько кластеров в области концентратора напряжения и в области ударного воздействия образца.



**Рисунок 2.12 – Локация сигналов кластеров 1 и 3 (а); зависимость суммарного счета сигналов АЭ и нагрузки от времени для образца 1 (б)**

### 3.4 Разработка методики локации дефектов в образцах из углепластика с различными типами укладки монослоев с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии

Механические свойства углепластиков в значительной мере определяются свойствами армирующих волокон и типом укладки. При оптимальном армировании углепластиков обеспечивается некоторое регулирование их свойств, при котором могут изменяться прочностные характеристики материала. Максимальные прочностные характеристики композитов на основе углепластиков создаются за счет использования соответствующей схемы армирования, выбором укладки армирующих волокон и количества слоев, обеспечивающих необходимые свойства.

В исследованных образцах были использованы монослои, выполненные на основе волокна *Toray T700*. Проведены испытания образцов размером 500x100 мм с различной толщиной и типом укладки армирующих монослоев. В схеме укладки обозначение 0 соответствует монослоям, вдоль которых производилось нагружение. Обозначения  $+45^\circ$ ;  $-45^\circ$ ;  $90^\circ$  соответствует углам, под которыми расположены армирующие монослои относительно нулевого. Образцы были объединены в четыре группы. В таблице 2.5 приведены типы укладки, количество монослоев, значения разрушающей нагрузки и вид концентратора напряжений для всех групп испы-

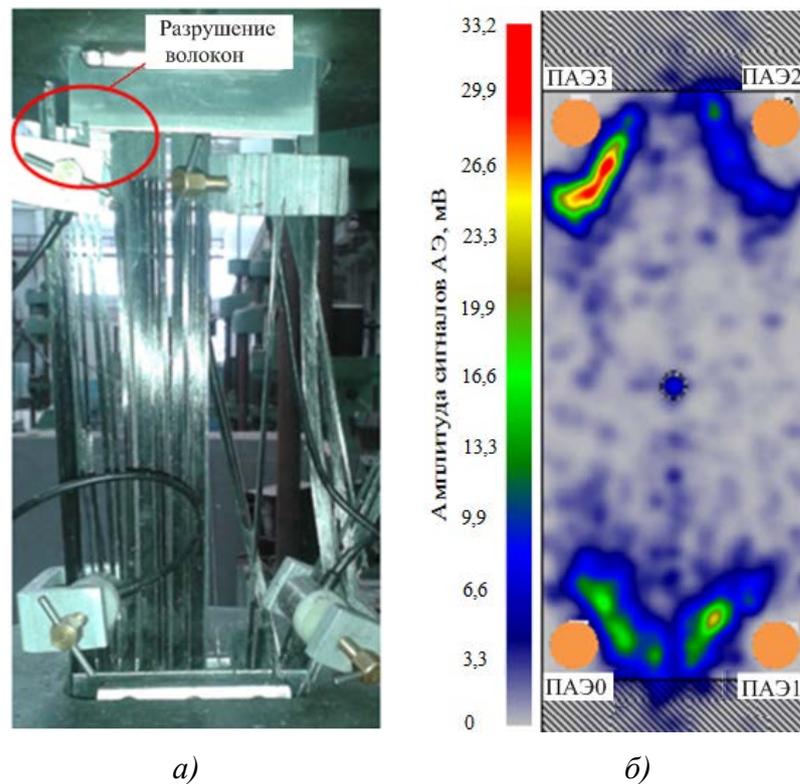
танных образцов [91]. Нагружение образцов проводили на электрогидравлической машине *MTS-50*.

**Таблица 2.5 – Основные характеристики образцов из углепластика Т700 и параметры сигналов АЭ, полученных при статическом нагружении**

Номер группы	Номер образца	Вид укладки	Вид концентратора	Разрушающая нагрузка, кН	Суммарный счет сигналов АЭ $\times 10^3$	Нагрузка, при которой началась регистрация сигналов АЭ, кН
1	1	Однонаправленная укладка. 8 монослоев Толщина 1,5 мм	Нет концентратора	299	9,342	1
	2			287 ( $\Delta P=10$ )	7,259	10
	3			309	8,184	1
2	1	Укладка [ $\pm 45/90/0_6/90/\pm 45$ ] 12 монослоев Толщина 2,3 мм	Ударное повреждение	200 ( $\Delta P=10$ )	10,835	10
	2			275 ( $\Delta P=10$ )	24,118	10
	3			218 ( $\Delta P=10$ )	24,140	10
	4		Отверстие $d=14$ мм	190 ( $\Delta P=10$ )	19,05	10
	5			220 ( $\Delta P=10$ )	20,0	10
	6			180 ( $\Delta P=10$ )	16,94	10
3	1	Укладка [ $\pm 45/90/0_3/90/\pm 45$ ] 9 монослоев Толщина 1,7 мм	Отверстие $d=14$ мм	93,4	3,547	4
	2			97,9 ( $\Delta P=5$ )	7,276	5
	3			120 ( $\Delta P=10$ )	13,25	10
4	1	Укладка [ $\pm 45/90/0/90/\pm 45$ ] 7 монослоев Толщина 1,3 мм	Отверстие $d=14$ мм	40,4 ( $\Delta P=5$ )	1,803	5
	2			48,5 ( $\Delta P=5$ )	4,653	5
	3			41 ( $\Delta P=5$ )	2,404	5

Группу 1 составляли три образца без концентратора напряжений, выполненные из восьми нулевых слоев с однонаправленной укладкой армирующих волокон (рисунок 2.13,а). В процессе исследований образцов группы 1 были определены скорости распространения сигналов АЭ вдоль ( $C_1 = 8,3$  мм/мкс) и поперек ( $C_2 = 3,3$  мм/мкс) волокон. Локация сигналов АЭ наблюдалась на всей рабочей области образцов. В зоне захватов было локализовано большое число сигналов АЭ с высоким значением амплитуды.

При нагружении образца в области расположения ПАЭ 3 произошло разрушение армирующих монослоев (рисунок 2.13,а), что подтверждено на рисунке 2.13,б появлением локации с максимальным значением суммарной амплитуды.



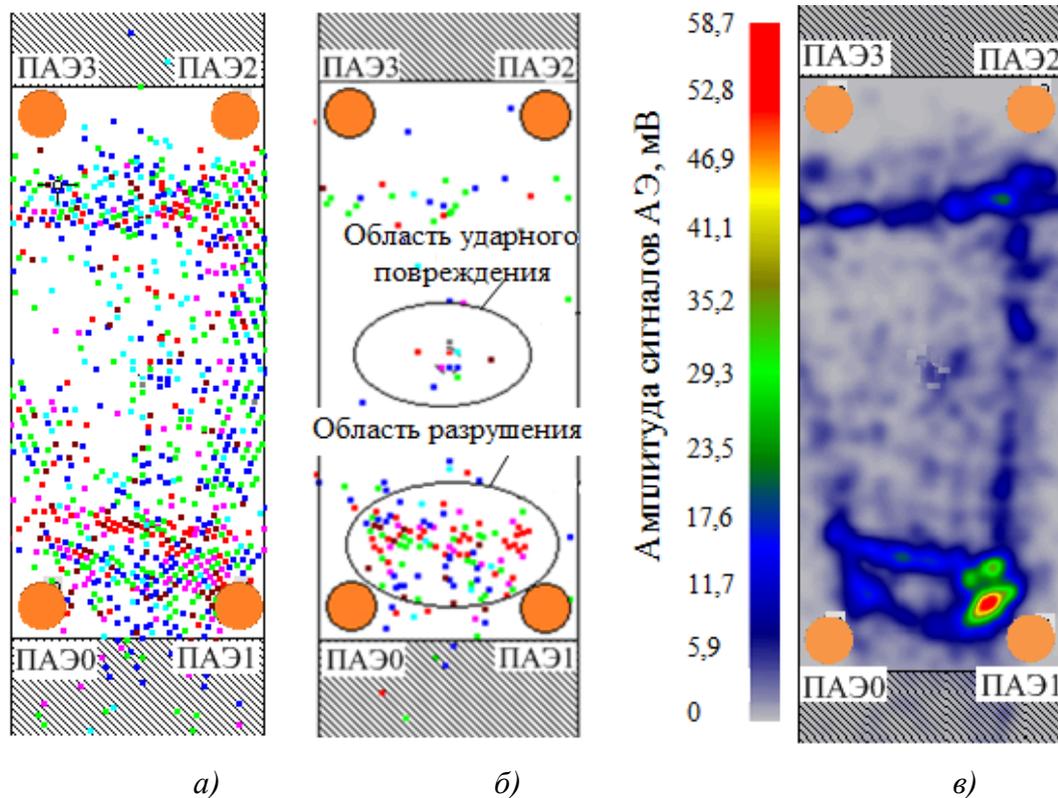
**Рисунок 2.13 – Внешний вид образца группы 1 после разрушения (а); суммарная амплитуда локализованных сигналов АЭ (б)**

В группу 2 были объединены шесть образцов с укладкой из двенадцати слоев  $[\pm 45/90/0_6/90/\pm 45]$ , шесть из которых были однонаправленными нулевыми и были расположены в центре образца. При испытании образцов группы 2 нагрузку изменяли ступенчато через  $\Delta P = 10$  кН. На три образца группы 2 предварительно было нанесено ударное повреждение, а оставшиеся три образца были выполнены с концентратором напряжений в виде отверстия диаметром  $d = 14$  мм.

В начале нагружения первого образца из группы 2 с ударным повреждением сигналы локализовались в зоне нижнего и верхнего захватов. Общее число зарегистрированных сигналов АЭ составило  $N = 10\,835$ , из которых 1112 сигналов были локализованы в области ударного повреждения. Первые сигналы АЭ из этой области локализованы при нагрузке  $P = 40$  кН. Ак-

тивная локация из области ударного повреждения появилась при повышении нагрузки до  $P = 70$  кН. Разрушение образца произошло в зоне нижнего захвата при нагрузке  $P = 200$  кН.

В процессе нагружения второго образца группы 2 сигналы регистрировались АЭ-системой в режиме реального времени и локализовались по всему образцу (рисунок 2.14,а). В начале нагружения сигналы также локализовались из зоны захватов. При нагрузке  $P = 40$  кН, составляющей 14,5 % от разрушающей, первые сигналы АЭ были локализованы в области ударного повреждения (рисунок 2.14,б). Активная локация наблюдалась при превышении нагрузкой  $P = 70$  кН. Анализ локации сигналов на рисунке 2.14,в показал, что наиболее активный источник высокоамплитудных сигналов расположен в области установки ПАЭ1, где в дальнейшем произошло разрушение данного образца. В этой области было локализовано 2617 сигналов АЭ.



**Рисунок 2.14 – Локация сигналов АЭ в процессе нагружения второго образца группы 2 (а); локация при нагрузке  $P = 40$  кН (б); внешний вид зоны активного разрушения образца (в)**

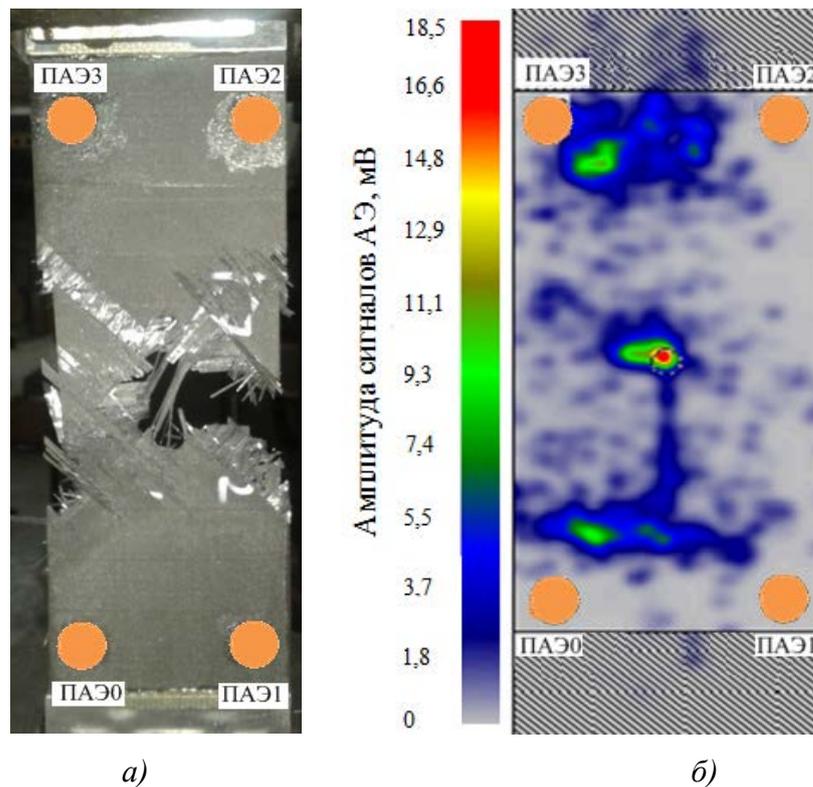
Анализ суммарного счета сигналов АЭ для первого и третьего образцов группы 2 показал, что число локализованных сигналов АЭ в области ударного повреждения соответственно равны  $N_1 = 1112$  и  $N_3 = 1348$ . Разрушающая нагрузка для этих образцов составила  $P_1 = 200$  кН и  $P_3 = 218$  кН (таблица 2.5). При нагружении второго образца группы 2 разрушение произошло при нагрузке  $P = 275$  кН, а в области ударного повреждения было локализовано  $N_2 = 3435$  сигналов, что в два раза больше, чем в первом и третьем образцах данной группы.

Далее были испытаны три образца группы 2 с концентратором напряжений в виде отверстия диаметром  $d = 14$  мм. В процессе нагружения при нагрузке  $P = (70 - 80)$  кН был слышен

треск. Разрушения образцов произошло в области концентратора напряжений при среднем значении нагрузки  $P = 200$  кН.

Три образца группы 3 обладали концентратором напряжения в виде отверстия диаметром  $d = 14$  мм с укладкой из девяти монослоев  $[\pm 45/90/0_3/90/\pm 45]$ . При этом три слоя обладали однонаправленной нулевой укладкой армирующих волокон. Первый образец этой группы нагружался монотонно, а второй и третий – ступенчато с интервалами соответственно  $\Delta P_2 = 5$  кН и  $\Delta P_3 = 10$  кН.

Образцы группы 3 также разрушились в области концентратора напряжения, где наблюдалась устойчивая локация сигналов АЭ (рисунок 2.15, а, б). При достижении нагрузки  $P = 25$  кН, составляющей 25 % от разрушающей, были локализованы сигналы АЭ как при монотонном, так и при ступенчатом нагружении. При нагрузке  $P = 50$  кН, составляющей 50 % от разрушающей, активность сигналов АЭ увеличилась. При этом осуществлялась их локация не только из области концентратора напряжений, но и по всей рабочей области образца, что отражало процесс его разрушения (рисунок 2.15, б). Разрушающая нагрузка составила  $P = 100$  кН.



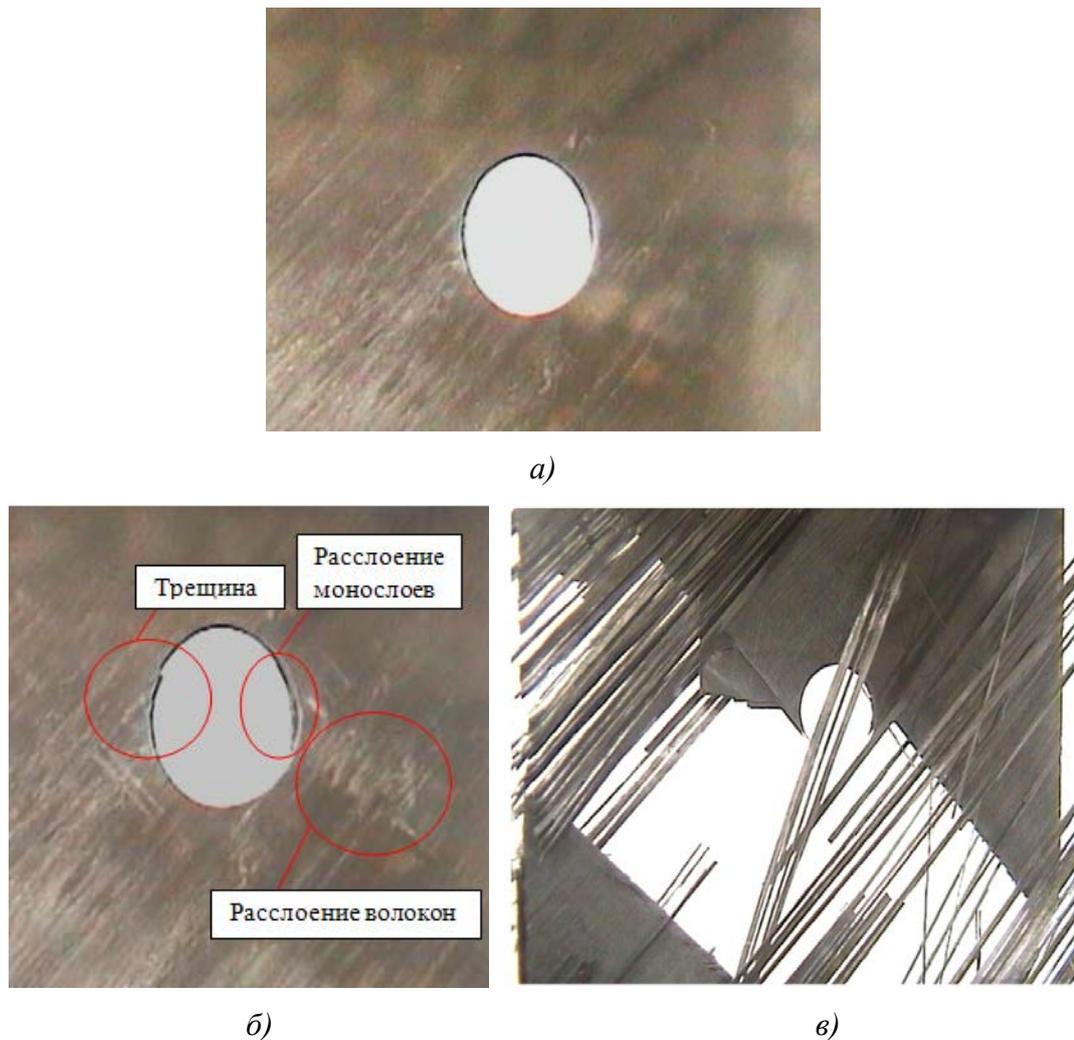
**Рисунок 2.15 – Внешний вид разрушенного образца группы 3 (а); распределение локализованных сигналов АЭ в зоне разрушения образца (б)**

Группу 4 составляли три образца с укладкой из семи монослоев  $[\pm 45/90/0/90/\pm 45]$  с отверстием  $d = 14$  мм. Один монослой обладал однонаправленной нулевой укладкой армирующих волокон. Их нагружение осуществлялось ступенчато через  $\Delta P = 5$  кН.

При нагружении трех образцов группы 4 локация сигналов из области отверстия началась при нагрузке  $P = (15 - 25)$  кН, что составляло 50 % от разрушающей. При достижении

нагрузки  $P = 25$  кН был слышен треск, который свидетельствовал о процессе разрушения монослоев.

Для регистрации процесса разрушения образцов была установлена сетевая камера *AXIS 213 PAL PTZ* со встроенным 26-кратным оптическим, 12-кратным цифровым увеличением. Информация с камеры передавалась в компьютер. На рисунке 2.16,*а* показан снимок отверстия образца 1 группы 4, полученный до его нагружения. Процесс его разрушения приведен на рисунке 2.16,*б,в*.



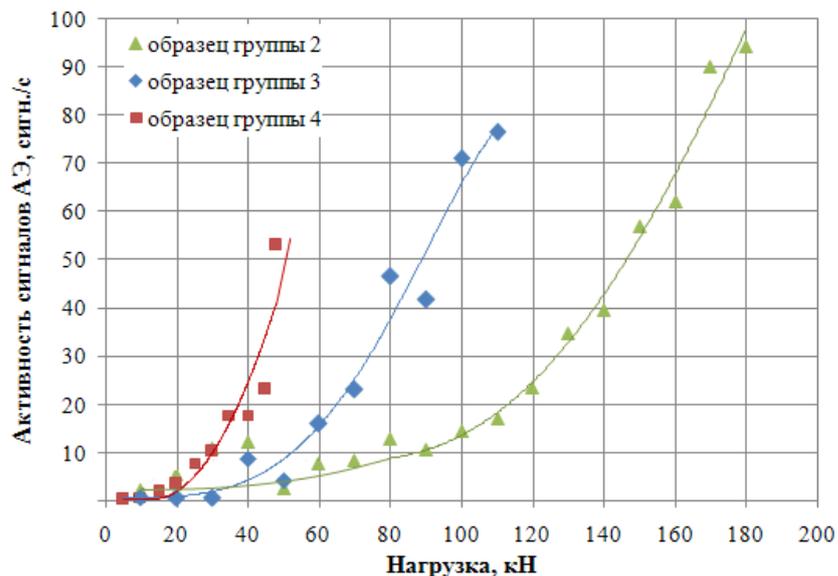
**Рисунок 2.16 – Внешний вид концентратора напряжения образца 1 группы 4 перед нагружением (а); б – при появлении трещины в районе кромки отверстия; в – при разрушении связующего**

Было установлено, что полному разрушению образца 1 группы 4 предшествовало расслоение монослоев, расположенных под углами  $+45^\circ$  и  $-45^\circ$ . Затем наблюдалось появление трещин в районе кромки отверстия (рисунок 2.16,*б*). При разрушении происходило расслоение волокон монослоев  $+45^\circ$ , разрушалось связующее, а волокна оставались целыми (рисунок 2.16,*в*). Образец разрушился под углом  $-45^\circ$  к направлению приложения нагрузки в области отверстия. Волокна монослоев  $-45^\circ$  остались целыми. В процессе испытаний образец в течение  $\Delta t = 60$  с

выдерживался под нагрузкой  $P = 35$  кН. При этом в области отверстия видимые разрушения не регистрировались. Однако при увеличении нагрузки до  $P = 40$  кН наблюдалось быстрое расслоение волокон монослоев с укладкой  $\pm 45^\circ$  с последующим разрушением нулевого монослоя. Таким образом, для данной группы образцов среднее значение нагрузки, при которой происходило разрушение как связующего, так и нулевого монослоя, составило  $P = 43$  кН.

Для анализа процесса регистрации сигналов АЭ при испытании образцов с отверстием была определена их активность на каждой ступени нагружения. Анализ регистрации сигналов АЭ от нагрузки (рисунок 2.17) показывает, что резкое увеличение активности сигналов АЭ (независимо от типа укладки армирующих монослоев) начиналось при нагрузке, составляющей около 50 % от разрушающей. Уменьшение количества нулевых однонаправленных монослоев в укладке исследуемых образцов приводило к снижению нагрузочной способности образца.

На рисунке 2.17 показаны графики зависимости активности сигналов АЭ от нагрузки для образцов 2, 3 и 4 групп. При нагружении образцов группы 2 активность начала значительно увеличиваться после приложения нагрузки более  $P = 100$  кН, а при нагружении образцов группы 3 – при нагрузке  $P = 50$  кН. Следовательно, образцы группы 2 выдерживали нагрузку, при которой начинался процесс разрушения, в два раза большую. Образцы группы 4 выдерживали минимальную нагрузку, так как они обладали одним однонаправленным монослоем, вдоль которого выполнялось нагружение. Активность сигналов АЭ начала увеличиваться при нагрузке  $P = 20$  кН.

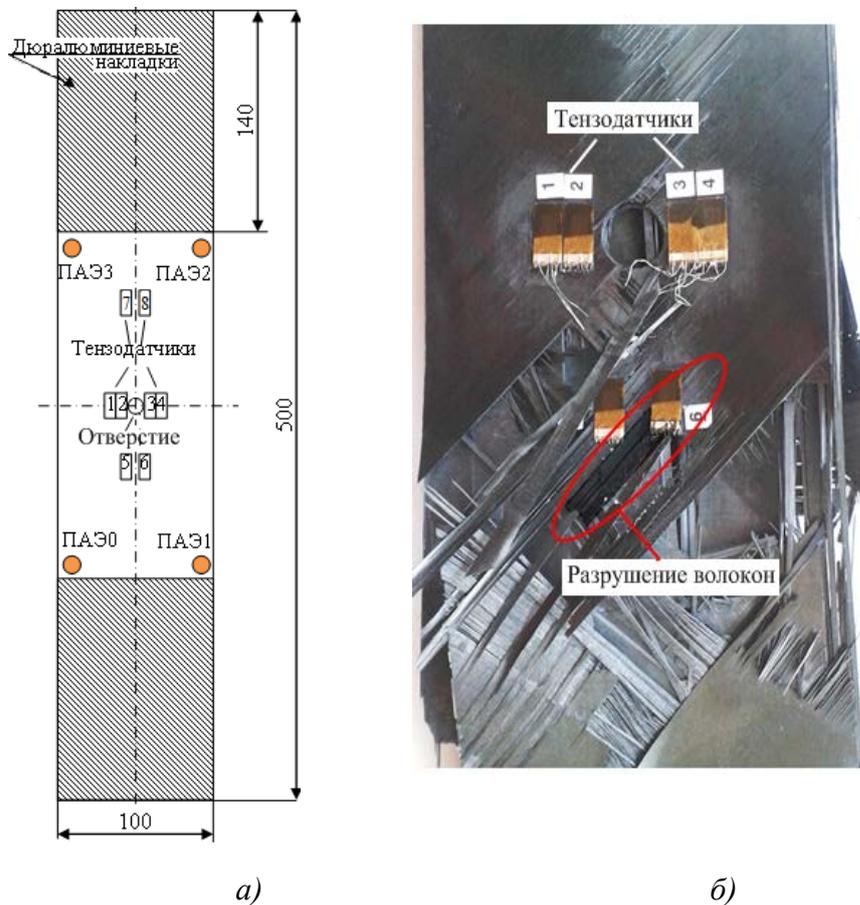


**Рисунок 2.17 – Зависимость активности сигналов АЭ от нагрузки при испытании образцов 2, 3, 4 групп**

При нагружении образцов с укладкой из двенадцати слоев с ударным повреждением в качестве концентратора напряжений локация сигналов АЭ начиналась при нагрузке  $P = (0,14 - 0,16) \cdot P_{разр}$ , где  $P_{разр}$  – разрушающая нагрузка. В таких же образцах, но с отверстием диаметром

$d = 14$  мм локация проходила при нагрузке  $P = (0,20 - 0,22) \cdot P_{разр}$ . В образцах с укладкой из девяти монослоев с отверстием диаметром  $d = 14$  мм локация осуществлялась при нагрузке  $P = (0,25 - 0,27) \cdot P_{разр}$ .

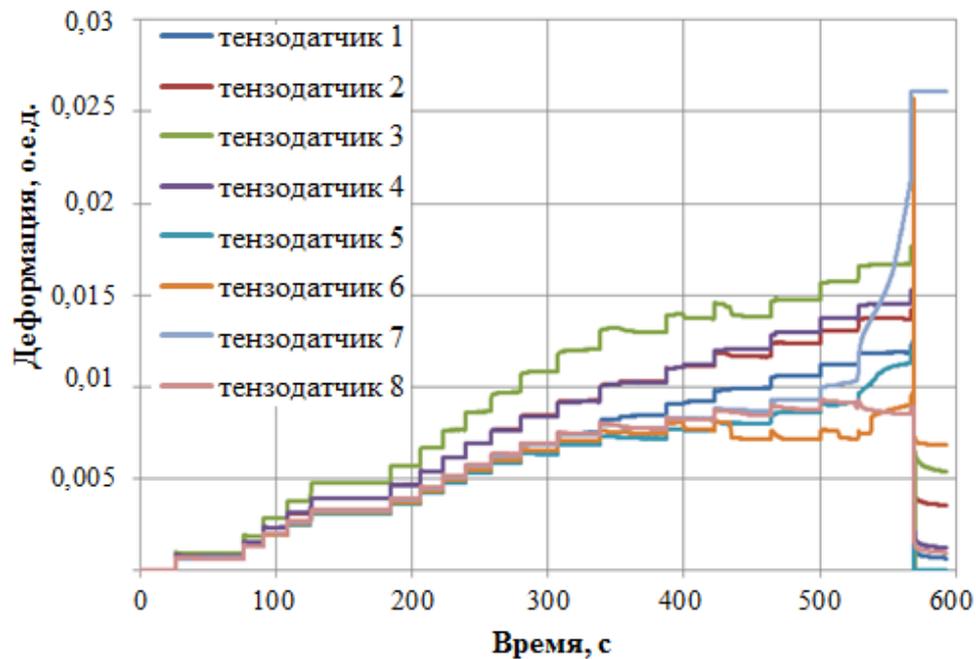
Для измерения деформации шестого образца группы 2 на него наклеивалось восемь проволочных тензодатчиков типа ПКС (рисунок 2.18,а). Изменение деформации от времени в процессе нагружения исследуемого образца (рисунок 2.18,а) происходило пропорционально приложенной нагрузке до  $P = 130$  кН (рисунок 2.19). Далее наблюдался нелинейный характер изменения деформации в области расположения всех тензодатчиков. Максимальные деформации были зарегистрированы в области наклейки тензодатчиков 3 и 2, расположенных ближе всего к кромке отверстия. При этом значении деформация тензодатчиков 2 и 4 изменялась линейно до нагрузки  $P = 130$  кН. Затем характер изменения деформации образца в области расположения тензодатчика 4 изменился на нелинейный (рисунок 2.19).



**Рисунок 2.18 – Геометрические размеры образца с установленными ПАЭ и тензодатчиками (а); внешний вид разрушенного образца 6 группы 2 (б)**

Деформация образца в области наклейки тензодатчика 6 снижалась до 0,0072 относительных единиц деформации (о.е.д.) после превышения нагрузки  $P = 140$  кН и выдержке на каждой ступени после ее увеличения на  $\Delta P = 10$  кН. Осмотр образца после испытаний показал, что волокна, на которых был наклеен тензодатчик 6, разрушились (рисунок 2.18,б). Тензодат-

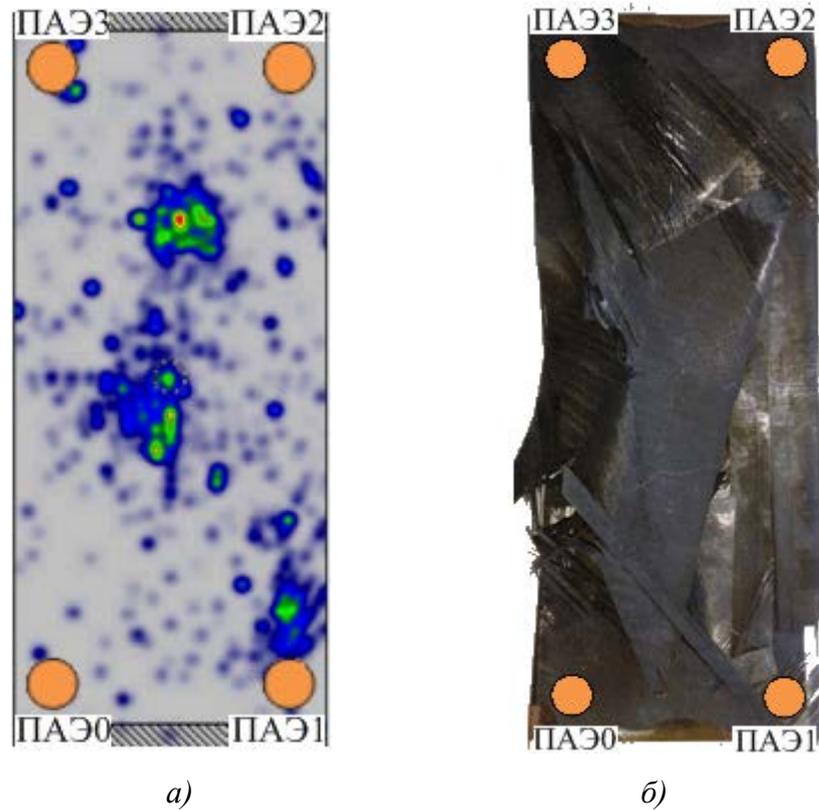
чик 5 был расположен на неразрушенных волокнах, поэтому при нагружении образца его деформация увеличивалась при повышении нагрузки.



**Рисунок 2.19 – Зависимость изменения деформации от времени при нагружении образца 6 группы 2**

Деформация шестого образца в области наклейки тензодатчиков 7 и 8 прекратила изменяться при достижении нагрузки  $P = 170$  кН, что соответствовало его разрушению в данной области. Таким образом, при нагружении образца из углепластика происходило разрушение не только в области концентратора напряжений, но и на отдельных участках верхних монослоев в рабочей зоне (рисунок 2.18,б). Проведенное тензометрирование позволило отслеживать данные разрушения и связывать их с показаниями АЭ-системы.

Локация сигналов АЭ в области отверстия образца 6 началась при нагрузке  $P = 40$  кН, а при увеличении нагрузки до  $P = 110$  кН наблюдалось смещение локализованных сигналов АЭ от отверстия в область расположения датчиков ПАЭ2 и ПАЭ3 (рисунок 2.20,а), что соответствовало распространению расслоения монослоев образца. Область с максимальной суммарной амплитудой (рисунок 2.20,а) характеризовала процесс разрушения волокон со стороны образца, где была установлена пьезоантенна, и начала появляться при нагрузке  $P = 170$  кН (рисунок 2.20,б). В режиме реального времени с использованием метода АЭ и тензометрии было зарегистрировано зарождение и распространение разрушения от отверстия и момент разрыва волокон в верхней части образца (рисунок 2.18,б) в области установки ПАЭ 3 и ПАЭ3 (рисунок 2.20,б).



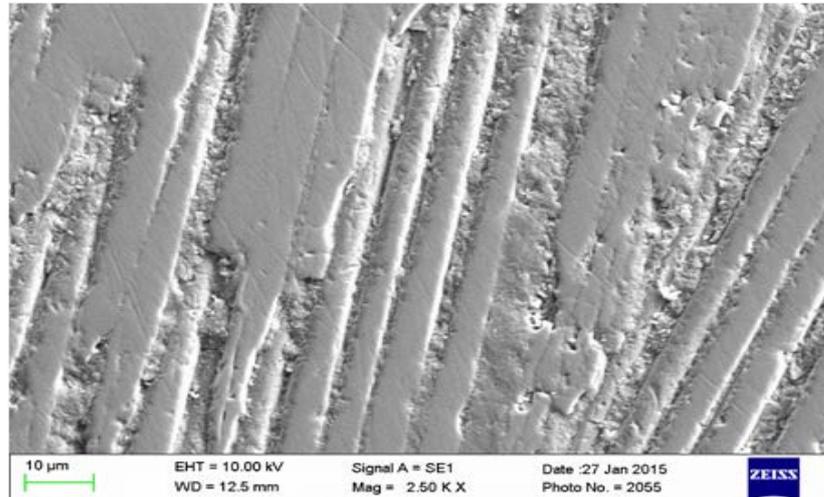
**Рисунок 2.20 – Локация сигналов АЭ при разрушении образца 6 группы 2 (а); вид разрушенного образца со стороны установки пьезоантенны (б)**

### **3.5 Исследование процесса разрушения образцов из углепластика при статическом нагружении с использованием метода акустической эмиссии и фрактографии**

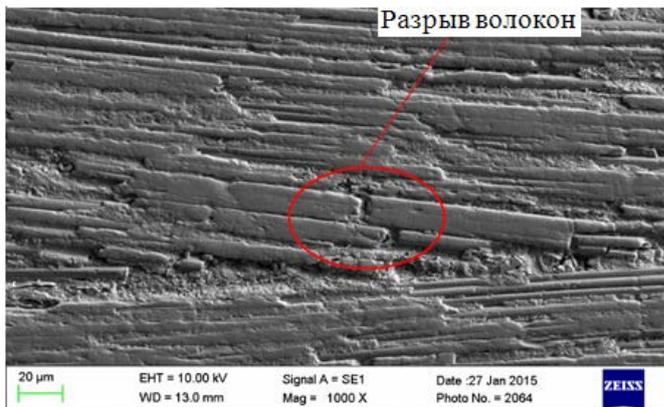
Определение наличия разрушений на ранней стадии, когда дефекты не вышли на поверхность осуществляют с использованием фрактографического анализа. Он позволяет выявлять микродефекты, размеры которых сопоставимы с размерами волокон. Однако данный вид контроля нельзя назвать неразрушающим, так как для получения результатов необходимо разрезать исследуемый объект. Поэтому необходима методика контроля, которая позволит устанавливать момент появления разрушений и оценивать степень их опасности в режиме реального времени. Применение метода АЭ при испытаниях образцов из углепластика показали, что локация сигналов АЭ из области концентраторов начиналась при нагрузках, составляющих 15 % от разрушающих. Для определения связи параметров локализованных сигналов и процесса разрушения проведены фрактографические исследования образцов, проконтролированных методом АЭ.

Для анализа возможности обнаружения разрывов волокон и растрескивания матрицы на ранней стадии в исследуемом углепластике была выполнена фрактография сотового образца

(рисунок 2.4) после его испытания до разрушения (рисунок 2.21). Исследования проводились на растровом электронном микроскопе *Carl-Zeiss EVO 50 XVP*. Были изготовлены шлифы из материала областей захватов нагружающей машины *MTS-10*, условно принятые за бездефектные, и отверстия. Перед исследованием они полировались с использованием алмазных суспензий и готовились таким образом, чтобы в исследуемое сечение попадал только внешний несущий слой. Для повышения поверхностной проводимости шлифы напылялись тонким слоем (~20 нм) меди.



a)



б)



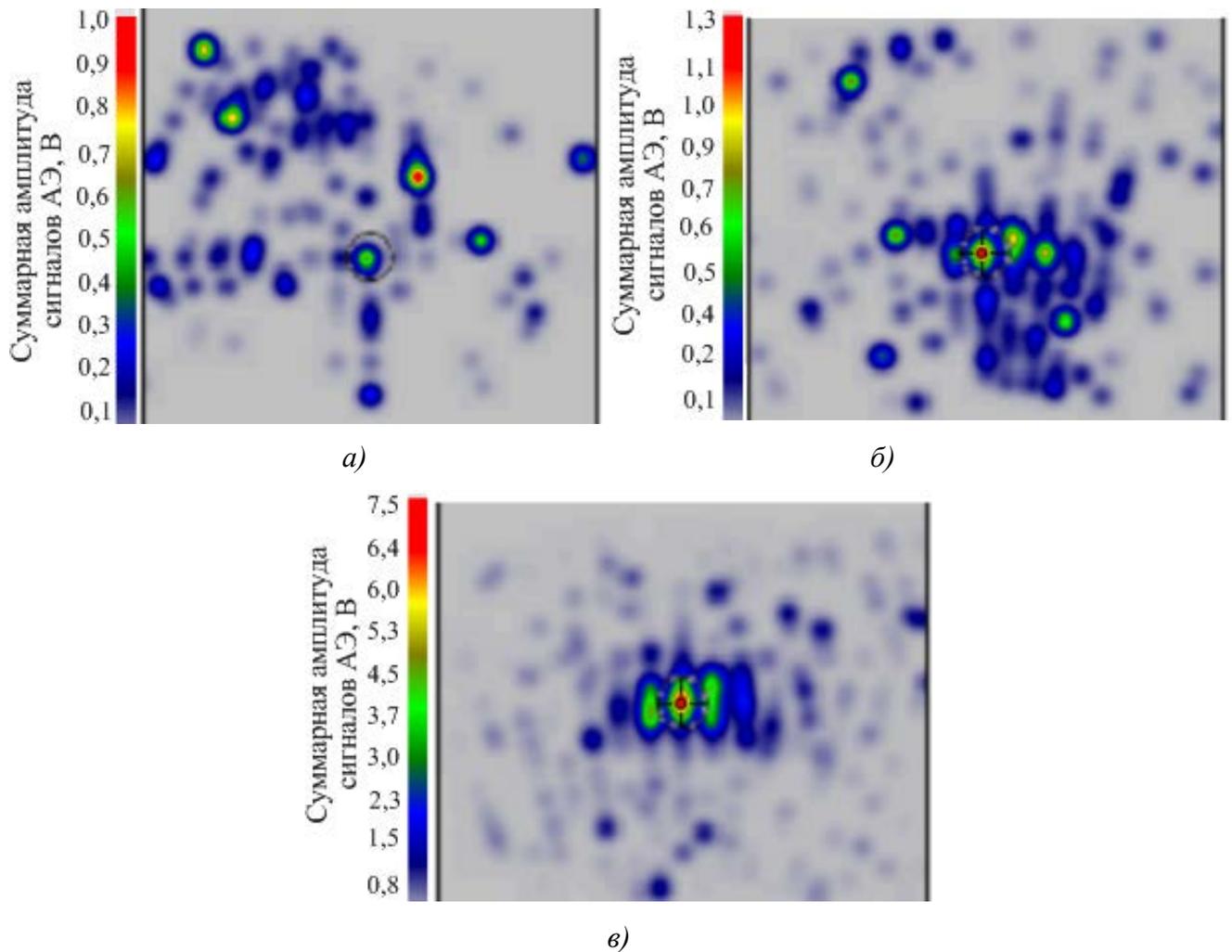
в)

**Рисунок 2.21 – Фрактография материала недеформируемого образца (а); разрушение волокон (б) и матрицы (в) в области отверстия**

Установлено, что в структуре бездефектной области образца (рисунок 2.21,а) отсутствовали значительные разрушения (расслоения или разрывы волокон, трещины в матрице). Исследование несущего слоя материала образца из области отверстия после испытаний показало наличие разрывов волокон (рисунок 2.21,б) и значительные повреждения матрицы (рисунок 2.21,в). Отмеченные дефекты отчетливо наблюдались вблизи от трещины, а при удалении более, чем 10 мм от разрушенной поверхности образца, их концентрация существенно снижалась и была незначительной.

Для исследования связи сигналов АЭ с процессом разрушения углепластика проведены статические испытания образцов с параметрами укладки монослоев группы 3 (таблица 2.5) с концентратором напряжений в виде отверстия диаметром  $d = 14$  мм в центре. В процессе нагружения выполнялась регистрация АЭ-информации. Зоны разрушения образцов исследовались на шлифах с использованием растрового электронного микроскопа *CarlZeissEVO 50 XVP*.

Образец 1 нагружался на электрогидравлической машине *MTS-50* ступенчато через интервал  $\Delta P = 5$  кН. При максимальной нагрузке  $P_1 = 35$  кН АЭ-системой СЦАД-16.10 осуществлялась устойчивая локация сигналов АЭ из области отверстия (рисунок 2.22,а). Нагружение образцов 2 и 3 выполняли на машине *Instron* ступенчато через интервал  $\Delta P = 2,5$  кН до нагрузок  $P_2 = 45$  кН и  $P_3 = 65$  кН соответственно.



**Рисунок 2.22 – Локация сигналов АЭ в области отверстия, зарегистрированных при нагружении образцов 1 (а), 2 (б), 3 (в)**

В процессе нагружения образца 1 локация сигналов из области отверстия началась при нагрузке  $P = 20$  кН (рисунок 2.22,а). При нагружении образца 2 первые сигналы из области отверстия были зарегистрированы при нагрузке  $P = 15$  кН (рисунок 2.22,б), а при нагружении образца 3 – при нагрузке  $P = 17,5$  кН (рисунок 2.22,в). Различия в значениях нагрузок, при кото-

рых начиналась локация сигналов АЭ, могли быть связаны с особенностями устройств захватов нагружающих машин *MTS-50* и *Instron*. При использовании машины *MTS-50* образец нагружался равномерно. Ширина захватов нагружающей машины *Instron* составляла 50 мм, поэтому его центральная часть нагружалась больше, что и привело к более ранней локации в области концентратора напряжений. Визуально в области локации сигналов дефекты не выявлялись.

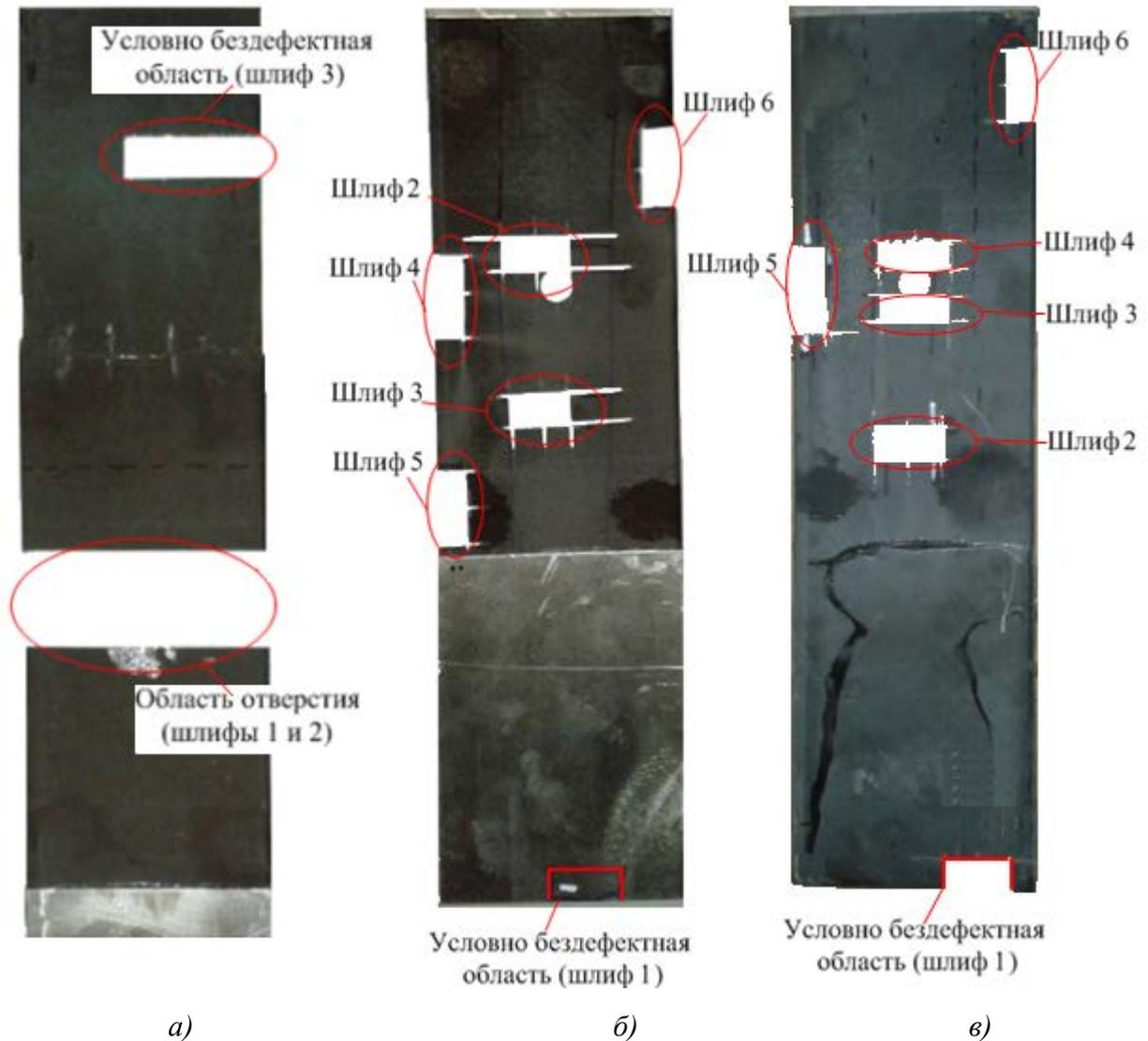
Для определения связи между разными типами дефектов, обнаруженными при фрактографическом анализе, и сигналами АЭ, локализованными в области отверстия исследуемых образцов, определялись их основные информативные параметры (таблица 2.6).

**Таблица 2.6 – Параметры сигналов АЭ, локализованных в области отверстия образцов 1, 2, 3**

Параметр	Номер образца		
	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Максимальная нагрузка, кН	35,0	45,0	65,0
Нагрузка, при которой началась локация из области отверстия, кН	20,0	15,0	17,5
Количество локализованных сигналов в области отверстия	63	302	808
Амплитуда сигналов АЭ, В	0,2 – 0,3	0,2 – 0,5	0,3 – 0,4
Частота сигналов АЭ, кГц	220-230	220; 240-250	120-140 220-230
Время нарастания переднего фронта, мкс	40-50	20-40	50
<i>MARSE</i> , мВ·мкс	20-30	10-20	35
Структурный коэффициент $P_{D32}$	2,5	2,3	2,8 - 3

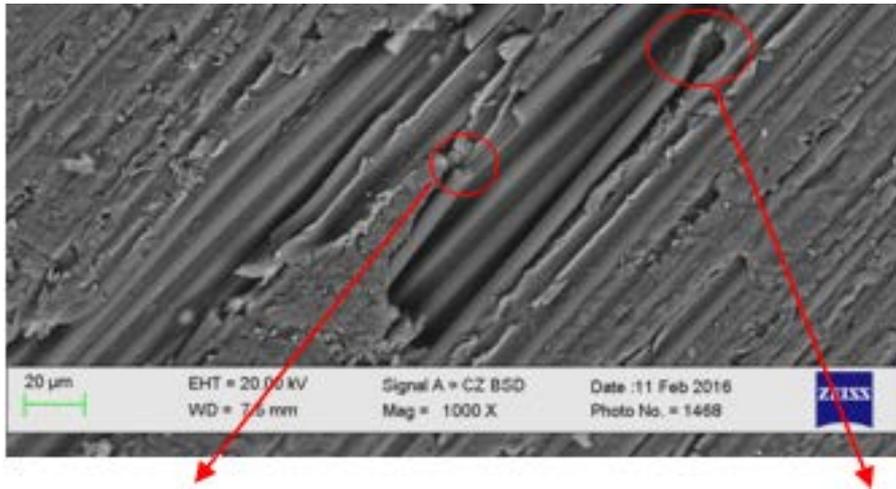
Для фрактографического анализа из материала образца, где выполнялась локация сигналов АЭ, были изготовлены шлифы. Из материала образца 1 были сделаны три шлифа (рисунок 2.23,а). Шлиф 1 выполнен из зоны, расположенной у кромки отверстия. Шлиф 2 был вырезан из зоны, находящейся на расстоянии 30 мм от отверстия. Шлиф 3 был условно принят за бездефектную область, так как был вырезан из зоны наклейки дюралюминиевых пластин, расположенных под гидравлическими захватами нагружающей машины *MTS-50*. Для проведения фрактографии материала образца 2 были сделаны шлифы из шести областей (рисунок 2.23,б). Шлиф 1 изготовлен из материала, расположенного в области наклейки дюралюминиевых пластин и считался условно бездефектным. Из средней части образца были вырезаны шлифы 2 и 3, на левой стороне образца вырезался материал для шлифов 4 и 5, с правой стороны – для шлифа 6. Выполнена фрактография материала образца 3 из условно бездефектной области

захватов (шлиф 1), центральной части (шлифы 2, 3 и 4), левой (шлиф 5) и правой (шлиф 6) сторон (рисунок 2.23,в).

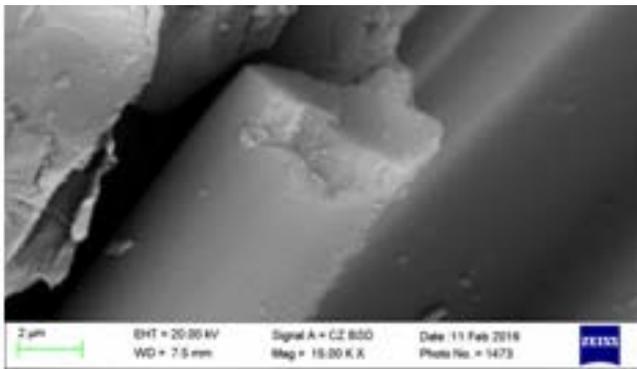


**Рисунок 2.23 – Внешний вид областей образцов 1 (а), 2 (б) и 3 (в), из которых вырезался материал для изготовления шлифов**

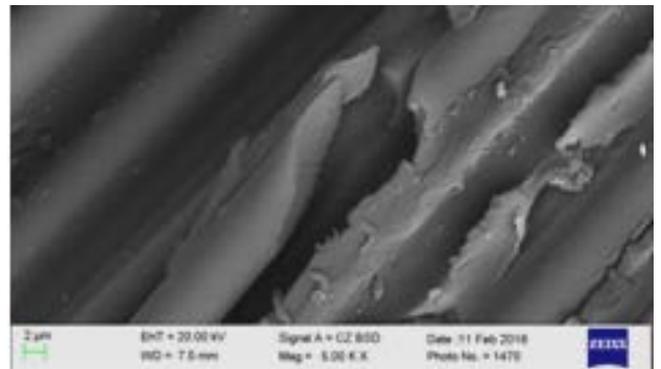
По результатам фрактографии было установлено, что в области кромки отверстия (рисунок 2.24,а) образца 1 наблюдалось отслоение матрицы от углеродных волокон. Отдельные волокна разрушались хрупко (рисунок 2.24,б, в) без видимых следов пластической деформации. После приложения внешней нагрузки расстояние между отдельными волокнами не изменилось, а исследуемый слой воспринимал только деформации растяжения. Также определено расслоение волокон монослоя  $90^\circ$ , расположенного перпендикулярно (рисунок 2.24, г) к направлению прикладываемой нагрузки.



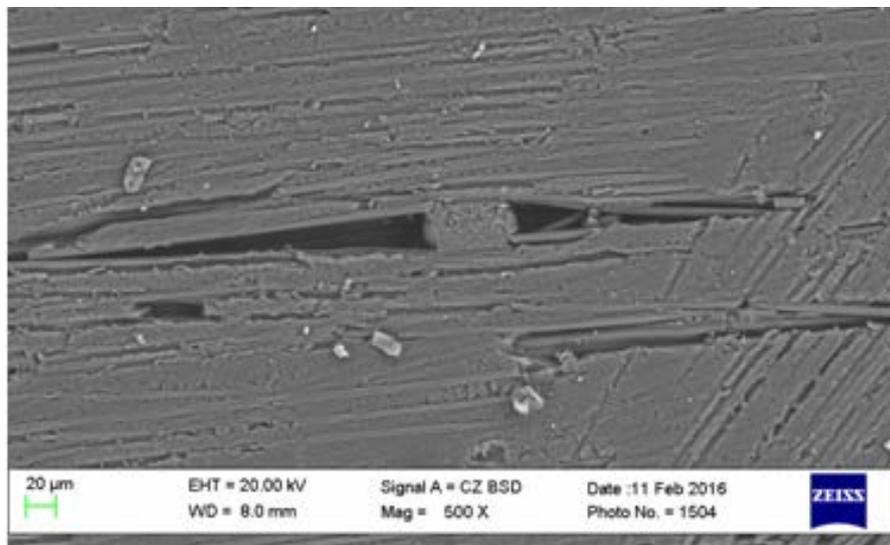
a)



б)



в)



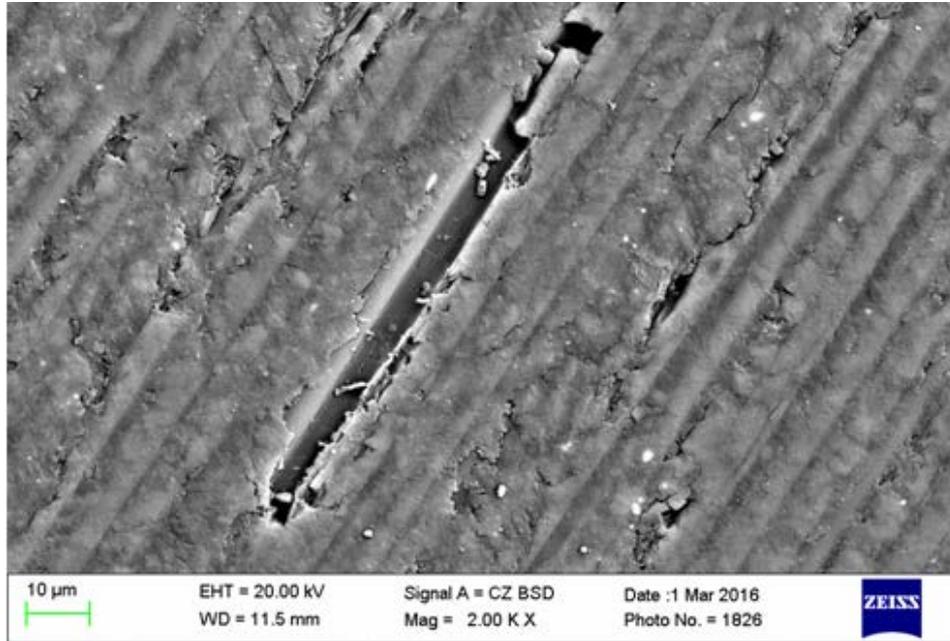
з)

**Рисунок 2.24 – Результаты фрактографии в области отверстия образца 1:**

***a* – общий вид; *б, в* – разрушение волокон; *з* – расслоение монослоя 90°**

Анализ результатов фрактографии образца 2 показал, что в области отверстия (шлиф 2) условия внешнего нагружения привели к хрупкому разрушению матрицы, а волокна при этом воспринимали внешние нагрузки практически без разрушения, за исключением отдельных волокон (рисунок 2.25). Отсутствующий фрагмент волокна на поверхности шлифа образца 2 ниж-

ней части центральной области (рисунок 2.25) свидетельствует о том, что во время нагружения произошло его разрушение в одном месте, а при последующем механическом шлифовании и полировании поверхности это привело к дальнейшему разрушению волокна и удалению данного фрагмента.



**Рисунок 2.25 – Результаты фрактографии нижней части центральной области образца 2**

Для определения зависимости основных информативных параметров от разрушений образца 2 были проанализированы сигналы из области отверстия (шлиф 2), нижней части центральной области (шлиф 3) и из правого края образца (шлиф 6). Параметры сигналов АЭ, зарегистрированных в области, из которой выполнен шлиф 2 образца 2, приведены в таблице 2.6. При этом была выделена группа сигналов, у которых разность времен прихода на датчики пьезоантенны не превышала 4 мкс, а время нарастания переднего фронта составляло 20 мкс. Им соответствовала частота  $f = (220 - 240)$  кГц и амплитуда (0,25 – 0,50) В.

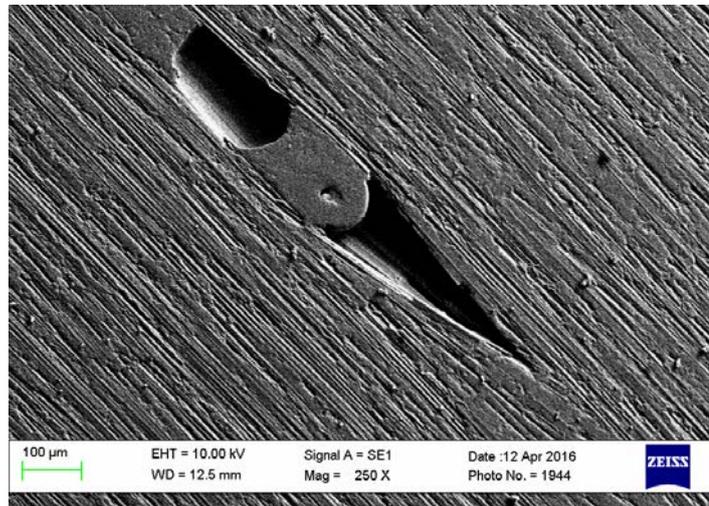
В области шлифа 6 регистрировались сигналы АЭ, амплитуда которых составляла (0,25 – 0,35) В, доминантная частота находилась в пределах  $f = (220 - 225)$  кГц. Кроме того, регистрировались сигналы с частотой  $f = (100 - 150)$  кГц. При этом сигналы, регистрируемые в области образца, из которой был изготовлен шлиф 6, не были выделены в отдельные кластеры, что может подтверждать отсутствие активного источника излучения.

Анализ показал, что амплитуда большего числа сигналов, локализованных в рассматриваемых областях образца 2, составляла (0,2 – 0,35) В. Однако расчет по формуле (2.3) и сравнение значений структурных коэффициентов  $P_{D32}$  сигналов АЭ, локализованных в областях образца 2, из которых изготавливались шлифы 2, 3, 6, позволил получить следующее неравенство:

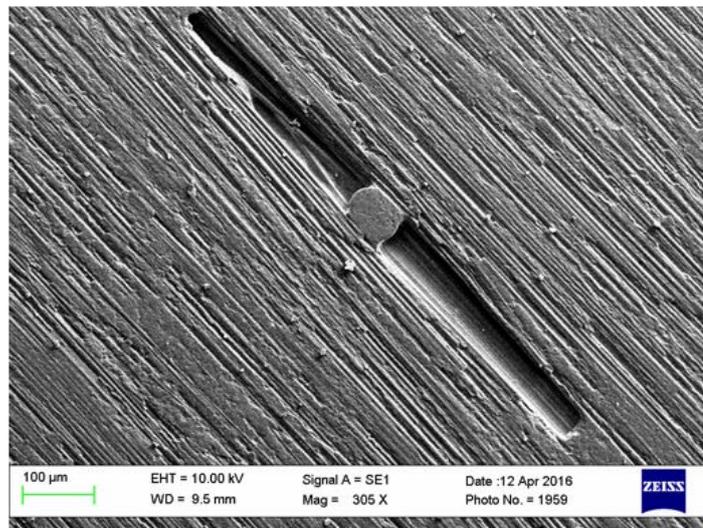
$$P_{2D32} < P_{3D32} < P_{6D32}.$$

Использование структурного коэффициента  $P_{D32}$  определило сигналы частотой  $\Delta f = (250 - 500)$  кГц, локализованные в более нагруженной области (шлифы 2 и 3) и соответствующие максимальному значению коэффициента  $D_2$ . Они обладали большей энергией, чем сигналы из менее нагруженной области, из которой был изготовлен шлиф 6. При этом в соответствии с проведенной фрактографией в шлифе 2 наблюдалось разрушение волокон, в шлифе 3 было меньше разрушенных волокон, а в шлифе 6 данный дефект вообще не был определен. Уменьшение значения структурного коэффициента сигналов  $P_{D32}$  (а, следовательно, увеличение коэффициента  $D_2$ ) соответствовало смещению энергии сигналов в область высоких частот  $f = (250 - 500)$  кГц.

Анализ результатов фрактографии материала, из которого был изготовлен образец 3, подтвердил наличие касательных напряжений, которые способствовали расслоению материала матрицы. Наличие включений в области расслоения на рисунке 2.26,а,б соответствует материалу полировальной суспензии, так как в них отсутствует волокнистая составляющая.



а)

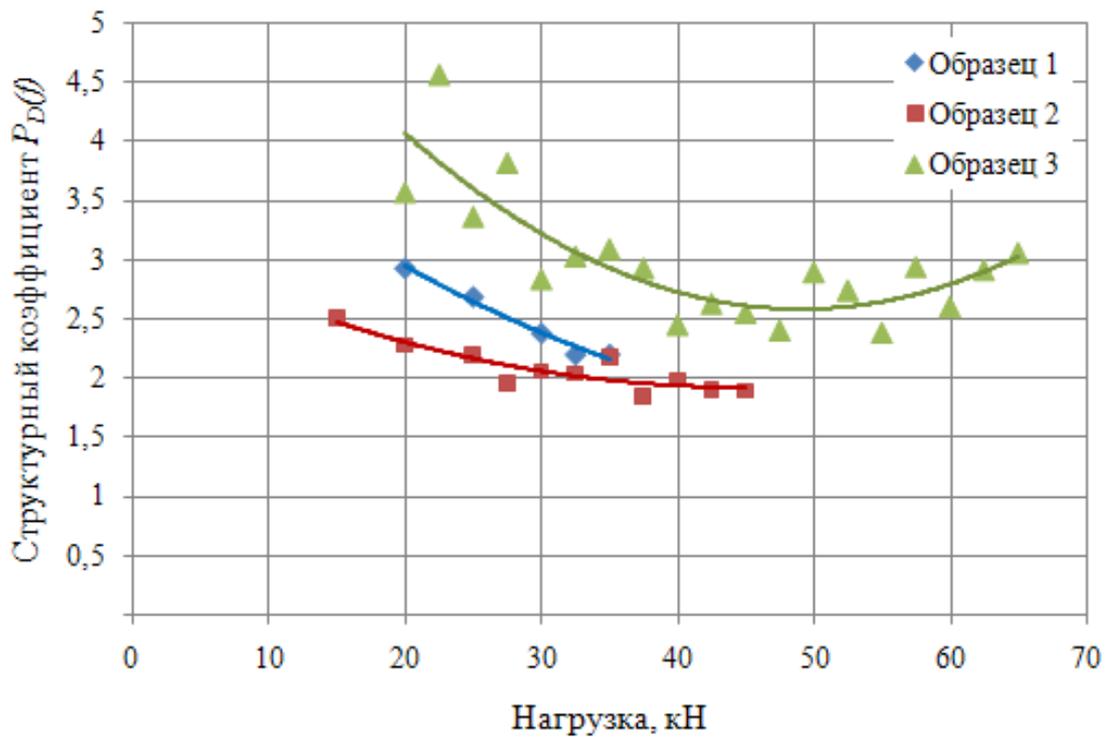


б)

**Рисунок 2.26 – Фрактография области отверстия образца 3 (а) и его левой стороны (б)**

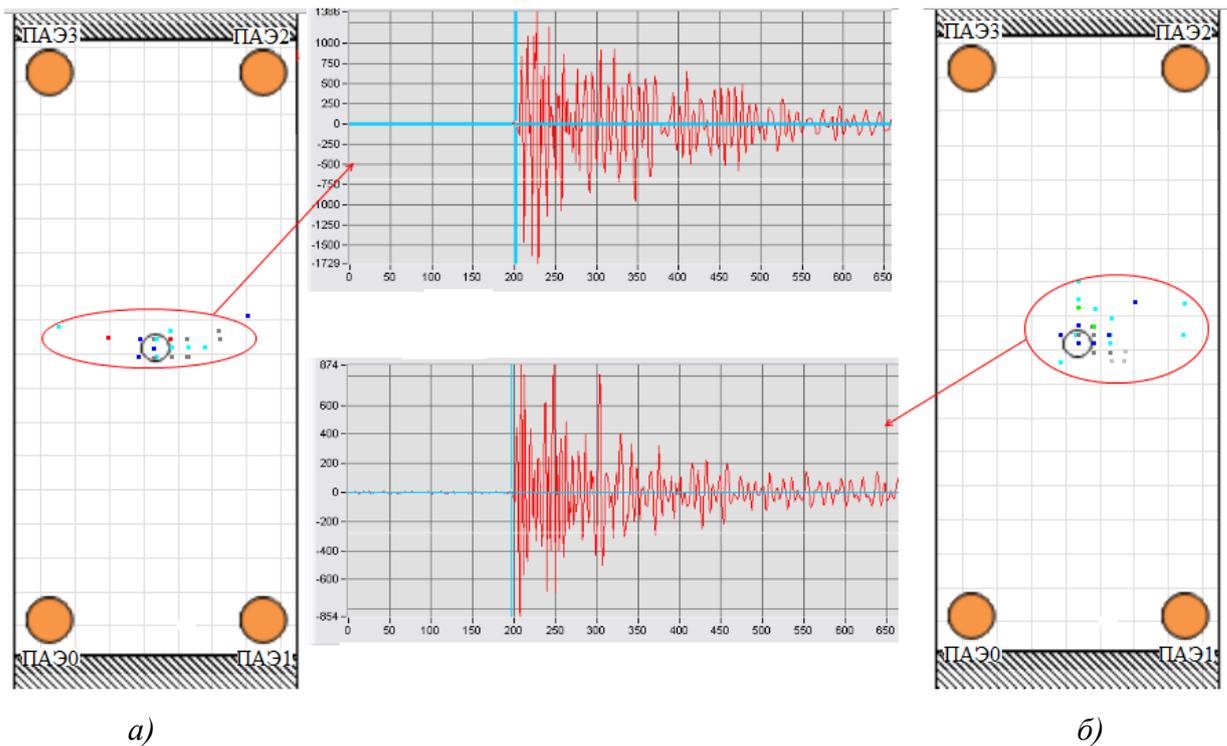
При анализе изменения структурных коэффициентов  $P_{D32}$  сигналов АЭ, локализованных в области отверстия образцов 1-3, было установлено, что до нагрузки  $P = 40$  кН их значения уменьшаются (рисунок 2.27). Как видно из формулы (2.3), это может быть вызвано увеличением коэффициента  $D_2$ , а, следовательно, смещением сигналов АЭ в область высоких частот  $f = (250 - 500)$  кГц. По результатам фрактографии в исследуемых областях образцов 1 – 3 были выявлены разрушения волокон и матрицы.

Однако 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 (таблица 2.6). Фрактография материала образца 3 подтвердила наличие больших расслоений, которые не наблюдались в образцах 1 и 2.



**Рисунок 2.27 – Зависимость структурного коэффициента от нагрузки для сигналов, локализованных в области отверстия при испытании образцов 1 - 3**

При кластеризации по оцифрованной форме сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении образцов 2 и 3, были получены кластеры с сигналами подобной формы (рисунок 2.28, а, б). Они были локализованы в области отверстия и регистрировались в момент увеличения нагрузки. Данные сигналы характеризовались незначительным уровнем шумов в предыстории, малым временем нарастания переднего фронта (20 – 30) мкс и длительностью порядка (200-300) мкс.



**Рисунок 2.28 - Результаты кластеризации по форме оцифрованного сигнала:**

**а – образец 2; б – образец 3**

Для подтверждения результатов фрактографии было проведено нагружение образца 4 на машине *Instron* ступенчато через интервал  $\Delta P = 2,5$  кН до максимального уровня нагрузки  $P_{max}$  с последующей монотонной разгрузкой. На первом этапе максимальная нагрузка составляла  $P_{max} = 35$  кН, на втором –  $P_{max} = 45$  кН, на третьем –  $P_{max} = 65$  кН, на четвертом –  $P_{max} = 85$  кН. Анализ сигналов, зарегистрированных в области концентратора напряжений, производился для каждого этапа нагружения. При втором и последующих нагружениях наблюдался эффект Кайзера, который повлиял на начало локации из области отверстия (таблица 2.7).

**Таблица 2.7 – Параметры сигналов АЭ, локализованных в области отверстия образца 4**

Параметр	Нагрузка			
	до 35 кН	до 45 кН	до 65 кН	до 85 кН
Нагрузка, при которой началась активная локация из области отверстия, кН	17,5	32,5	40,0	60,0
Количество локализованных сигналов АЭ в области отверстия	82	118	403	913
Амплитуда сигналов АЭ, В	0,1 – 0,2	0,1 – 0,2	0,1 – 0,2	0,2 – 0,3
Частота сигналов АЭ, кГц	210-225	215-225	220-230 115-130	215-225 110-150
Время нарастания переднего фронта, мкс	45	45	30	45
MARSE, мВ·мкс	11,4	15,2	17,9	14,4
Структурный коэффициент $P_{D32}$	2,7	2,5	2,7	3,9

Увеличение нагрузки вызывало изменение структурного коэффициента, доминантной частоты и *MARSE*. При анализе распределения частоты сигналов АЭ было получено, что, начиная со второго этапа нагружения, при нагрузке более  $P = 40$  кН наблюдалась регистрация сигналов с частотой  $f = (110 - 150)$  кГц. Это подтвердило результаты, полученные при испытании образца 3. Визуальный осмотр образца 4 показал наличие расслоения монослоев в области кромки отверстия, а также начало расслоения волокон верхнего монослоя.

### 3.6 Исследование механизма разрушения образцов из стеклопластика с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии

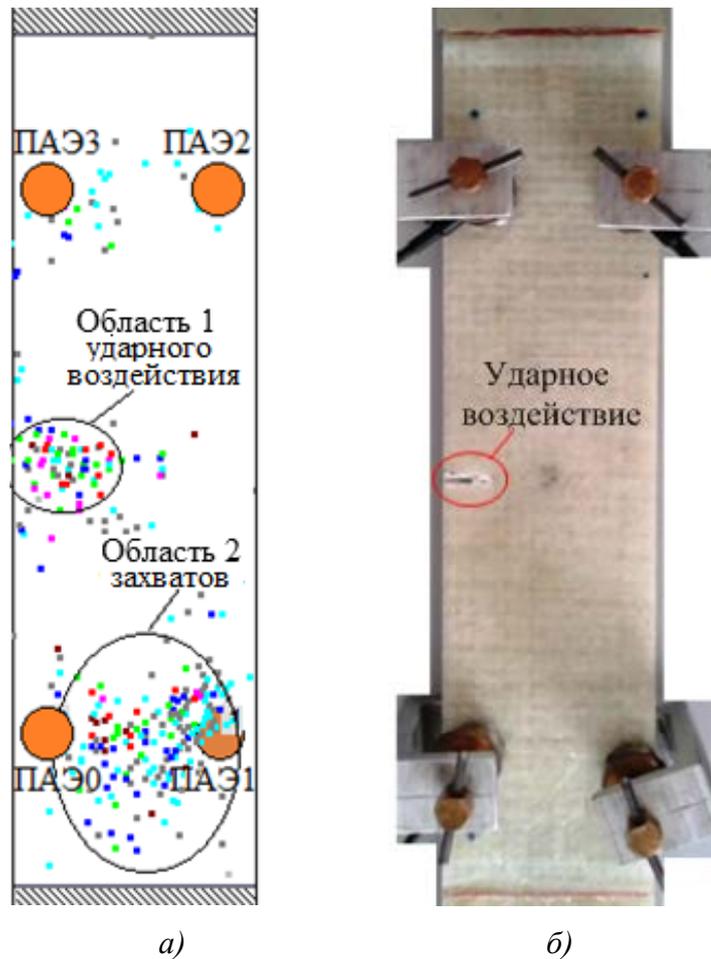
Прочностные испытания проводились с образцами из стеклопластика СППС размером  $500 \times 75 \times 10$  мм. Для снижения вероятности разрушения на образцы в области их крепления гидравлическими захватами нагружающей машины *MTS-50*, были наклеены дюралюминиевые пластины размером  $100 \times 75 \times 1$  мм. На образце размещалась пьезоантенна, состоящая из четырех ПАЭ.

На образец 1 (рисунок 2.29) предварительно был нанесен точечный удар, в результате чего был поврежден верхний несущий слой композита. Для ослабления сечения в центральной части образцов (1 – 7) были выполнены пропилы, которые являлись концентраторами напряжений. В образце 2 величина пропила составила 20 мм, а в образцах 3 – 7 пропилы были увеличены до 25 мм.

При нагружении образца 1 с предварительно нанесенным точечным ударом нагрузку изменяли ступенчато с интервалом  $\Delta P = 10$  кН. После увеличения нагрузки до  $P = 70$  кН началась регистрация сигналов АЭ из области нижнего захвата, что было связано с перемещением дюралюминиевых пластин в данной области образца. При этом активность сигналов АЭ увеличилась с 1 сигн/с до 10 сигн/с. При нагрузке  $P = 80$  кН испытания завершились, так как произошло отслоение дюралюминиевых пластин.

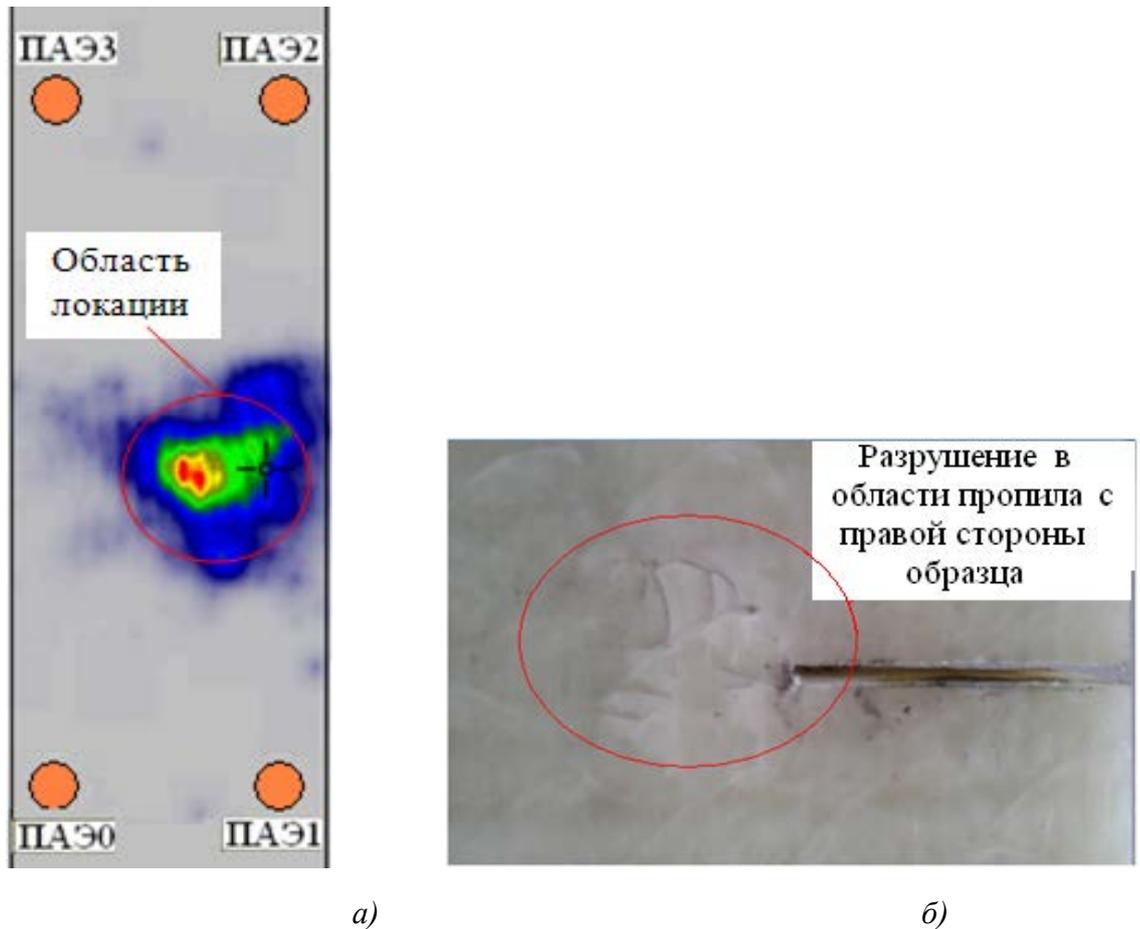
На рисунке 2.29,а показана локация сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении образца 1. С использованием двухинтервального метода [23, 56] была выполнена локация сигналов АЭ в области концентратора напряжений (рисунок 2.29,а).

Сигналы, зарегистрированные в зоне ударного воздействия (рисунок 2.29,б), находились в области 1, а сигналы из зоны нижнего захвата – в области 2. В процессе нагружения образца 1 в зоне ударного воздействия было локализовано около 200 сигналов АЭ. Амплитуда сигналов была равна  $(0,1 - 0,25)$  В и в процессе нагружения значительно не изменялась.



**Рисунок 2.29 – Локация сигналов АЭ (а) и внешний вид образца 1 (б)**

В образце 2 симметрично с двух сторон выполнялись пропилы длиной 20 мм, служащие концентраторами напряжений. Нагружение выполняли через интервал, равный  $\Delta P = 5$  кН. Регистрация сигналов АЭ из области пропилов начиналась при превышении нагрузки  $P = 10$  кН. На последнем этапе нагружения наблюдалась активная локация сигналов АЭ от пропила, расположенного между датчиками ПАЭ1 и ПАЭ2 (рисунок 2.30,а). Осмотр, выполненный после испытаний, показал, что в области локации сигналов АЭ началось разрушение несущего слоя образца (рисунок 2.309,б). Максимальная нагрузка, прикладываемая к образцу, составила  $P = 75$  кН. Общее число локализованных сигналов было равно  $32 \cdot 10^3$ .



**Рисунок 2.30 – Область локации сигналов АЭ образца 2 (а);  
вид его зоны разрушения (б)**

В образце 3 были выполнены пропилы длиной 25 мм. Нагружение осуществлялось через  $\Delta P = 5$  кН. На рисунке 2.31,а показана локация сигналов АЭ вдоль образца 3. При нагружении происходило вытягивание стекловолокна по его длине (рисунок 2.31,б).

На последнем этапе нагружения было выделено две характерные области локации сигналов АЭ (рисунок 2.31,а). Сигналы из области 1 отражали процесс разрушения несущих слоев образца в рабочем сечении. При растяжении однонаправленные стекловолокна вытягивались (рисунок 2.31,б), что отражено в области локации соответствующих сигналов АЭ из области 2.

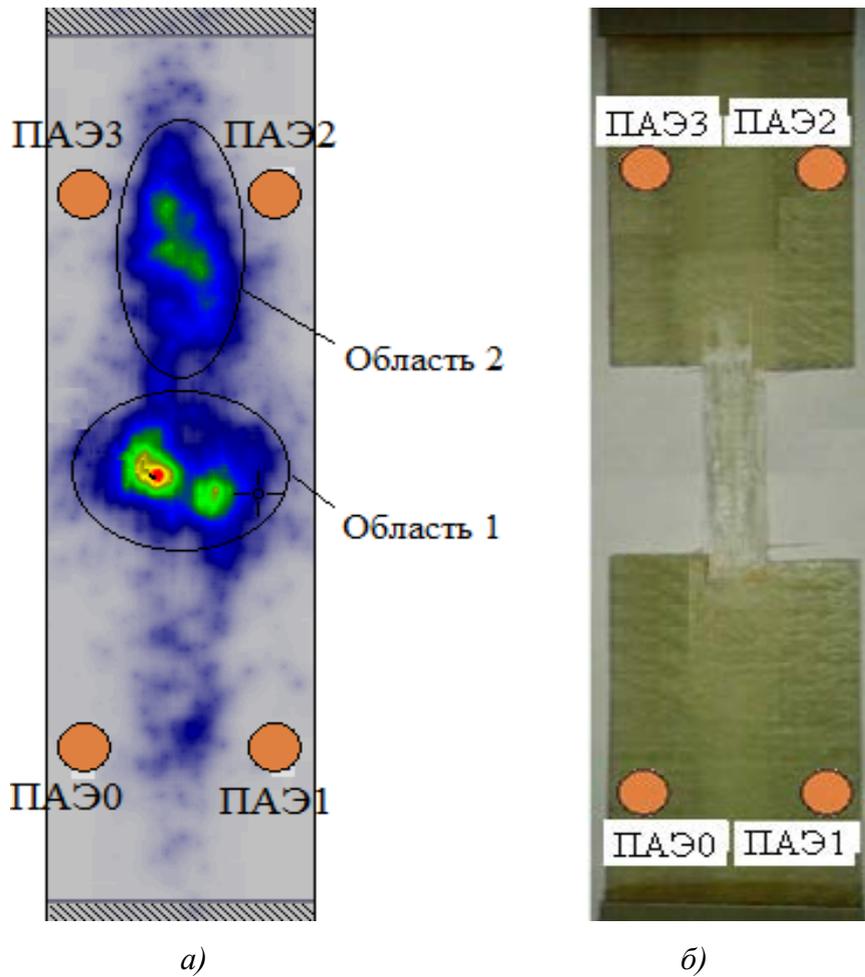
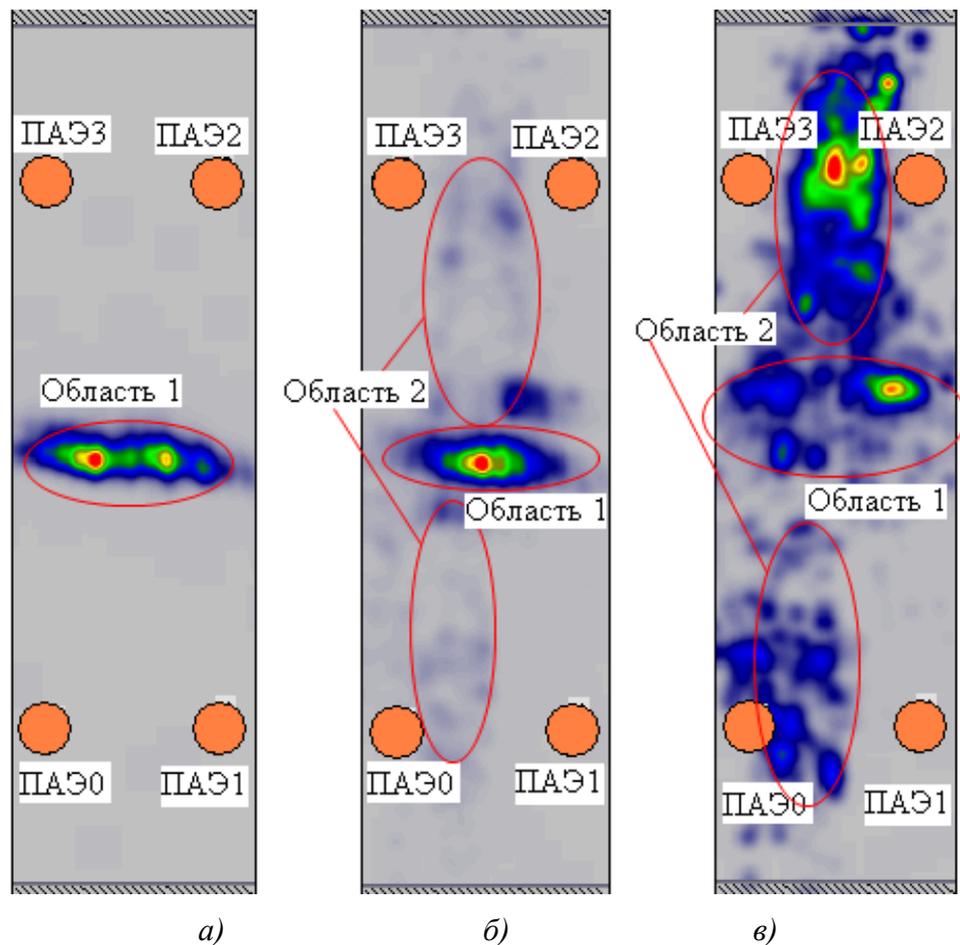


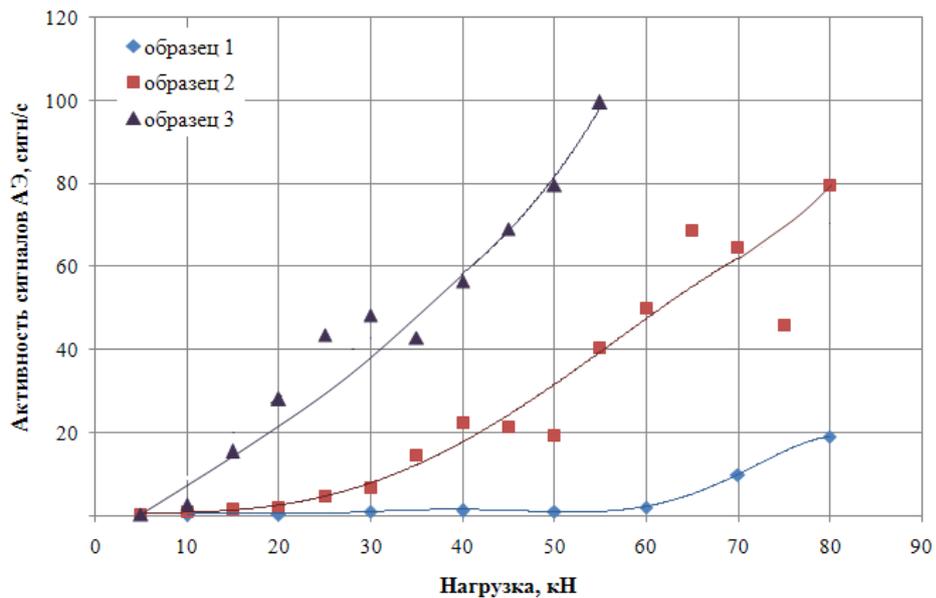
Рисунок 2.31 – Локация сигналов АЭ (а); вид разрушенного образца 3 (б)

В качестве примера на рисунке 2.32 показана локация сигналов АЭ, полученная при нагружении образца 7. В процессе испытаний происходило сначала разрушение несущих монослоев (область 1 на рисунке 2.32,а). При его выдержке на последней ступени нагружения при нагрузке  $P = 75$  кН произошла потеря устойчивости материала образца и началось вытягивание армирующих стекловолокон (область 2 на рисунке 2.32,б,в). Данному процессу соответствовало начало локации сигналов в области 2 (рисунок 2.32,б). При этом суммарная амплитуда сигналов АЭ была значительно меньше, чем амплитуда сигналов из области пропилов. Перед полным разрушением образца 7 происходило только вытягивания волокна и была получена локация сигналов АЭ из области 2, отражающая данный процесс (рисунок 2.32,в).



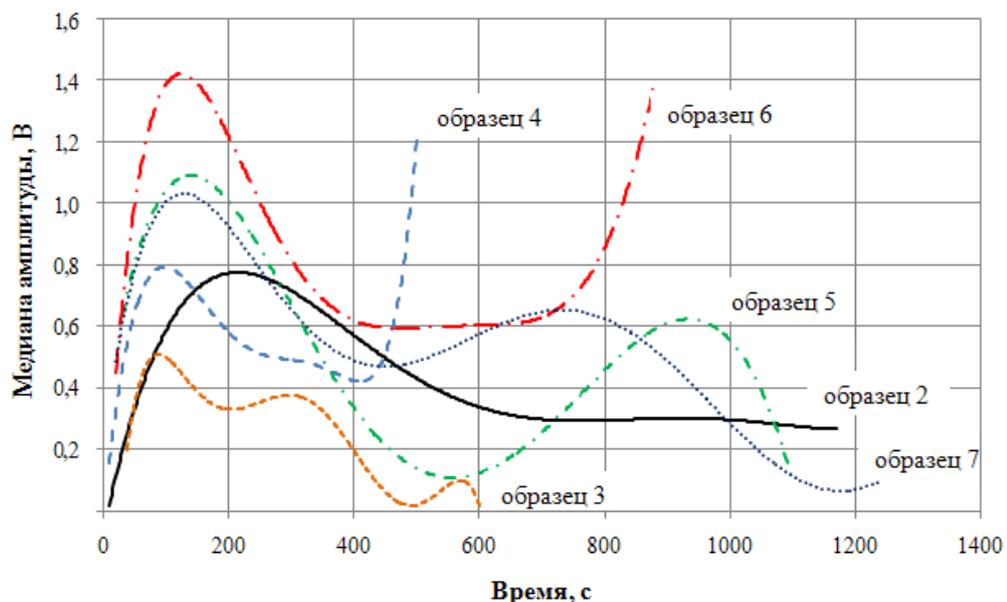
**Рисунок 2.32 – Локация сигналов АЭ, зарегистрированных с начала нагружения образца 7 до нагрузки  $P = 55$  кН (а); локация в момент потери устойчивости образца при нагрузке  $P = 75$  кН (б); локация перед разрушением образца (в)**

Для анализа результатов испытаний образцов из стеклопластика с различными концентраторами напряжений были построены зависимости активности сигналов АЭ от нагрузки (рисунок 2.33). Для первого образца с ударным повреждением увеличение активности наблюдалось при превышении нагрузкой  $P=60$  кН, что составляет 75 % от разрушающей нагрузки. При этом максимальное значение активности составило 20 сигн/с. Анализ результатов испытаний второго и третьего образцов показал, что увеличение длины пропила на 5 мм привело к быстрому росту активности сигналов АЭ при меньших значениях нагрузки. Для второго образца с пропилом длиной 20 мм увеличение активности сигналов начинается с нагрузки  $P = 30$  кН, а для третьего образца с пропилом 25 мм – с нагрузки  $P = 15$  кН. Следовательно, для третьего образца разрушение начиналось при нагрузке, составляющей 27 % от разрушающей. Нагружающая способность второго образца выше и составляла 37,5 %.



**Рисунок 2.33 - Зависимость активности сигналов АЭ от нагрузки при испытании образцов из стеклопластика**

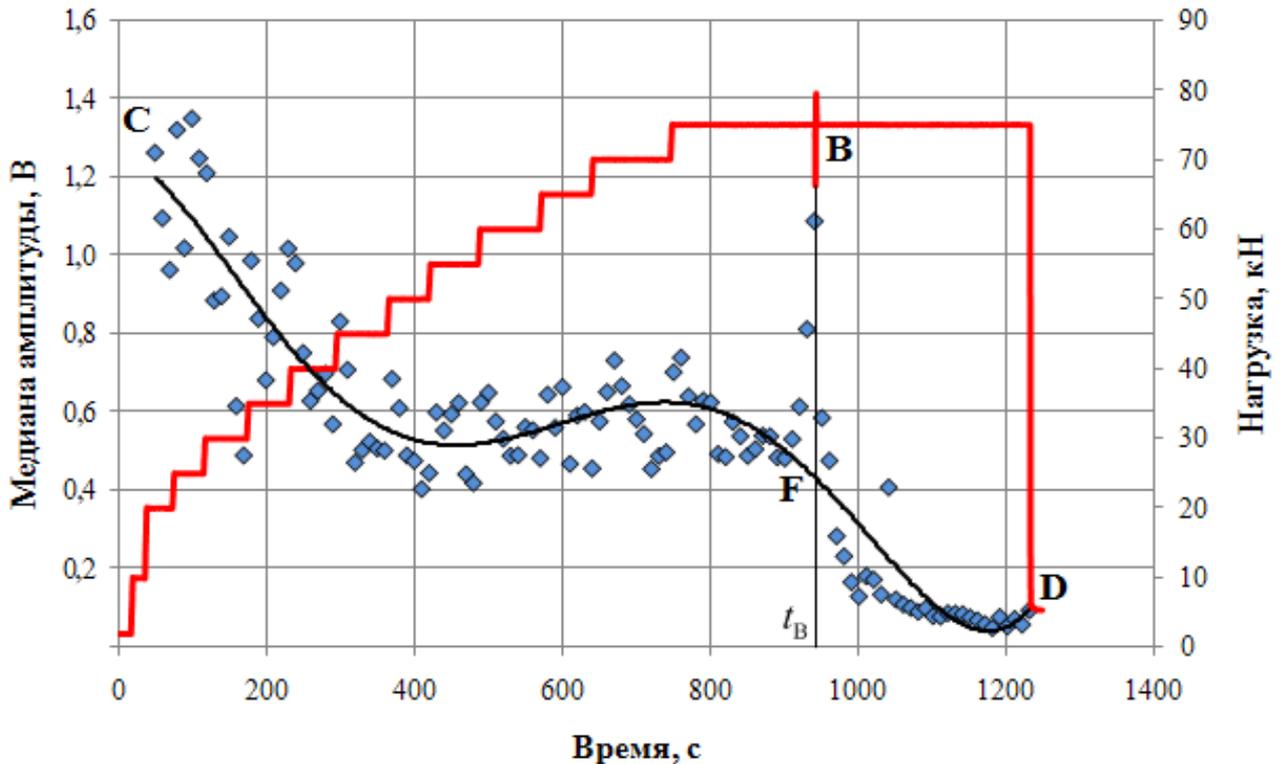
Для исследования связи основных информативных параметров сигналов АЭ (амплитуды, доминантной частоты, времени нарастания огибающей переднего фронта и энергетического параметра *MARSE*) с разрушениями были проанализированы результаты испытаний образцов 2 – 7 с пропилами. Амплитуда сигналов АЭ в наибольшей степени характеризует процесс разрушения исследуемых образцов. На рисунке 2.34 показана зависимость медианы амплитуды сигналов АЭ от времени для образцов 2– 7. Для них было характерно увеличение амплитуды сигналов АЭ в начале нагружения и затем постепенное ее уменьшение. Перед разрушением несущих монослоев амплитуда сигналов АЭ снова увеличивалась. В образце 2 несущие слои не разрушились, поэтому увеличение амплитуды сигналов в конце нагружения не наблюдалось.



**Рисунок 2.34 – Зависимость изменения медианы амплитуды сигналов АЭ от времени при испытании образцов 2 – 7 с пропилами**

Для образца 7 выполнен анализ связи изменения амплитуды сигналов АЭ с нагрузкой и временем. Образец нагружался ступенчато до нагрузки  $P = 75$  кН. Затем выдерживался при данной нагрузке в течение интервала времени  $\Delta t = 480$  с до его полного разрушения. На рисунке 2.35 показаны зависимости изменения медианы амплитуды сигналов АЭ и нагрузки от времени.

В начале нагружения регистрировались сигналы АЭ с максимальными значениями амплитуды, далее наблюдалось ее снижение до момента времени, когда нагрузка становится равной  $P = 40$  кН. При последующем нагружении и при выдержке образца 7 на последней ступени под нагрузкой  $P = 75$  кН в течение первых  $\Delta t = 160$  с амплитуда сигналов АЭ находилась в интервале (0,4 – 0,8) В. В момент времени  $t_B = 940$  с (рисунок 2.35) был слышен треск при разрушении образца и произошло резкое снижение нагрузки до  $P = 69$  кН (точка В на рисунке 2.35). Это свидетельствовало о потере устойчивости образца и начале его разрушения. В момент потери устойчивости  $t_B$  образца амплитуда сигналов АЭ стала равной 1,1 В, а затем до конца испытаний она не превышала 0,2 В.

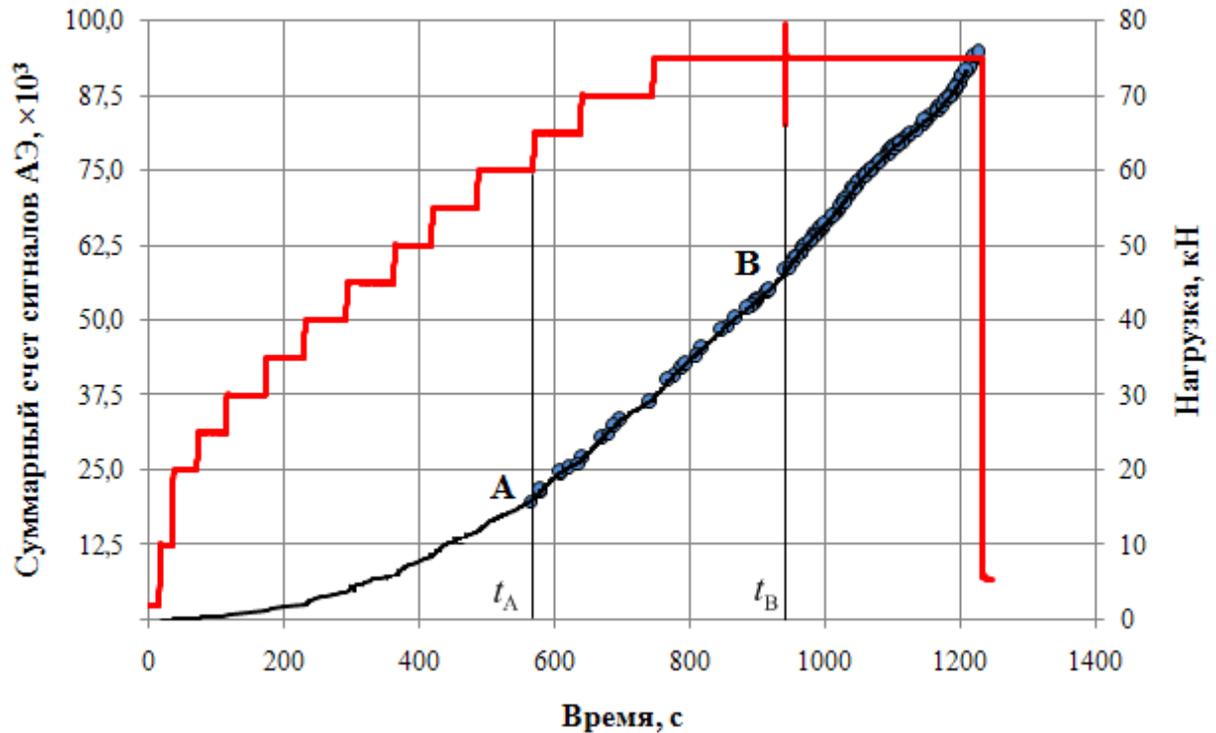


**Рисунок 2.35 – Зависимость медианы амплитуды и нагрузки от времени при испытании образца 7**

Таким образом, изменение амплитуды сигналов АЭ характеризует процесс разрушения образцов из стеклопластика. Процессу вытягивания волокон соответствовали сигналы с амплитудой (0,1 – 0,2) В (отрезок  $FD$  на рисунке 2.35), что в два раза меньше, чем при разрушении несущих монослоев (отрезок  $CF$  на рисунке 2.35).

Был выполнен расчет значения структурного коэффициента для сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении образца 7. В момент времени  $t_A = 570$  с (точка А на рисунке 2.36)

при увеличении нагрузки до  $P = 65$  кН был слышен треск, вызванный разрушением образца. Однако при визуальном осмотре видимых разрушений обнаружено не было.



● - сигналы АЭ со значением структурного коэффициента  $P_D(f) \geq 60$

**Рисунок 2.36 – Зависимость суммарного счета сигналов АЭ и нагрузки от времени при испытании образца 7**

При анализе сигналов АЭ с использованием структурного коэффициента было установлено, что при данной нагрузке были зарегистрированы первые сигналы АЭ со значением структурного коэффициента  $P_D(f) \geq 60$ . Максимальная энергия сигнала АЭ сместилась в область низких частот, которой соответствует коэффициент  $D_3$  третьего уровня детализации вейвлет-разложения. Активная регистрация данных сигналов наблюдалась после потери устойчивости образца при  $t_B = 940$  с (точка *B* на рисунке 2.36). Таким образом, процессу вытягивания волокон соответствовали сигналы АЭ со значением структурного коэффициента более 60.

## Выводы по главе 2

1. Проведены статические испытания образцов из углепластиков КМКУ и *T700* и стеклопластика СППС с одновременной записью АЭ- и тензометрической информации в режиме реального времени. Установлено, что анизотропная структура композитов существенно усложняет форму сигнала АЭ и делает ее «размытой» за счет искажения в частотно-временной облас-

ти. В сигналах наблюдаются различные моды колебаний, что также отрицательно влияет на точность определения их времени прихода.

2. Сравнительный анализ локации сигналов АЭ пороговым и двухинтервальным методами показал, что использование двухинтервального метода при нагружении образцов из исследуемых КМ повышает точность определения координат источников сигналов АЭ. Случайные выбросы были исключены за счет суммирования параметров структуры во временном «окне», что позволило более точно определить время прихода сигнала АЭ на соответствующий ПАЭ и уменьшить разброс координат дефектов.

3. По результатам выполненных испытаний на статическое одноосное растяжение получена устойчивая локация сигналов АЭ из зон разрушения образцов из углепластика (КМКУ, *T700*) и стеклопластика (СППС). Для ослабления поперечного сечения в образцах были выполнены концентраторы напряжений в виде отверстий, пропилов и ударных повреждений. Локация сигналов АЭ из области разрушения образцов из углепластика *T700* с концентратором в виде ударного повреждения или отверстия диаметром  $d = 14$  мм начиналась при нагрузке, составляющей 15 % от разрушающей. В образцах из стеклопластика СППС локация сигналов АЭ наблюдалась при нагрузках, составляющих не более (30-40) % от разрушающих. Таким образом, разработанная методика, основанная на использовании двухинтервального метода, позволила в процессе прочностных испытаний получать устойчивую локацию сигналов АЭ, соответствующую появлению и распространению дефектов в образцах из углепластика и стеклопластика. Разработанная методика может использоваться как при мониторинге, так и при прочностных испытаниях различных композиционных конструкций.

4. Анализ источников сигналов АЭ, зарегистрированных при испытаниях образцов из углепластика КМКУ с концентраторами в виде отверстий или ударного воздействия, выполнялся с применением кластеризации. Данный вид анализа позволил разделять все зарегистрированные сигналы АЭ по источникам, исходя из степени подобия оцифрованной формы или набора параметров. С применением кластеризации по оцифрованной форме сигналов АЭ были получены кластеры, сигналы которых были локализованы в одной области, но обладали различными параметрами. Это указывает на наличие различных источников сигналов, а, следовательно, различных механизмов разрушения. С использованием кластерного анализа по параметрам сигналов АЭ были выделены кластеры сигналов, которые были локализованы либо в области развития усталостной трещины, либо в области ударного воздействия образца из углепластика КМКУ.

5. Выполнен анализ изменения частотно-временной структуры сигналов АЭ с использованием вейвлет-преобразования. Сигналы от источников различных типов характеризовались наличием максимумов амплитуды и временем их появления в смежных диапазонах частот. Для

графического представления вейвлет-декомпозиции использовались вейвлет-скалограммы сигнала АЭ. Для анализа изменения структуры сигналов АЭ предложена методика расчета структурного коэффициента, определяемого как отношение максимумов коэффициента детализации  $D_3$ , соответствующего полосе частот (125 – 250) кГц, к коэффициенту детализации  $D_2$ , расположенного в полосе частот (500 – 250) кГц. По изменению статистического распределения структурного коэффициента выполнена локация и определен процесс разрушения образца из углепластика на начальной стадии.

6. Анализ зависимости изменения структурных коэффициентов сигналов АЭ, локализованных в области отверстия образца из углепластика *T700*, от нагрузки показал, что при ее увеличении от 15 кН до 40 кН наблюдалось уменьшение значений коэффициента. При этом фрактография определила разрушение волокон и матрицы в образцах 2 и 3. При дальнейшем нагружении образца 3 от 40 до 65 кН увеличивался структурный коэффициент, что равносильно смещению сигналов АЭ в область низких частот, и это было подтверждено экспериментально. Таким образом, локация сигналов АЭ из области концентратора напряжений при нагрузках, составляющих 10 – 20 % от разрушающей, соответствовала началу появления разрывов волокон и растрескивания матрицы, что было установлено при фрактографическом анализе. Анализ результатов фрактографии и полученных зависимостей параметров сигналов АЭ показал, что применяемая методика расчета структурного коэффициента позволяет определять наличие дефектов на ранней стадии развития, что может быть применено при мониторинге конструкций в процессе их нагружения и эксплуатации.

### 3 ПРОЧНОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

#### 3.1 Исследование неупругих свойств углепластика при циклических испытаниях образцов с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии

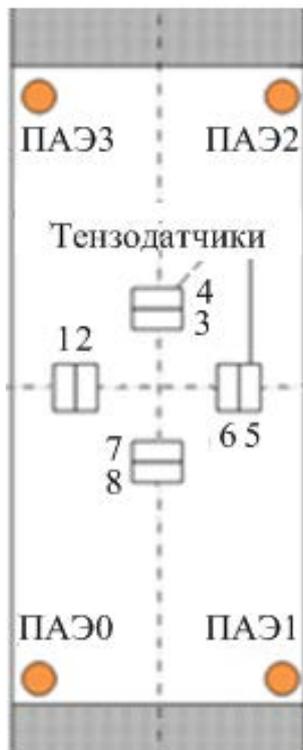
Для обеспечения надежности работы изделий из КМ при циклических нагрузках решалась задача по определению характеристик их сопротивления усталостному разрушению. Сложность ее решения состоит в необходимости прогнозирования НДС исследуемого объекта при циклических нагружениях образцов [1, 47, 49, 65, 66].

Композит состоит из матрицы и волокна, обладающих различными свойствами. При его нагружении проявление неупругих свойств происходит отлично от изотропных материалов [20], поэтому регистрация их изменений важна для контроля НДС и прогнозирования долговечности конструкций.

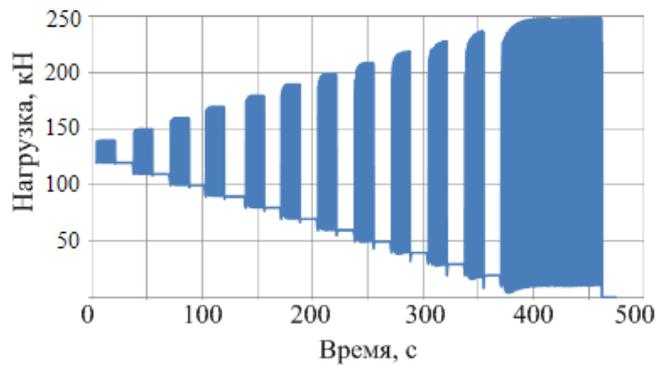
Для исследования неупругих свойств углепластика *T700* были проведены прочностные испытания образцов размером  $100 \times 500 \times 1,6$  мм с однонаправленной укладкой восьми монослоев (рисунок 3.1,а). Первая партия состояла из трех образцов, вторая – из шести. В процессе испытаний осуществлялась регистрация АЭ- и тензометрической информации и выполнялся визуальный контроль с использованием сетевой видеокамеры *AXIS 213 PAL PTZ* со встроенным 26-кратным оптическим и 12-кратным цифровым увеличением.

Циклические нагружения образцов вдоль армирующих монослоев проводились на электрогидравлической машине *MTS-50* с регистрацией усилия и перемещения штока силового будителя. В соответствии с программой испытаний каждый образец линейно нагружался статической нагрузкой  $P_m$ , составляющей 50 % от разрушающей  $P_{разр}$ , которая была определена при циклических испытаниях аналогичных образцов. Затем выполнялось циклическое нагружение со ступенчатым увеличением амплитуды нагрузки  $P_a$ . При этом на каждой ступени образец нагружался 50 циклами с частотой  $f = 1$  Гц при изменении нагрузки от  $P_{min} = (P_m - P_a)$  до  $P_{max} = (P_m + P_a)$  (рисунок 3.1,б). После установления на каждой ступени нагружения заданной нагрузки (рисунок 3.1, б) определялась величина раскрытия петли пластического гистерезиса  $dS_h$  (рисунок 3.1,в), как максимум разности  $dS$  перемещений штока при нагрузке и разгрузке образца (кривая 1 и 2 на рисунке 3.1,в), которая характеризовала изменение неупругих свойств.

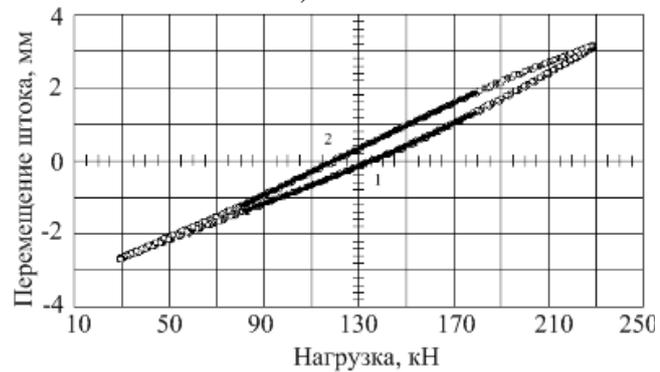
При данной последовательности испытаний были определены нагрузки, при которых изменялись неупругие характеристики материала образцов. Затем они сопоставлялись с результатами, полученными при регистрации тензометрической и АЭ-информации.



а)



б)

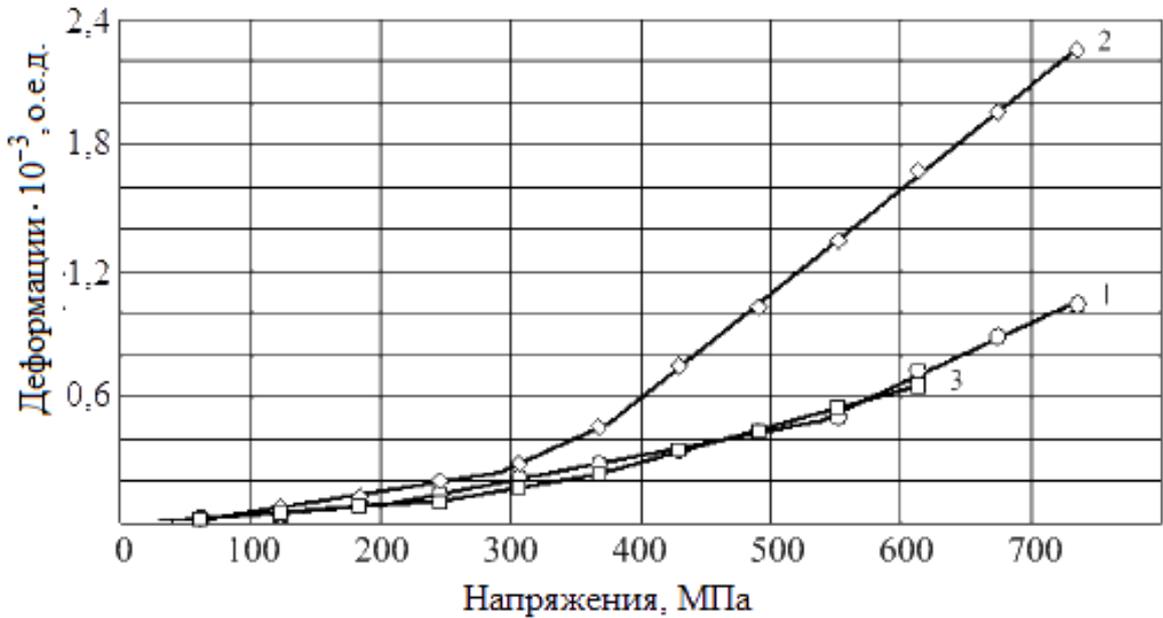


в)

**Рисунок 3.1 – Схема установки ПАЭ и тензодатчиков на образце из углепластика (а); б – изменение нагрузки; в – петля неупругости**

Испытания образцов (1–3) первой партии начинались с их статического нагружения до нагрузки  $P_m = 130$  кН, после чего она увеличивалась ступенчато с амплитудой  $P_a$ , изменяющейся от 10 до 120 кН (рисунок 3.1,б). Далее были проведены испытания образцов (4–9) второй партии. Их разрушающая нагрузка была равна  $P_{разр} = 200$  кН, поэтому режим циклического нагружения был изменен. Статическое нагружение выполнялось до нагрузки  $P_m = 100$  кН, амплитуда нагрузки варьировалась от  $P_a = 10$  кН до  $P_a = 90$  кН.

Анализ зависимости неупругих деформаций образцов от амплитуды нагрузки  $P_a$  показал, что более близкими по этим характеристикам были образцы 1 и 3 (рисунок 3.2). При амплитуде нагрузки, равной  $P_a = 100$  кН и соответствующей напряжению 620 МПа, происходили резкие по величине изменения неупругости. Однако образец 1 выдерживал эти нагрузки, а образец 3 при этих нагрузках быстро разрушался. При анализе результатов испытаний образца 2 было получено, что на пятой ступени нагружения происходили изменения неупругих свойств, которым соответствовал рост величины раскрытия петли гистерезиса (рисунок 3.2).

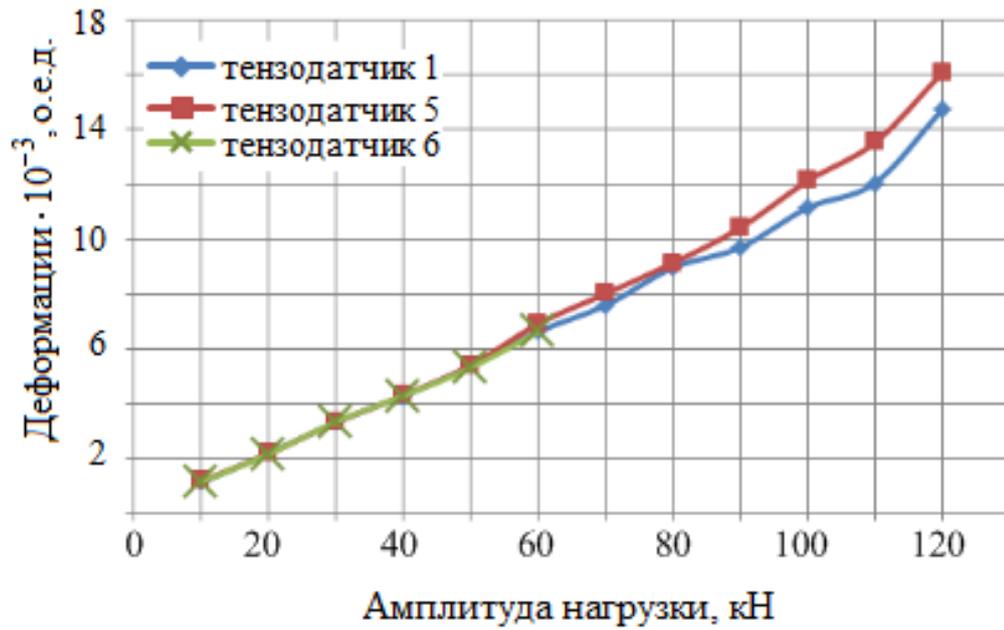


**Рисунок 3.2 – Амплитудные зависимости раскрытия петли неупругости образцов, пересчитанные в напряжения и деформации**

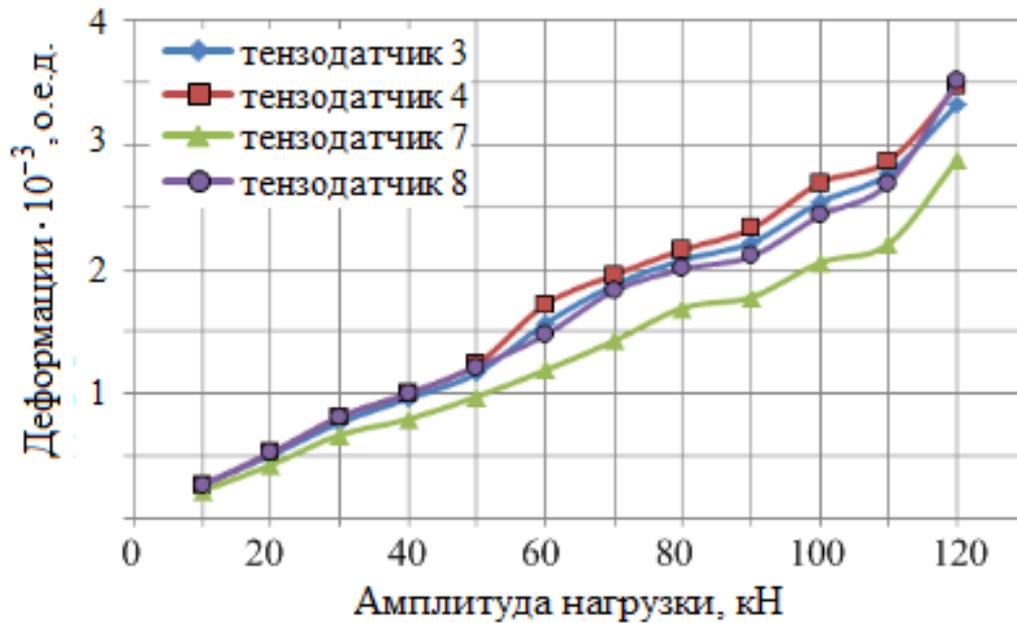
Для измерения НДС на образцы наклеивались восемь тензодатчиков типа ПКС-12 (рисунок 3.1,а). Тензодатчики 1, 2, 5, 6 были расположены вдоль направления приложения нагрузки, а тензодатчики 3, 4, 7, 8 – поперек направления. К тензометрической системе ММТС-64.01 подключался тензомост силоизмерителя нагружающей машины *MTS-50*. С периодичностью в 30 с проводилась регистрация показаний тензодатчиков, передача и запись информации в компьютер.

При обработке результатов тензометрии была определена разность между максимальными (при нагрузке  $P_{max}$ ) и минимальными (при нагрузке  $P_{min}$ ) показаниями каждого тензодатчика. На рисунке 3.3 показана зависимость изменения размаха деформаций от амплитуды нагрузки для тензодатчиков, наклеенных вдоль (рисунок 3.3,а) и поперек (рисунок 3.3,б) направления приложения нагрузки к образцу 2.

При нагружении образца 2 тензодатчики 3, 4, 8 с пятой ступени нагружения начинали регистрировать неупругие деформации (рисунок 3.3,б). Этому процессу соответствовал значительный рост величины раскрытия петли пластического гистерезиса (кривая 2 на рисунке 3.2), что указывало на изменение неупругих свойств. По показаниям симметрично расположенных тензодатчиков 1 и 5 был определен момент появления видимого расслоения. До шестой ступени нагружения их показания были одинаковы, далее начали появляться различия (рисунок 3.3,б), а на седьмой ступени с помощью сетевой видеокамеры было обнаружено сквозное расслоение в области расположения тензодатчиков 5 и 6.



а)

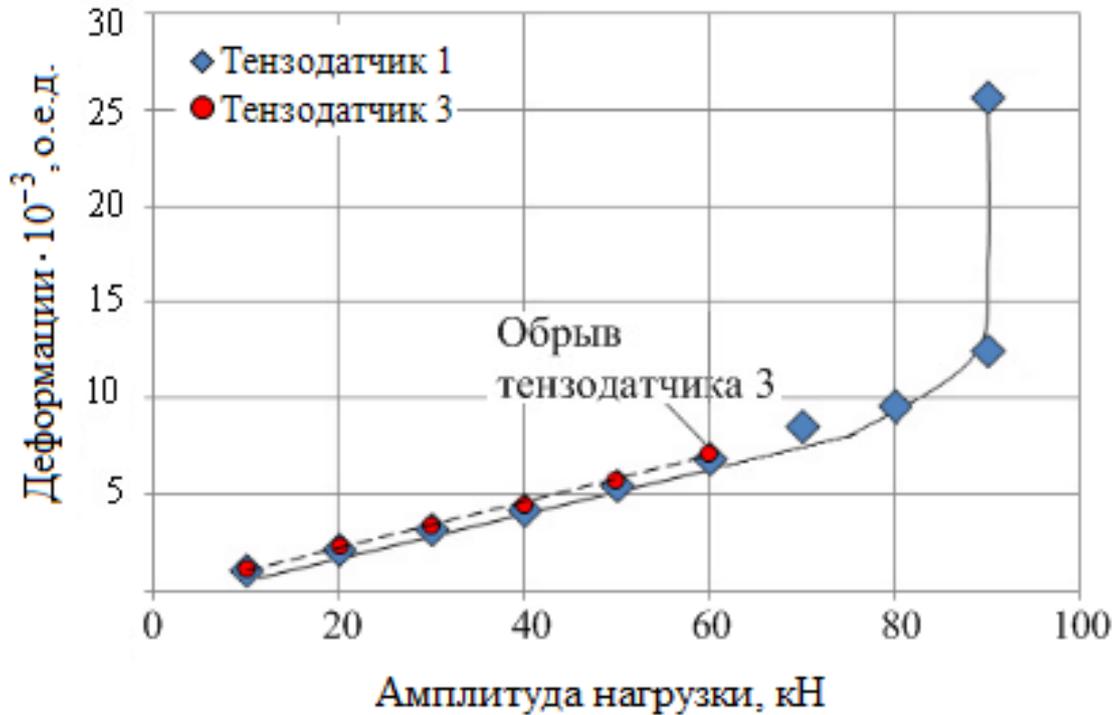


б)

**Рисунок 3.3 – Изменение деформации в области наклейки тензодатчиков на образце 2, расположенных вдоль (а) и поперек (б) направления приложения нагрузки**

Для образца 4 построены зависимости деформации от амплитуды нагрузки, рассчитанные по показаниям симметрично наклеенных тензодатчиков 1 и 3 (рисунок 3.4). Согласно этим данным, материал в области наклейки тензодатчика 3 испытывал бóльшие деформации, чем в области расположения тензодатчика 1. Разность между их показаниями на первой ступени нагружения составляла  $0,05 \cdot 10^{-3}$  о.е.д., а на пятой ступени при изменении нагрузки от  $P_{min} = 50$  кН до  $P_{max} = 150$  кН увеличилась до  $0,35 \cdot 10^{-3}$ . При этом сетевой видеокамерой было выявлено рас-

слоение правой стороны образца в области тензодатчика 3. На шестой ступени нагружения ( $P_{min} = 60$  кН,  $P_{max} = 160$  кН) разрушение привело к его обрыву.

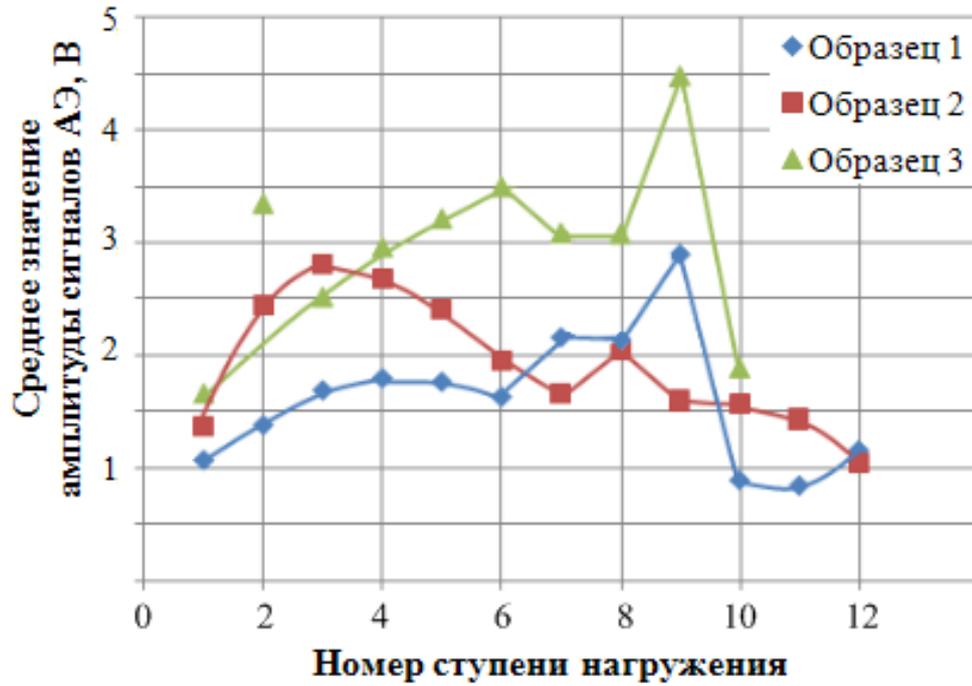


**Рисунок 3.4 – Зависимость деформаций в области наклейки тензодатчиков 1 и 3, расположенных вдоль образца 4, от амплитуды нагрузки  $P_a$**

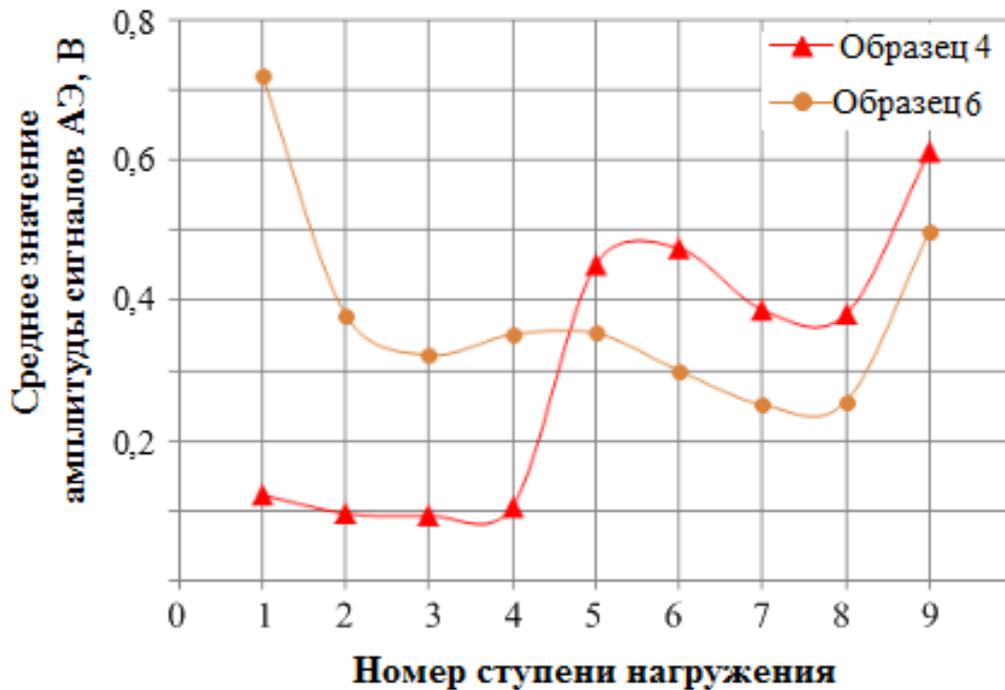
Для определения связи основных информативных параметров сигналов АЭ с процессом накопления повреждений и разрушения образцов проводилось их сопоставление с изменениями неупругих деформаций. Анализ распределения основных информативных параметров сигналов АЭ (амплитуда, доминантная частота, время нарастания переднего фронта) выполнялся для каждой ступени нагружения длительностью  $t = 50$  с, которая была разделена на интервалы  $\Delta t = 2$  с. Для каждого интервала времени были определены медиана и среднее значение выбранного информативного параметра сигнала АЭ. Установлено, что амплитуда имела наиболее выраженные экстремумы, соответствующие процессам разрушения. На рисунке 3.5 приведена зависимость среднего значения амплитуды сигналов АЭ от ступени нагружения для образцов первой (а) и второй (б) партий.

В процессе испытания образца 1 наблюдалось увеличение среднего значения амплитуды сигналов АЭ до четвертой ступени нагружения. Далее до шестой ступени амплитуда незначительно снижалась, а на девятой ступени приняла максимальное значение, составляющее 3 В (рисунок 3.5,а). На последней ступени нагружения среднее значение амплитуды не превышало 1,2 В. Для образца 2 амплитуда сигналов АЭ возрастала до третьей ступени нагружения, соответствующей изменению нагрузки от  $P_{min} = 100$  кН до  $P_{max} = 160$  кН. При этом активность сигналов также значительно увеличилась (рисунок 3.6). На восьмой ступени амплитуда возросла

по сравнению с предыдущими значениями на 0,5 В. Сетевой видеокамерой в данный момент времени был зарегистрирован активный рост сквозного расслоения. Разрушение образца 2 произошло на двенадцатой ступени нагружения.



а)



б)

Рисунок 3.5 – Зависимость средних значений амплитуды сигналов АЭ от номера ступени нагружения при испытании образцов первой (а) и второй (б) партий

При испытании образца 3 разрушение произошло на десятой ступени нагружения. При этом в образце не было видимых повреждений, которые могли бы вызвать внезапное разрушение. Анализ среднего значения амплитуды показал, что на девятой ступени отмечено ее резкое увеличение, после чего наблюдалось также значительное снижение амплитуды сигналов АЭ от 4,5 В до 2 В (рисунок 3.5,а).



**Рисунок 3.6 – Зависимость активности сигналов АЭ от номера ступени нагружения образца 2**

В процессе нагружения образца 4 на пятой ступени наблюдалось расслоение одной из его сторон и был слышен характерный треск. Обработка результатов АЭ-контроля показала, что на данном этапе нагружения среднее значение амплитуды увеличилось с 0,1 В до 0,45 В (рисунок 3.5,б). Последней ступени нагружения соответствовала средняя амплитуда, равная 0,6 В.

Образец 6 частично расслоился уже на первой ступени нагружения. Для данного процесса были характерны сигналы АЭ с высокой амплитудой, равной 0,7 В. Далее со второй по восьмую ступень нагружения амплитуда сигналов АЭ изменялась в интервале 0,25... 0,35 В. На девятой ступени нагружения при максимальной нагрузке данный параметр увеличился до 0,5 В.

Расслоению материала образцов из углепластика соответствовало увеличение среднего значения амплитуды сигналов АЭ при нагружении. Образцы 1 и 3 обладали похожими зависимостями, которые характеризовались резким увеличением амплитуды сигналов АЭ на девятой ступени нагружения (рисунок 3.5,а). Для образцов 4–9 второй партии было характерно уменьшение амплитуды на предпоследней ступени и ее резкое увеличение – на последней (рисунок 3.5, б).

В процессе циклических испытаний происходила регистрация шумов, которые оказывали влияние на результаты обработки сигналов АЭ. Для определения изменения структуры сигналов АЭ использовалось вейвлет-преобразование, позволившее определить структурный коэффициент  $P_{D32}(f)$  и его спектральные характеристики и рассчитать функционал  $F$  вида [33, 82]:

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

где  $G = \zeta_{3/4}\{P_{D32}(f)\}$ , – верхний квартиль для структурного коэффициента  $P_{D32}(f)$ ;

$H = \zeta_{1/2}\{MARSE(f)\}$  – медиана значений энергетического параметра  $MARSE$  сигналов АЭ;

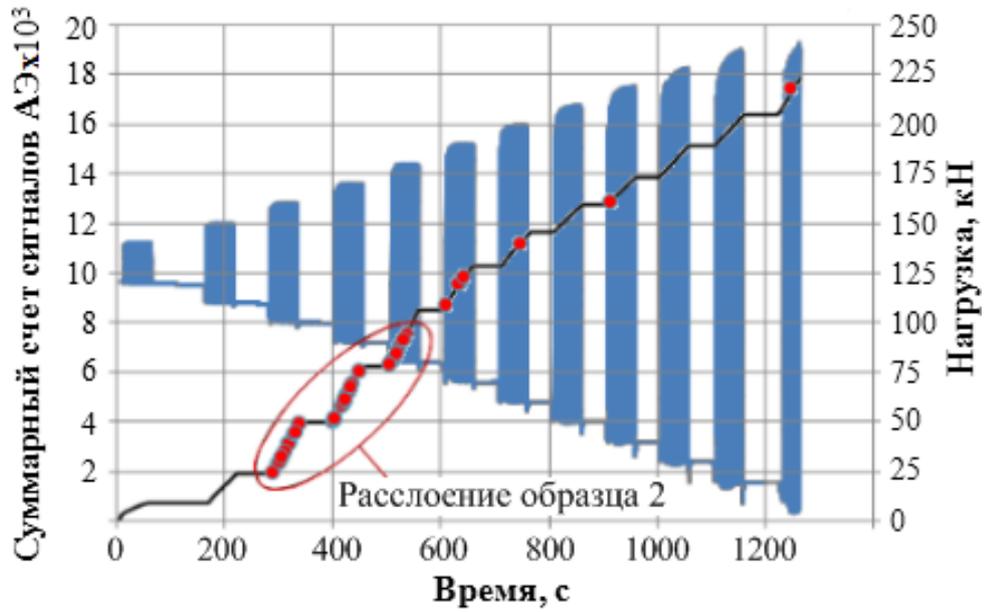
$MARSE$  – энергетический параметр;

$\zeta_p$  – квантиль порядка  $p$  скалярной случайной величины ( $p=3/4$  и  $1/2$ ).

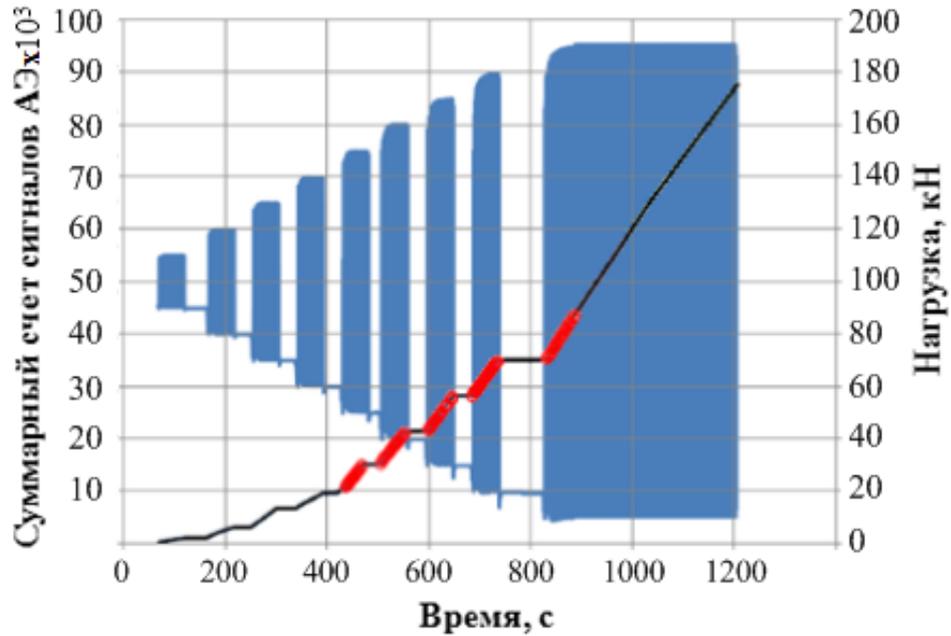
На рисунке 3.7,*а* показана зависимость суммарного счета сигналов АЭ от времени для образца 2. Процессу разрушения образца 2 на пятой ступени нагружения соответствовало начало регистрации сигналов со значением функционала  $F = (15 - 20)$  и увеличение активности сигналов АЭ в два раза (рисунок 3.6).

Для образца 4 рассмотрены сигналы АЭ со значением функционала, изменяющегося в интервале  $F = (15 - 20)$ . Они начали активно регистрироваться на пятой ступени нагружения при изменении нагрузки от  $P_{\min} = 50$  кН до  $P_{\max} = 150$  кН (рисунок 3.7,*б*) и соответствовали началу разрушения образца.

Использование при обработке АЭ-информации функционала  $F$  позволило исключить из результатов сигналы от шумов и помех, обладающие низкими значениями  $MARSE$ . При этом с помощью структурного коэффициента, определяемого с использованием вейвлет-преобразования, выполнялась оценка частотно-временного распределения сигналов АЭ. Применение данного алгоритма обработки АЭ-информации показало, что появлению расслоения образца соответствуют сигналы АЭ с высоким значением энергии, регистрируемые АЭ-системой до визуального выявления данного дефекта.



а)



б)

● - сигналы АЭ со значением функционала  $F=(15...20)$

Рисунок 3.7 – Зависимость суммарного счета сигналов АЭ от времени при испытании образцов 2 (а) и 4 (б)

### 3.2 Разработка методики оценки влияния различных типов укладки монослоев на прочностные характеристики образцов из углепластика при циклических испытаниях

Решение задачи раннего обнаружения дефектов в КМ связано с прочностными исследованиями на трещиностойкость и сопротивляемость материала композита при воздействии различного типа нагрузок (статических, циклических, ударных) [27, 85]. В настоящее время прак-

тическое использование метода АЭ для контроля изделий из углепластика, как правило, ограничивается сравнительно простыми объектами из-за отсутствия методик, позволяющих получать устойчивую плоскостную локацию зоны разрушения с указанием координат дефектов и регистрацию в режиме реального времени информации, связанной с изменениями основных информативных характеристик сигналов АЭ и структуры композита.

Для оценки влияния типа укладки монослоев на прочностные характеристики исследовались образцы из углепластика на основе волокна *Toray T700* с геометрическими размерами 100x500 мм и толщиной, зависящей от количества однонаправленных нулевых монослоев, вдоль которых прикладывалась циклическая нагрузка (рисунок 3.8). В образцах 1, 2, 3 групп укладка отличалась только количеством однонаправленных монослоев в соотношении 6:3:1, а в качестве концентратора напряжений использовалось отверстие диаметром  $d = 14$  мм.



**Рисунок 3.8 –Схема установки ПАЭ и тензодатчиков на образец**

Образцы устанавливались в электрогидравлическую машину *MTS-50* и нагружались циклической нагрузкой частотой 3 Гц и 5 Гц до разрушения. Значение нагрузки составляло (70-80) % от разрушающей, полученной при статических испытаниях образцов с такими же геометрическими размерами и типами укладки монослоев. В процессе испытаний определялась величина нагрузки и число циклов нагружения в момент появления разрушения (таблица 3.1).

С использованием тензометрии проводилось измерение НДС образца при нагружении и отслеживался процесс развития разрушения. При испытаниях выполнялась регистрация процесса разрушения образцов сетевой камерой *AXIS 213 PAL PTZ*. Это позволило в режиме реального времени наблюдать за структурой материала углепластика с момента зарождения дефектов до полного разрушения образцов.

**Таблица 3.1 – Основные прочностные характеристики образцов из углепластика Т700, полученные в процессе циклического нагружения**

Но- мер груп- пы	Номер образ- ца	Тип укладки	Частота нагружения, Гц Разрушающая нагрузка, кН Число циклов нагружения	Число циклов нагру- жения при выявле- нии разрушения сетевой камерой
1	1	Двенадцать слоев с укладкой [±45/90/0 <sub>6</sub> /90/±45] Толщина образца 2,3 мм	3 Гц 160 кН 23 100 циклов	1 500
2	1	Девять слоев с укладкой [±45/90/0 <sub>3</sub> /90/±45] Толщина образца 1,7 мм	5 Гц 80 кН 26 300 циклов	1 500
	2		5 Гц 80 кН 19 800 циклов	1 200
	3		5 Гц 80 кН 16 600 циклов	1 200
	4		3 Гц 80 кН 25 000 циклов	800
3	1	Семь слоев с укладкой [±45/90/0/90/±45] Толщина образца 1,3 мм	5 Гц 40 кН 13 951 цикл	4 500
	2		5 Гц 40 кН 32 000 циклов	24 000
	3		5 Гц 37,5 кН 30 500 циклов	14 000
	4		5 Гц 37,5 кН 28 900 циклов	14 000
	5		5 Гц 37,5 кН 39 000 циклов	15 500

Группу 1 составляли образцы со схемой укладки [±45/90/0<sub>6</sub>/90/±45], состоящие из 12 монослоев, из которых 6 – однонаправленные. Образцы группы 2 с укладкой [±45/90/ 0<sub>3</sub>/ 90/±45] содержали 7 монослоев, из которых 3 были однонаправленные. Группу 3 составляли образцы с укладкой [±45/90/0/90/±45], в которых 1 монослой был однонаправленный.

В процессе испытания образца 1 группы 1 разрушение начиналось в области концентратора напряжений и было зарегистрировано сетевой камерой при  $1,5 \cdot 10^3$  циклах нагрузки. При этом наблюдалось расслоение материала вдоль нулевых волокон. На рисунке 3.9, а, б показана локация сигналов АЭ при нагрузке  $P = 100$  кН.

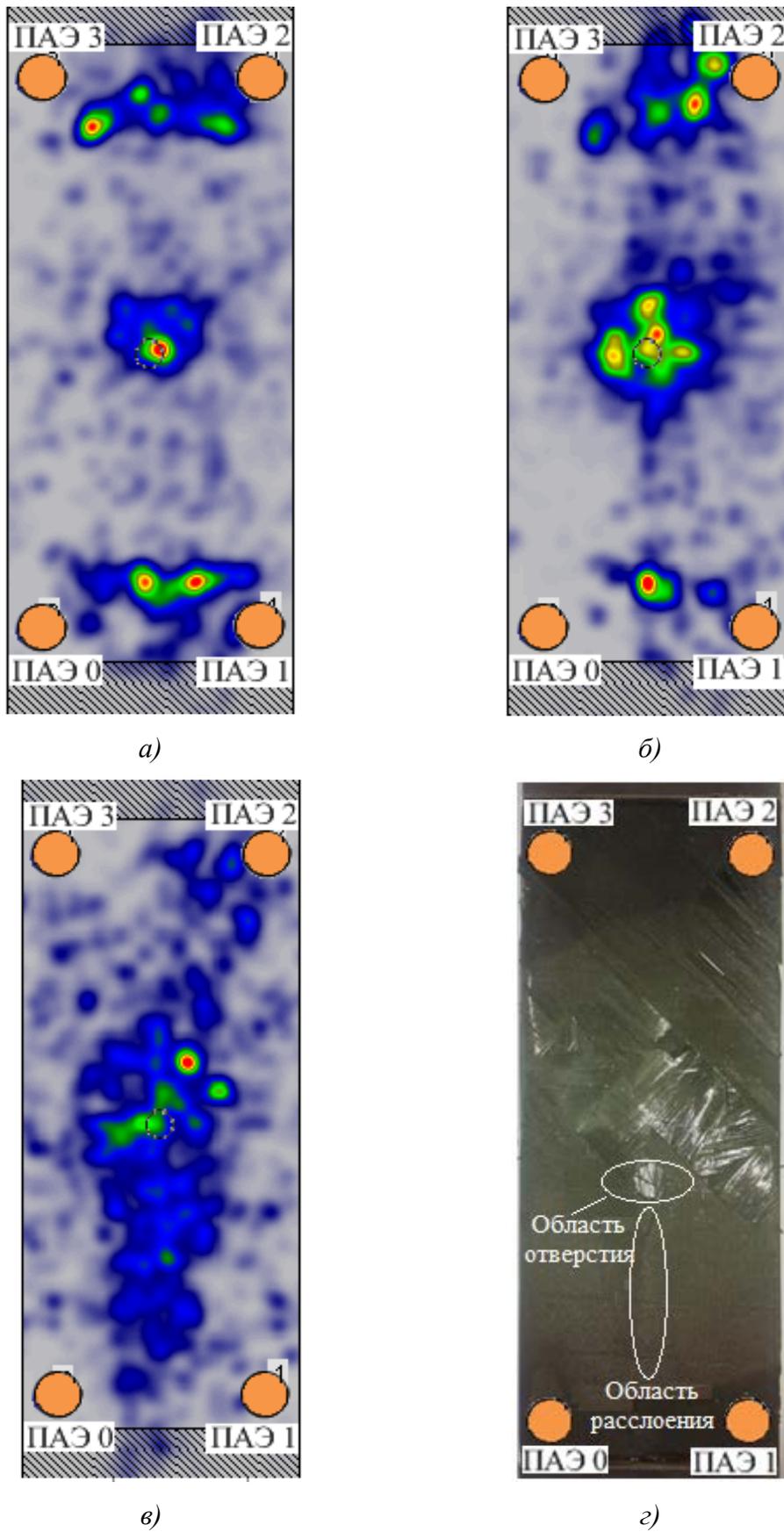


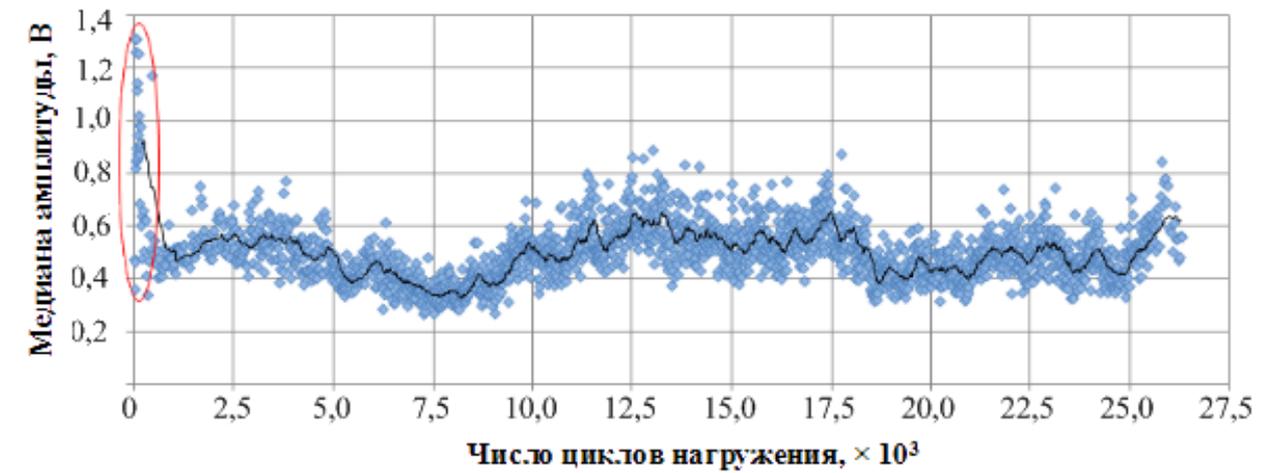
Рисунок 3.9 – Локация сигналов АЭ при испытании образца 1 группы 1: *a* – *б* при нагрузке  $P = 100$  кН; *в* – при нагрузке  $P = 140$  кН; *г* – вид разрушенного образца

В начале нагружения в области концентратора напряжений сигналы обладали максимальной суммарной амплитудой. Из этой области сигналы АЭ активно регистрировались уже на первых циклах нагружения. Их амплитуда увеличилась от 0,5 В до 5 В и на 700 циклах был отмечен локальный максимум. При нагрузке  $P = 100$  кН образец выдержал  $5,5 \cdot 10^3$  циклов, после чего нагрузка была увеличена до 140 кН и образец нагружался до  $23 \cdot 10^3$  циклов. При нагрузке  $P = 140$  кН область локации начала распространяться в вертикальном направлении от отверстия (рисунок 3.9, в), что подтверждал визуальный контроль процесса расслоения образца 1 группы 1.

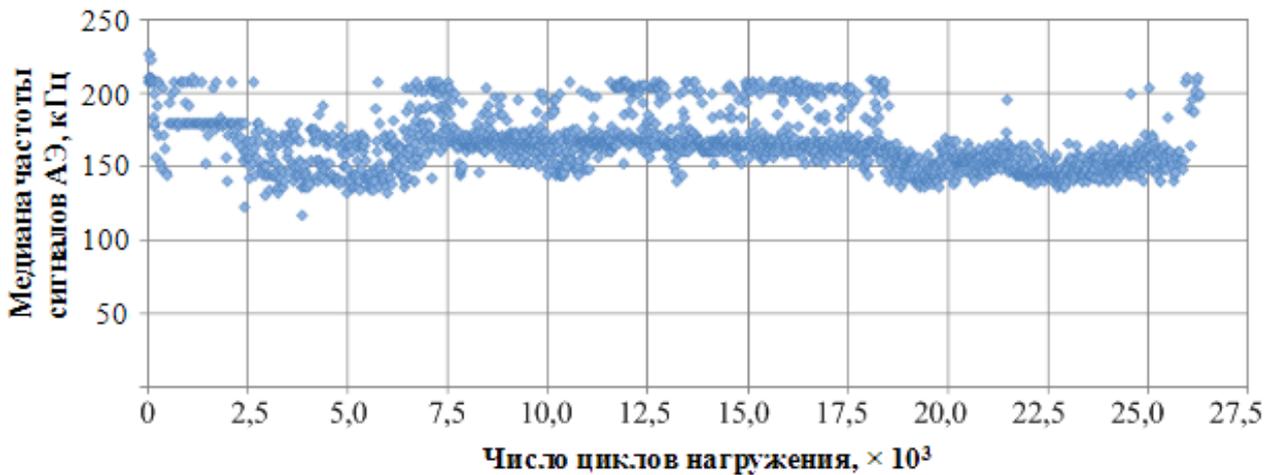
Обрыв тензодатчиков 3 и 5 (рисунок 3.8), расположенных в зоне кромки отверстия образца, произошел на 150 циклах нагружения. Далее на 5500 цикле разрушился тензодатчик 2, тензодатчик 6 разрушился на 7100 цикле. Тензодатчик 4 разрушился на 7500 цикле, а тензодатчик 1 – на 9500 цикле. На рисунке 3.9,г приведена фотография образца 1 группы 1, подтверждающая расслоение материала, показанное на рисунке 3.9,в. Как только расслоение образца 1 группы 1 достигло зоны наклейки тензодатчика 6 (рисунок 3.8), произошел его обрыв, что позволило определить координаты зоны продвижения разрушения. После увеличения нагрузки до 160 кН образец 1 группы 1 нагружался до разрушения еще  $0,1 \cdot 10^3$  циклов.

Образцы группы 2 при нагрузке  $P = 80$  кН и частоте 5 Гц выдержали в среднем  $25 \cdot 10^3$  циклов нагружения. Сетевой камерой расслоение образца 1 группы 2 было выявлено при  $1,5 \cdot 10^3$  циклах нагружения. Процесс его разрушения происходил аналогично разрушению образца 1 группы 1. Наблюдалось отслоение верхних монослоев в области концентратора напряжений и расслоение монослоев в вертикальном направлении от него. На первых 20 циклах (рисунок 3.10, а) был слышен треск и зарегистрировано порядка 200 сигналов АЭ амплитудой от 0,4 В до 1,4 В. Затем амплитуда сигналов АЭ увеличилась от 0,4 В до 0,6 В. После появления расслоения сигналы АЭ регистрировались с доминантной частотой 150 кГц (рисунок 3.10, б). Визуальный осмотр образцов группы 2 в процессе испытаний показал, что при одинаковых условиях нагружения расслоение в области концентратора напряжения появлялось при  $(1,2-1,5) \cdot 10^3$  циклах.

При испытании образцов 1 и 2 группы 3 нагружение начинали при нагрузке  $P = 30$  кН. При этом к образцу 1 было приложено  $17,5 \cdot 10^3$  циклов, после чего нагрузку увеличили до  $P = 35$  кН и выдерживали в течение  $4 \cdot 10^3$  циклов. Затем нагрузка была увеличена до  $P = 40$  кН и при данной нагрузке образец выдержал еще  $10,5 \cdot 10^3$  циклов, после чего разрушился (таблица 3.1).



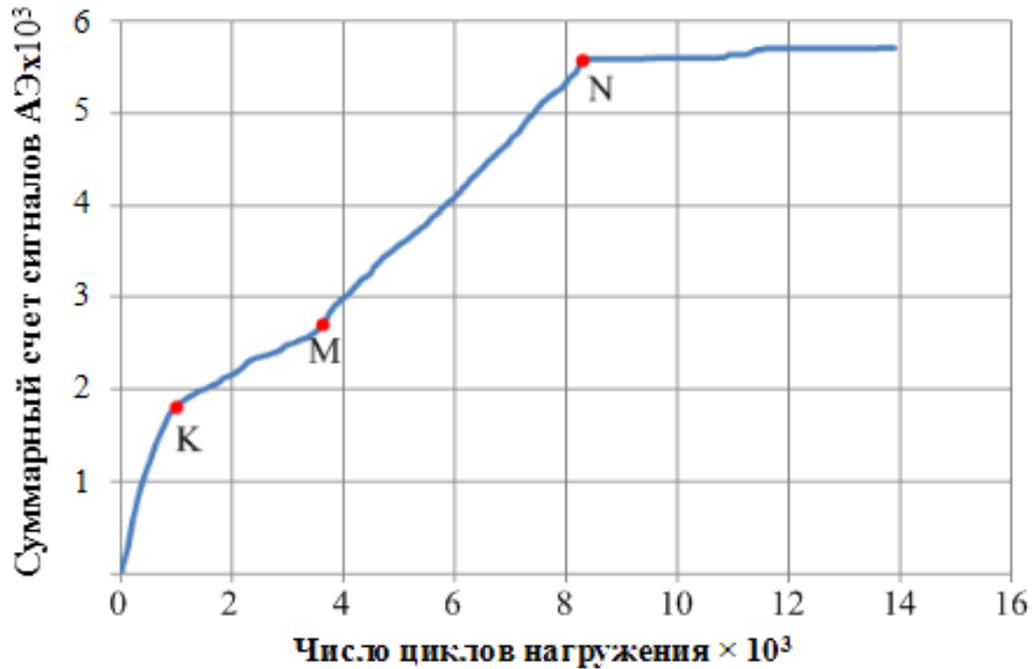
а)



б)

**Рисунок 3.10 – Зависимость медианы амплитуды (а) и частоты (б) от числа циклов нагружения образца 1 группы 2**

Образец 3 группы 3 нагружали циклической нагрузкой  $P = 40$  кН частотой 5 Гц (таблица 3.1). Суммарный счет сигналов АЭ увеличивался с постоянной скоростью, что соответствует точке  $K$  на рисунке 3.11. При дальнейшем увеличении числа циклов нагружения наблюдалось уменьшение скорости изменения суммарного счета сигналов из данной области (отрезок  $KM$  на рисунке 3.11). При наработке  $3,7 \cdot 10^3$  циклов активность сигналов снова увеличилась (отрезок  $MN$  на рисунке 3.11) и было определено расслоение образца в области концентратора напряжений. При окончательном расслоении монослоев, расположенных между датчиками ПАЭ 1 и ПАЭ 2 (рисунок 3.8), локация сигналов из данной области практически прекратилась (точка  $N$  на рисунке 3.11).



**Рисунок 3.11 – Зависимость суммарного счета сигналов АЭ от числа циклов нагружения при испытании образца 3 группы 3**

Известно, что наибольшая точность локации источников сигналов АЭ обеспечивается при кластеризации по оцифрованной форме [3]. Однако при этом на обработку информации затрачивается большое машинное время. Поскольку при циклических испытаниях объем регистрируемой информации значительно больше, чем при статических, то кластеризация сигналов АЭ по оцифрованной форме может занимать несколько часов.

Для кластеризации были выбраны сигналы АЭ, зарегистрированные в начале испытаний образца 1 группы 2 при числе циклов нагружения  $N_1 = (0 - 3,0) \cdot 10^3$ , при числе циклов  $N_2 = (3,0 - 5,0) \cdot 10^3$ , соответствующих появлению видимых расслоений монослоев, при числе циклов  $N_3 = (23,5 - 25,5) \cdot 10^3$  при активном разрушении образца (таблица 3.2).

**Таблица 3.2 – Определение времени обработки информации при двухэтапной кластеризации и кластеризации по оцифрованной форме сигналов АЭ**

Номер образца	Тип кластеризации	Число циклов нагружения	Количество кластеров	Количество сигналов АЭ	Время обработки информации, с
Образец 2	По оцифрованной форме	$N_1=(0...1600)$	249	6849	632
		$N_2=(1600...3400)$	227	8018	366
		$N_3=(9300...10400)$	355	5251	1353
группа 1	Двухэтапная кластеризация	$N_1=(0...1600)$	90	4523	6,8
		$N_2=(1600...3400)$	67	5539	7,4
		$N_3=(9300...10400)$	20	919	6,4

Продолжение таблицы 3.2

Номер образца	Тип кластеризации	Число циклов нагружения	Количество кластеров	Количество сигналов АЭ	Время обработки информации, с
Образец 1 группа 2	По оцифрованной форме	$N_1=(0...3000)$	193	5427	1260
		$N_2=(3000...5000)$	207	2797	1152
		$N_3=(23500...25500)$	250	4204	848
	Двухэтапная кластеризация	$N_1=(0...3000)$	82	2047	8,5
		$N_2=(3000...5000)$	72	1767	8,5
		$N_3=(23500...25500)$	29	788	6,1
Образец 3 группа 3	По оцифрованной форме	$N_1=(0...700)$	483	7361	1560
		$N_2=(3600...5200)$	310	5371	902
		$N_3=(6500...8200)$	258	5893	585
	Двухэтапная кластеризация	$N_1=(0...700)$	40	2481	6,2
		$N_2=(3600...5200)$	31	2837	6,1
		$N_3=(6500...8200)$	23	1865	6,1

При кластеризации по оцифрованной форме сигналов АЭ был установлен пороговый уровень коэффициента корреляции, равный 0,6. Сигналы кластера 20 (рисунок 3.12,а) были локализованы в области отверстия и их амплитуда составила (2 – 3) В. Сигналы кластера 7 с амплитудой (0,5 – 1,0) В соответствовали вертикальному расслоению образца от концентратора напряжения. Сигналы из области захватов были выделены в отдельные кластеры.

Сигналы кластера 11 (рисунок 3.12,б) зарегистрированы при числе циклов  $(3,8 - 4,2) \cdot 10^3$  и обладали амплитудой более 3 В. При этом сигналы кластера 17 с амплитудой, не превышающей 1 В, были зарегистрированы при  $(3,9 - 4,0) \cdot 10^3$  циклов нагружения. В результате кластеризации сигналов по оцифрованной форме было получено 193 кластера, в которые были отнесены 5427 сигналов.

Для повышения скорости выполнения операций обработки АЭ-информации без значительного уменьшения точности локации сигналов АЭ использовалась двухэтапная кластеризация [70].

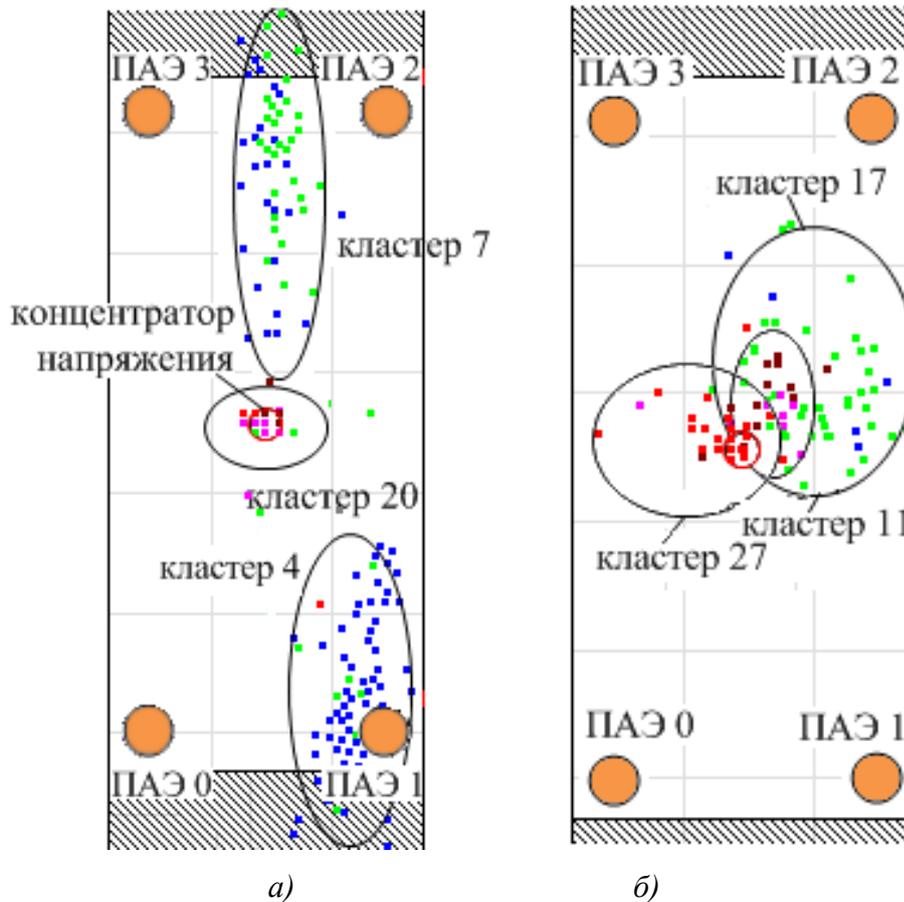
На первом этапе выполнялась кластеризация по параметрам сигнала АЭ [73, 84]. Данный этап кластеризации заключался в выделении сигналов АЭ сначала по координатам, а затем по набору выбранных параметров (доминантная частота, число осцилляций, время и скорость нарастания переднего фронта сигналов) [73]. Первый зарегистрированный сигнал принимался в качестве базового, а при определении второго и последующих кластеров в качестве базового

выбирался следующий сигнал, не отнесенный в предыдущий кластер. Для базового сигнала определялась погрешность локации, которая представляет собой сумму вкладов погрешностей измерения скорости звука  $\Delta C$  и разности времен прихода  $\Delta T_i$  сигналов АЭ на датчики пьезоантенны по оцифрованной форме [73]. Затем находилась функция расстояния  $d_E$  между двумя сигналами. В качестве первого использовался базовый сигнал, а в качестве второго – поочередно все остальные. Функция расстояния на плоскости  $d_E(i)$  рассчитывалась по формуле:

$$d_E(i) = \sqrt{(x_{\text{баз}} - x_i)^2 + (y_{\text{баз}} - y_i)^2},$$

где  $x_{\text{баз}}, y_{\text{баз}}$  – координаты базового сигнала АЭ;

$x_i, y_i$  – координаты текущего сигнала АЭ.



**Рисунок 3.12 — Локация сигналов АЭ после кластеризации по оцифрованной форме:**

***a* – при  $N_1 = (0 \dots 3000)$  циклах; *b* – при  $N_2 = (3000 \dots 5000)$  циклах**

Расстояние между базовым и оставшимися сигналами сравнивались с максимальной погрешностью определения координат базового сигнала. Если рассчитанное расстояние было меньше максимальной погрешности, то считалось, что данный сигнал может относиться к тому же источнику, что и базовый. Далее проводилась кластеризация по параметрам. Для определения принадлежности каждого из сигналов, кластеризованным по координатам, к тому же кластеру, что и базовый сигнал, значения его четырех параметров поочередно сравнивались с параметрами базового. Если значения всех параметров сравниваемого сигнала находились в

пределах ширины заданного интервала от значений базового сигнала, то считалось, что они принадлежат к одному кластеру.

На втором этапе кластеризация выполнялась по оцифрованной форме сигнала, описанная в главе 2 параграфа 3, с коэффициентом корреляции 0,6.

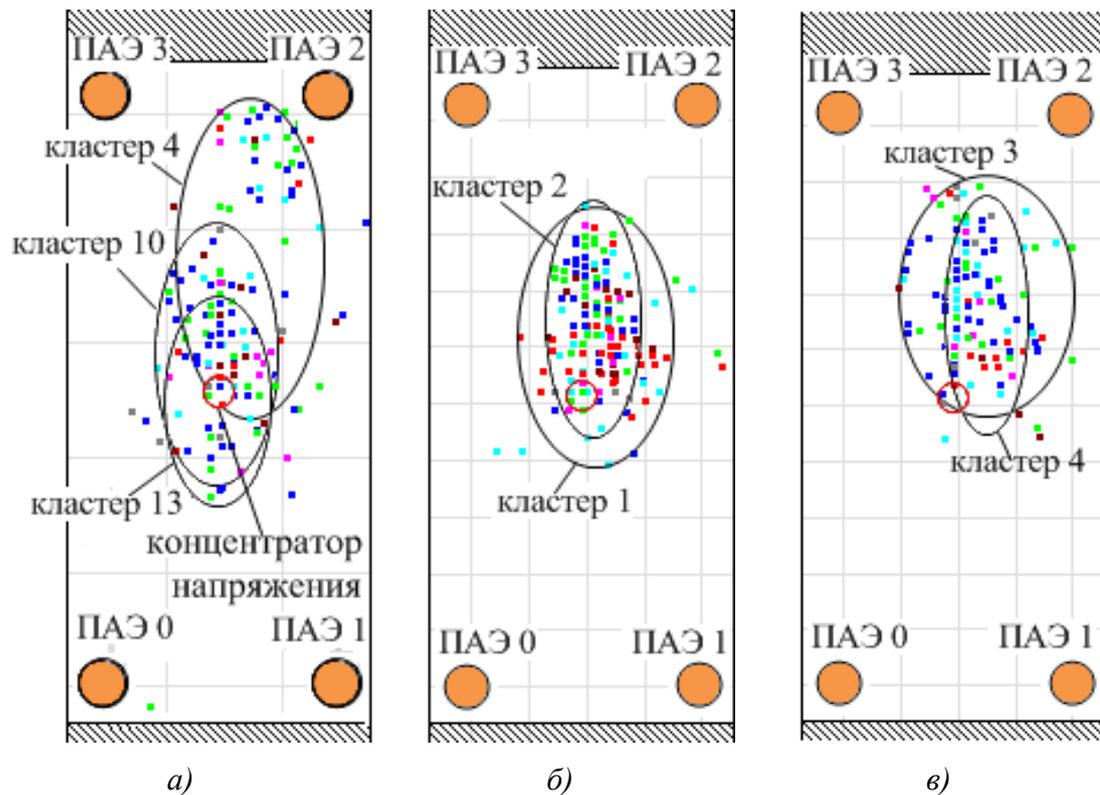
Двухэтапная кластеризация выполнялась для сигналов АЭ, зарегистрированных при нагружении образца 1 группы 2. Первому интервалу времени соответствовали сигналы, полученные при числе циклов  $N_1 = (0 - 3000)$ . На первом этапе кластеризации получено 49 кластеров, в которые были определены 3944 сигнала из зарегистрированных  $14,6 \cdot 10^3$  сигналов. Были определены группы сигналов, объединенных по ряду параметров и расположенных в области верхнего и нижнего захватов электрогидравлической машины *MTS-50*, а также – в области концентратора напряжений.

После второго этапа было получено 82 кластера. Анализ кластеров 4, 10 и 13, относящихся к сигналам, локализованным в области концентратора напряжений, показал, что их регистрация начиналась в разное время при различном числе циклов. Остальные кластеры, не относящиеся к концентратору, не анализировались.

Сигналы кластера 4 регистрировались весь исследуемый временной интервал  $N_1$ . Затем началась регистрация сигналов кластера 10, а при выполнении более 1500 циклов нагружения – кластера 13 (рисунок 3.13,а). Данное распределение кластеров во времени соответствовало появлению новых разрушений образца. При выполнении 1500 циклов нагружения было выявлено расслоение кромки образца в области концентратора напряжений.

Затем были проанализированы сигналы, зарегистрированные при числе циклов  $N_2 = (3 - 5) \cdot 10^3$ . В 40 кластеров были отнесены сигналы, локализованные в области концентратора напряжений. Анализ сигналов АЭ показал, что их регистрация наблюдалась с начала указанного временного интервала, определяемого числом циклов  $N_2$ . Сигналы кластеров 1, 2, 3, 4 были локализованы в области, соответствующей распространению расслоения в образце 1 группы 2 от концентратора напряжений вертикально (рисунок 3.13,б, в). При этом в кластеры 1 и 2 (рисунок 3.13,б) было определено большое количество сигналов с максимальным значением амплитуды. Сигналы кластеров 3 и 4 (рисунок 3.13,в) обладали меньшей амплитудой и соответствовали процессу дальнейшего распространения расслоения в образце.

В таблице 3.2 для сравнения приведены результаты кластеризации по оцифрованной форме и с использованием двухэтапного метода кластеризации. Для расчета выбирались только локализованные сигналы АЭ, но даже при этом условии время, необходимое для кластеризации по оцифрованной форме, в среднем было в 100 раз больше, чем при выполнении двухэтапной кластеризации.



**Рисунок 3.13 – Локация сигналов АЭ после двухэтапной кластеризации при нагружении образца 1 группы 2:** *а* – при  $N_1 = (0 - 3000)$  циклов;  
*б, в* – при  $N_2 = (3000 - 5000)$  циклов

Кроме того, при использовании двухэтапной кластеризации число полученных кластеров сократилось в 10 раз. Поэтому для обработки АЭ-информации при циклических испытаниях образцов из КМ более эффективно использовать двухэтапную кластеризацию, которая сокращает время обработки без существенного уменьшения точности локации.

### Выводы по главе 3

1. Проведен АЭ-контроль образцов из углепластика *T700* при циклическом нагружении. При испытании образцов также выполнялось тензометрирование и визуальный контроль. Это позволило сопоставлять появление и распространение разрушения с осуществляемой в режиме реального времени локацией сигналов АЭ и изменением НДС.

2. Проанализировано изменение неупругих свойств исследуемого материала по результатам испытаний образцов с однонаправленной укладкой монослоев. Предложен алгоритм определения момента появления неупругих пластических деформаций по изменению амплитуды, энергии и спектра сигналов АЭ. Анализ изменения энергии выполнялся с применением энергетического параметра *MARSE*, а оценка изменения частотно-временной структуры – с использованием структурного коэффициента  $P_{D32}$ . Для их одновременного учета предложено определять

функционал  $F$ . Автоматизация измерений, выполняемых по данной методике, позволяет выполнять оценку состояния углепластиков в процессе испытаний без прерывания процесса нагружения.

3. Выполнен анализ АЭ-информации, зарегистрированной при циклических испытаниях образцов из углепластика  $T700$  с различными типами укладки монослоев, с использованием двухэтапной кластеризации. Определены источники сигналов АЭ, соответствующие разрушению в области концентратора напряжений и в области захватов. Важным преимуществом примененного алгоритма кластеризации является сокращение времени выполнения анализа более, чем в 100 раз при уменьшении точности локации не более 3 % по сравнению с кластерным анализом по оцифрованной форме сигналов.

## ГЛАВА 4. ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ТЕНЗОМЕТРИИ

Современные КМ соответствуют требованиям по снижению массы при сохранении высоких прочностных свойств, что позволяет использовать их при создании конструкций ответственного назначения. Со временем механические свойства композиционной конструкции ухудшаются под влиянием различных ударных нагрузок, воздействия температуры, влажности [3, 27, 39, 41, 75, 86, 93, 103, 107]. Неоднородность структуры и высокая чувствительность к механическим повреждениям являются серьезными проблемами при производстве и эксплуатации конструкций из КМ. В связи с этим экспериментальные исследования прочности и степени опасности дефектов ответственных элементов конструкций, изготовленных из КМ, являются актуальными [15, 72, 90]. Для контроля изменений прочностных свойств и определения координат дефектов в процессе испытаний осуществляется мониторинг конструкций методами НК.

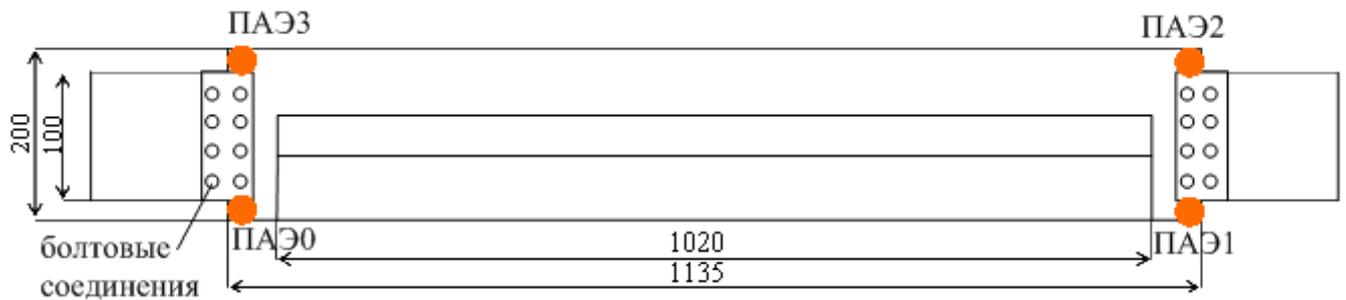
При прочностных испытаниях элементов авиационных конструкций (образцов, укрепленных стрингером, лонжеронов, фрагмента руля высоты), выполненных из углепластика, была поставлена задача локализации источников сигналов АЭ и определения их связи с наблюдаемыми разрушениями. По результатам исследования образцов из углепластика было установлено, что двухинтервальный метод позволяет выполнять локализацию сигналов АЭ с большей точностью.

При нагружении конструкций из углепластика на распространение УЗ-волн оказывает влияние не только анизотропная структура материала, но и наличие отверстий, болтов, стрингеров и других конструктивных элементов, которые при испытаниях являются дополнительными источниками шумов. Для достижения высокой точности локализации источников сигналов АЭ необходимо знать координаты ПАЭ в пьезоантенне [37, 87] и проводить автокалибровку. При этом определяется скорость звука в конструкции и правильность установки ПАЭ с точки зрения наличия акустического контакта с ней.

### 4.1 Испытание образцов из углепластика, укрепленных стрингерами

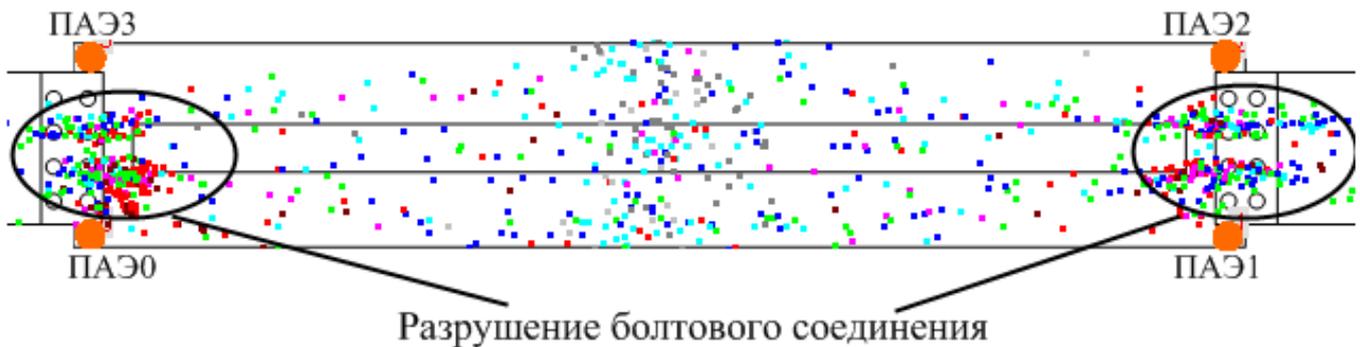
Испытаны образцы из углепластика *T700*, укрепленные стрингерами, при статическом одноосном растяжении с одновременной регистрацией сигналов АЭ. При их установке в нагружающую машину *MTS-50* металлические пластины крепились болтовыми соединениями, которые являлись концентраторами напряжений. При нагружении определялась нагрузка, при которой начиналась локализация сигналов АЭ из контролируемой области болтового соединения. Началу разрушения образца соответствовало увеличение активности сигналов АЭ.

Образец 1 был упрочнен полым стрингером цилиндрической формы шириной 50 мм (рисунок 4.1). Нагрузка изменялась ступенчато с интервалом, равным  $\Delta P = 10$  кН.



**Рисунок 4.1 – Геометрические размеры образца 1 со стрингером и схема установки ПАЭ**

В рабочей зоне образца было локализовано около 420 сигналов АЭ (рисунок 4.2,а). При этом визуально разрушения не выявлялись. Регистрация данных сигналов могла быть связана с приработкой материала. Активная локация сигналов АЭ наблюдалась в области болтовых соединений после достижения нагрузкой  $P = 80$  кН. При нагрузке  $P = 100$  кН произошел срез болтов в области, расположенной между датчиками ПАЭ0 и ПАЭ3, и регистрация высокоамплитудных сигналов (рисунок 4.2, а, б).



а)

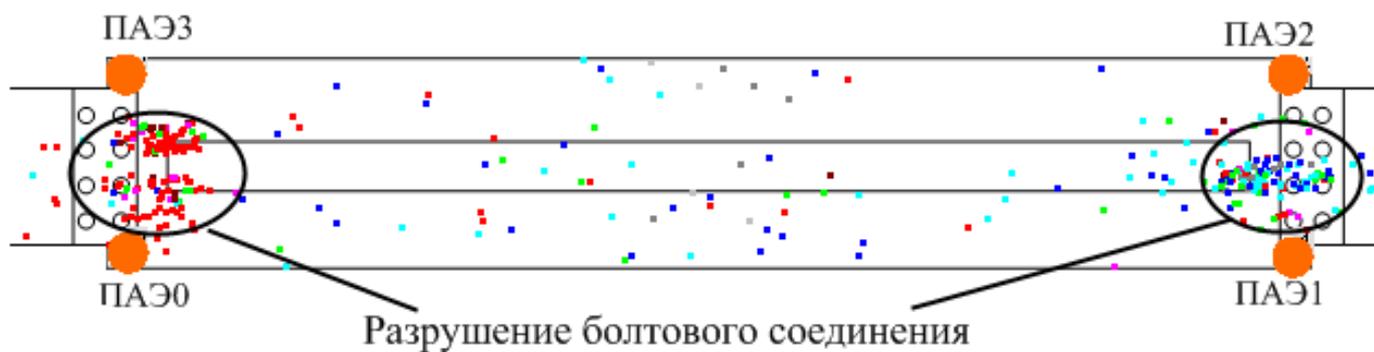


б)

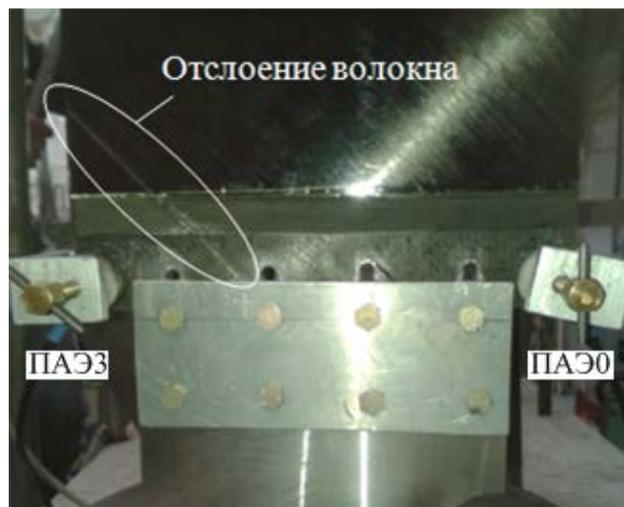
**Рисунок 4.2 – Локация сигналов АЭ (а) и вид разрушенного образца 1 (б) при первом нагружении**

Разрушенная часть образца 1 была срезана, смонтировано крепление под захват, после чего выполнено повторное нагружение. Локация сигналов АЭ из области установки датчиков ПАЭ0-ПАЭ3 началась при нагрузке  $P = 70$  кН (рисунок 4.3,а). Разрушение образца 1 при втором нагружении произошло при нагрузке  $P = 115$  кН в области между ПАЭ0 и ПАЭ3. При этом болты не были срезаны, но разрушился КМ, из которого был сделан образец (рисунок 4.3,б). Также произошло отслоение нескольких волокон верхнего слоя.

АЭ-информация, зарегистрированная при повторном нагружении образца 1, анализировалась с использованием структурного коэффициента  $P_{D32}(f)$  и функционала  $F[P_{D32}(f), MARSE(f)]$ , которые вычислялись по формулам (2.3) и (2.4). Анализ сигналов со значением функционала  $F = (16 - 19)$  показал, что они локализовались в режиме реального времени при нагрузках более  $P = 70$  кН в области расположения датчиков ПАЭ0 и ПАЭ3 (рисунок 4.3,а). Использование структурного коэффициента и функционала при обработке информации позволило определить группу сигналов, соответствующую разрушению исследуемого образца.



а)

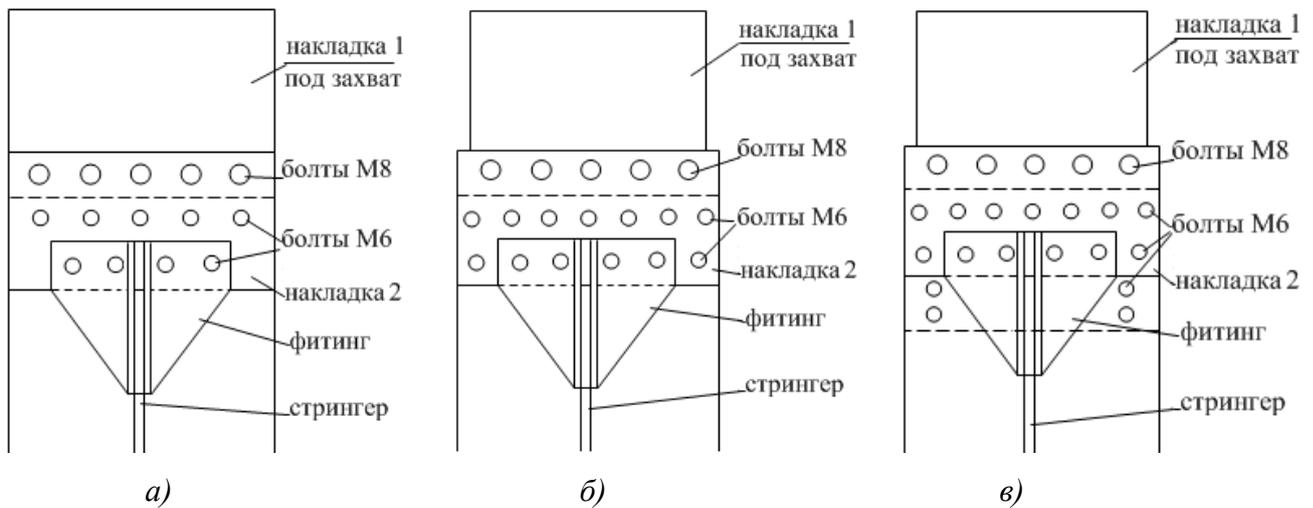


б)

Рисунок 4.3 – Локация сигналов АЭ (а) и вид разрушенного образца 1 (б) при втором нагружении

На нагружающей машине *MTS-50* проводили прочностные исследования семи образцов, укрепленных *T*-образным стрингером. При этом использовались различные типы болтового соединения. Испытания проводили на одноосное статическое растяжение со скоростью перемещения подвижного захвата, равной 6 мм/мин. Под захваты нагружающей машины были смонтированы накладки 1 (рисунок 4.4), прикрепленные к образцу посредством фитингов и металлических накладок 2. Соединение всех деталей было выполнено с использованием болтов и клея ВК–27.

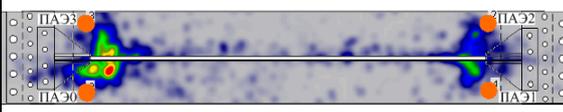
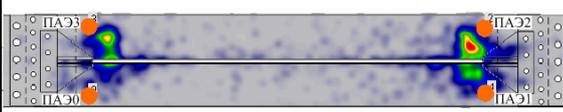
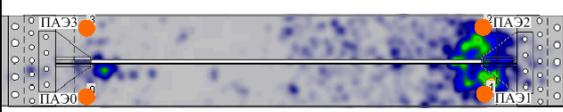
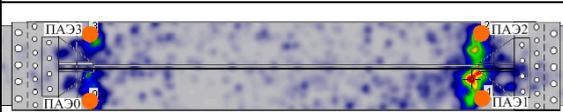
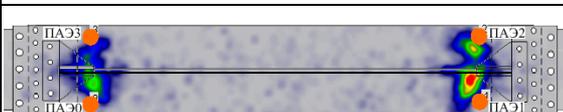
В образцах с маркировкой ТБКВ клей был нанесен в область между образцом и накладкой 2, а также между стрингером и фитингами (рисунок 4.4). В образцах ТБВ – только между образцом и накладкой 2. В таблице 4.1 приведены результаты испытаний данных образцов.



**Рисунок 4.4 – Схема болтового крепления образцов с маркировкой ТБВ1 (а), ТБВ2 (б) и ТБВ3 (в)**

По результатам испытаний образцов из углепластика *T700* со стрингерами в режиме реального времени получена локация сигналов АЭ, соответствующая наблюдаемым разрушениям материала композита или болтового соединения (таблица 4.1). Применение метода АЭ при контроле элементов композиционных конструкций из углепластика, укрепленных стрингером и обладающих концентраторами напряжений в виде болтовых отверстий, позволило осуществлять локацию источников сигналов АЭ. Использование распределения суммарной амплитуды для представления АЭ-информации в режиме реального времени позволило определять наиболее активные из них, приводящие при нагружении к разрушению конструкции.

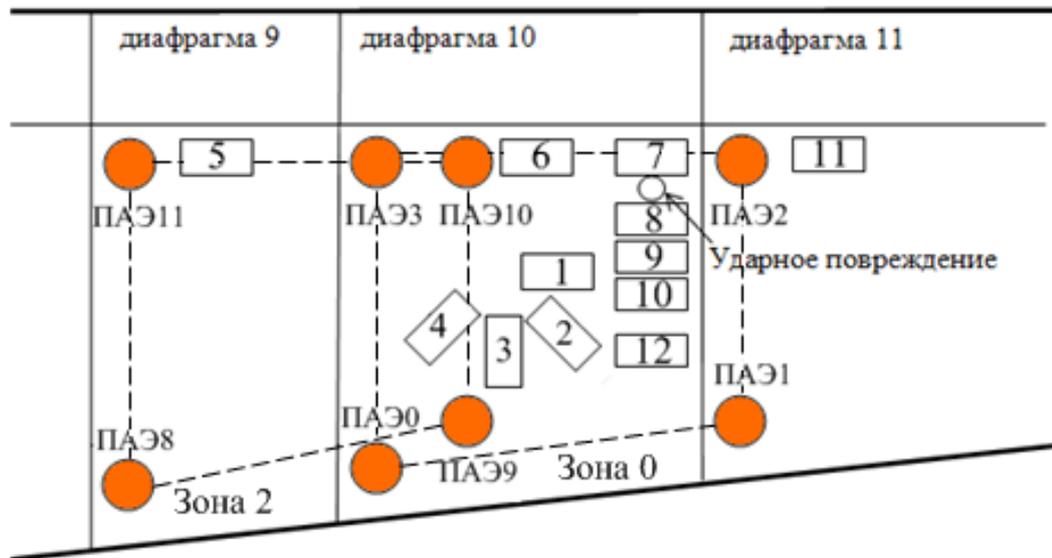
**Таблица 4.1 – Результаты статических испытаний образцов из углепластика T700, укрепленных стрингерами**

Маркировка образца	Локация сигналов АЭ	Разрушающая нагрузка, кН	Область разрушения	Максимальная суммарная амплитуда сигналов АЭ, В
ТБКВ1-3		116,7	Верхний захват (ПАЭ1–ПАЭ2)	23,0
ТБКВ1-4		120,0	Нижний захват (ПАЭ0–ПАЭ3)	36,8
ТБВ1-3		42,3	Верхний захват (ПАЭ1–ПАЭ2)	11,1
ТБВ1-4		37,0	Нижний захват (ПАЭ0–ПАЭ3)	43,8
ТБВ2-1		129,7	Верхний захват (ПАЭ1–ПАЭ2)	14,2
ТБВ3-1		178,3	Верхний захват (ПАЭ1–ПАЭ2)	33,0
ТБВ3-2		161,1	Верхний захват (ПАЭ1–ПАЭ2)	62,8

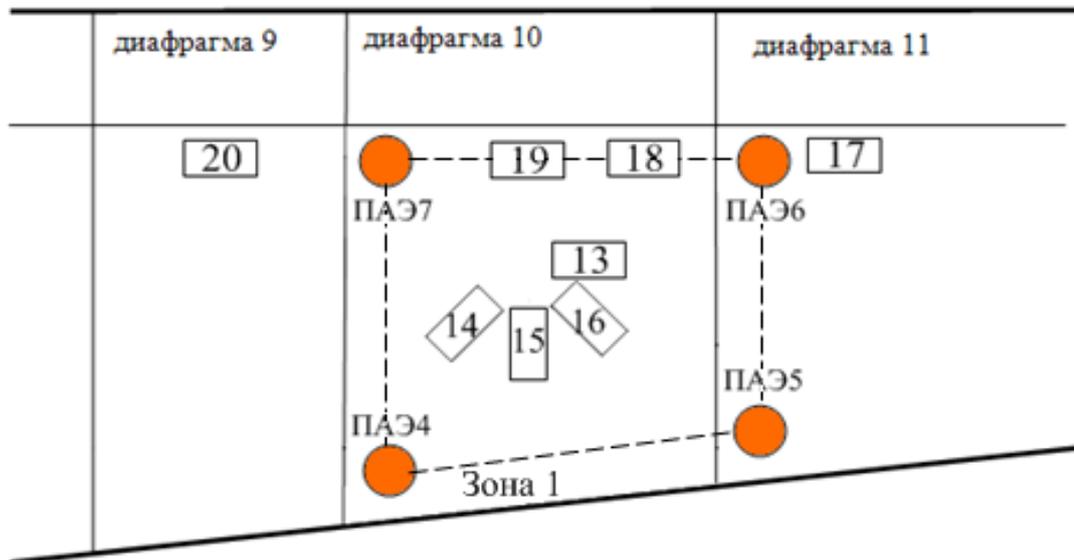
#### 4.2 Прочностные испытания фрагмента руля высоты самолета SSJ-100

Руль высоты – это аэродинамический орган управления самолетом, осуществляющий его вращение вокруг поперечной оси. Он представляет собой подвижную управляющую поверхность, отклонение которой вызывает движение самолета по тангажу [98]. В зависимости от аэродинамической схемы, руль высоты может быть установлен в различных местах самолета. В процессе эксплуатации на него оказывают воздействие статические, циклические и динамические нагрузки. При наличии дефектов это может привести к разрушению конструкции и аварийной ситуации.

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 наполнителем ПСП-1 и несущими слоями из углепластика на основе монослоя КМКУ. Концентратором напряжений являлось ударное повреждение в растянутой зоне обшивки фрагмента руля (рисунок 4.5, *а*). Конструкция нагружалась ступенчато через интервал  $\Delta P = 2,5$  кН до полного разрушения.



*а)*



*б)*

**Рисунок 4.5 – Расположения тензодатчиков и ПАЭ на верхней (*а*) и нижней (*б*) поверхности руля высоты самолета *SSJ-100***

При этом НДС конструкции определялось с использованием двадцати проволочных тензодатчиков типа ПКС сопротивлением  $R = 120$  Ом, базой  $L = 8$  мм коэффициентом тензочувствительности  $K = 2,12$ , наклеенных на верхнюю и нижнюю поверхности фрагмента руля высоты. Изменение деформации в процессе нагружения регистрировалось многоканальной ми-

кропроцессорной тензометрической системой ММТС-64.01 класса точности 0,2. Для оценки НДС в области ударного повреждения тензодатчики 7 – 10 были наклеены близко к кромке руля высоты (рисунок 4.5, а). Розетки из тензодатчиков 1 – 4 и 13 – 16 были установлены для контроля области наиболее опасного сечения.

На конструкцию были установлены двенадцать ПАЭ типа ПК 01-07, которые образовали три зоны контроля (рисунок 4.5). На верхней стороне фрагмента руля высоты были расположены зона 0, образованная ПАЭ0 – ПАЭ3, и зона 2, состоящая из ПАЭ8 – ПАЭ11. На нижней стороне фрагмента находилась зона 1, организованная из ПАЭ4 – ПАЭ7. Регистрация и обработка АЭ-информации выполнялась АЭ-системой СЦАД-16.10 с «плавающим» порогом селекции.

При обработке зарегистрированной АЭ-информации выполнялся анализ методов локации (порогового, двухинтервального и метода скользящего «окна») и сравнения их точности [23]. В качестве параметра структуры сигнала для метода скользящего «окна» было выбрано СКО  $\sigma_j$ , характеризующее уровень энергии [4, 89]:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=T_1}^{i=T_2} (x_i - x_{cp})^2}{(T_2 - T_1 - 1)}},$$

где  $T_1, T_2$  – номера отсчета АЦП, соответствующие моменту начала и окончания временного «окна»;

$x_{cp}$  – среднее значение реализации сигнала АЭ в «окне»;

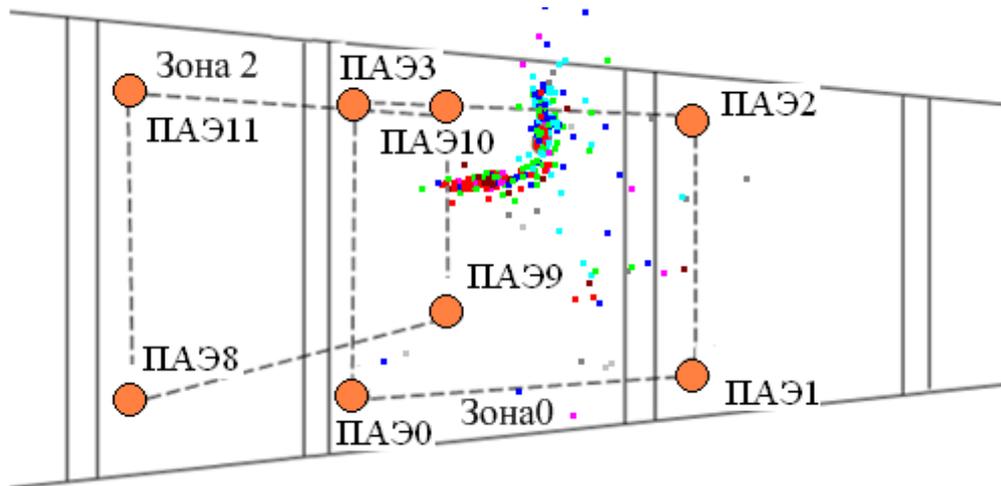
$j$  – номер точки в массиве СКО.

Количественная оценка выбранных методик локации сигналов АЭ осуществлялась при сравнении СКО координат и количества локализованных сигналов (таблица 4.2). Расчет СКО выполнялся для сигналов АЭ, относящихся к одному источнику. Для этого была выполнена кластеризация сигналов АЭ по оцифрованной форме [3] с пороговым значением коэффициента корреляции  $R_{i,k} = 0,6$ .

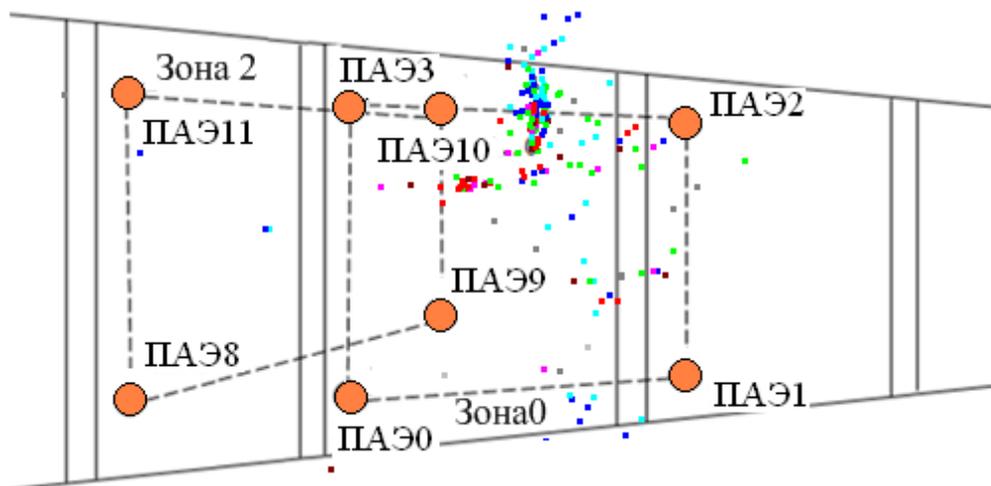
**Таблица 4.2 – Сравнительная характеристика методов локации сигналов АЭ, использованных при прочностных испытаниях руля высоты самолета SSJ-100**

Метод	Число локализованных сигналов		СКО сигналов по осям, мм	
	Из всех 8438 зарегистрированных	Из 676 зарегистрированных в области разрушения	$x$	$y$
Двухинтервальный	1680 (19,9%)	608 (89,9%)	139	27
Модифицированный пороговый	1496 (17,7%)	534 (79%)	104	49
Скользящего «окна»	767 (9,1%)	311 (46%)	158	56

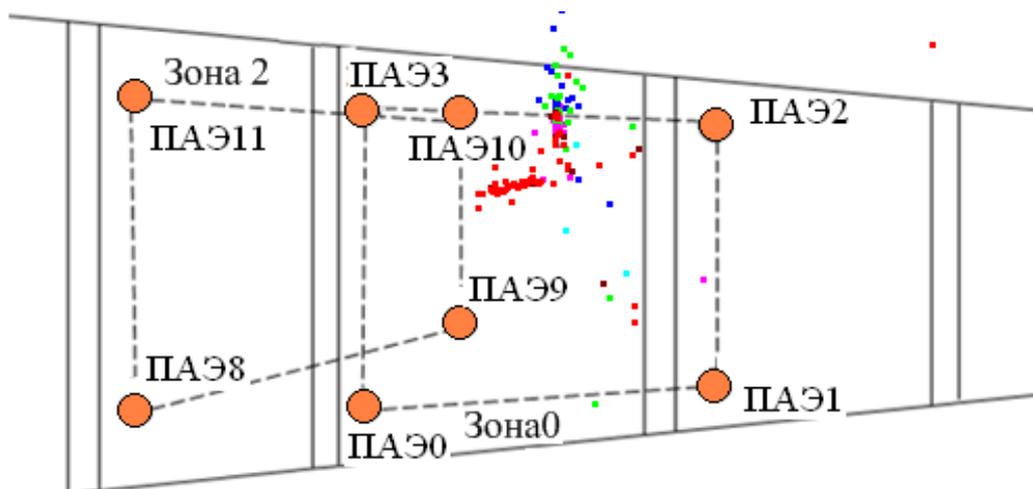
Двухинтервальный метод позволял локализовать наибольшее число сигналов АЭ и отслеживать развитие трещины в углепластике в реальном масштабе времени (рисунок 4.6, *а*).



а)



б)



в)

Рисунок 4.6 – Локация сигналов АЭ в области разрушения фрагмента руля высоты двухинтервальным (*а*), модифицированным пороговым (*б*) и методом СКО в «окне» (*в*)

Анализ результатов локации (рисунок 4.6, *a*) показал, что первые сигналы АЭ поступили из области ударного воздействия и были зарегистрированы при увеличении нагрузки от 22,5 до 25 кН (рисунок 4.7). От начала нагружения до нагрузки  $P = 27,5$  кН локация сигналов АЭ от трещины наблюдалась только во время роста нагрузки. При выдержке в интервале времени 600–950 с от начала нагружения (рисунок 4.7) увеличение числа сигналов прекратилось, т.е. фаза активного разрушения не наступила.

Потеря несущей способности произошла при нагрузке 31 кН, при которой АЭ-системой регистрировались и локализовались сигналы АЭ. Последующий осмотр зоны разрушения показал, что разрушена только часть верхней панели, нижняя панель осталась целой. Локация сигналов АЭ после макроразрушения при выдержке под нагрузкой  $P = 8,6$  кН (рисунок 4.7, отрезок *CD*) свидетельствует о том, что трещина в несущих слоях обшивки продолжала развиваться. В результате было зарегистрировано более 5000 сигналов АЭ (рисунок 4.7, отрезок *AB*), локализованных в области разрушения.

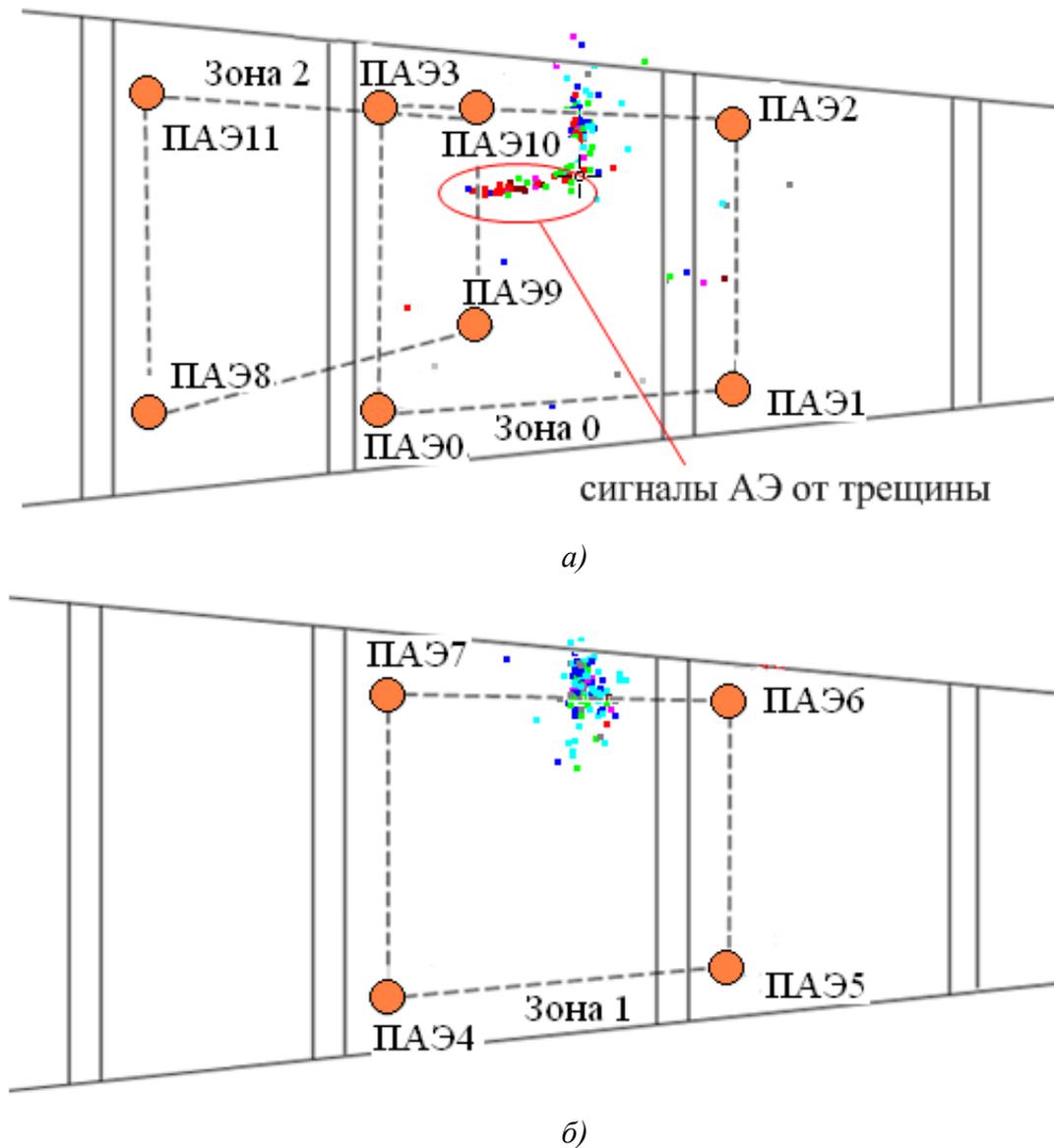
Амплитуда значительного числа сигналов АЭ из области разрушения, составила (1 – 2) В. Однако при увеличении нагрузки до  $P = 25$  кН были зарегистрированы первые сигналы с амплитудой 3 В. В процессе дальнейшего нагружения и в момент разрушения фрагмента руля высоты амплитуда сигналов АЭ превышала 2,5 В. Таким образом, о начале разрушения конструкции свидетельствовали характерный треск и наличие сигналов АЭ с высокими значениями амплитуды.



● - сигналы АЭ, локализованные в области разрушения

Рисунок 4.7– Зависимость суммарного счета сигналов АЭ и нагрузки от времени при испытании фрагмента руля высоты

На рисунок 4.8 показана локация сигналов АЭ из области разрушения. Сигналы зарегистрированы после уменьшения нагрузки и ее выдержке (отрезок  $AB$  на рисунке 4.7). На данном этапе нагружения наблюдался прирост числа сигналов АЭ от трещины (рисунок 4.8, *a*), а также в зоне 1 нижней панели конструкции (рисунок 4.8, *б*). Разрушение при нагрузке  $P = 31$  кН произошло в зоне конструкции между ПАЭ10 и ПАЭ2 (рисунок 4.8, *a*). При этом получена устойчивая локация в зонах 0 (рисунок 4.8, *a*) и 1 (рисунок 4.8, *б*), что позволило определить направление распространения трещины в процессе нагружения объекта до разрушения.



**Рисунок 4.8 – Локация сигналов АЭ из области разрушения верхней (*a*) и нижней (*б*) поверхности фрагмента руля высоты после потери несущей способности**

В процессе нагружения и при выдержке фрагмента руля высоты под нагрузкой  $P=25$  кН в течение 330 с наблюдалось уменьшение деформации на всех тензодатчиках, что соответствовало началу процесса разрушения (рисунок 4.10). Выдержка под нагрузкой  $P = 30$  кН выполня-

лась в течение 50 с. При этом уменьшение деформации было значительным, что подтвердило последующее разрушение конструкции.

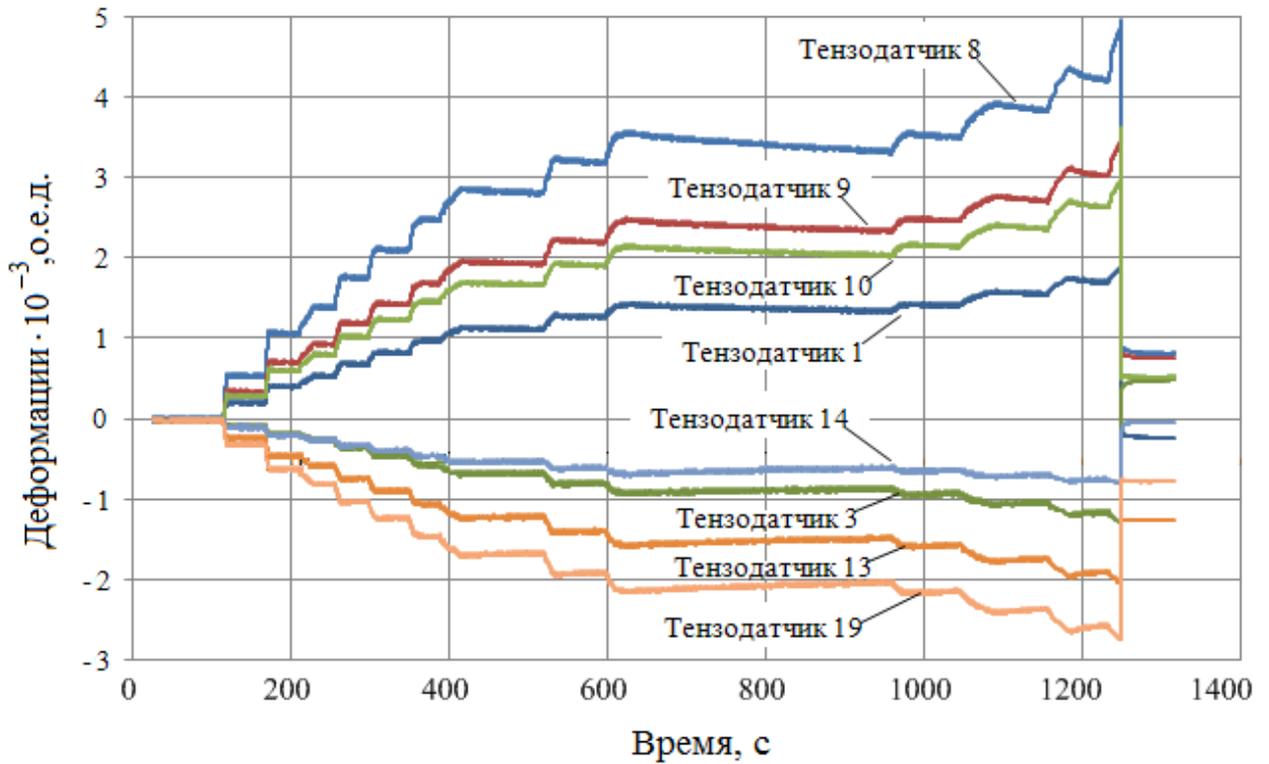


Рисунок 4.9 – Зависимость деформации фрагмента руля высоты от времени

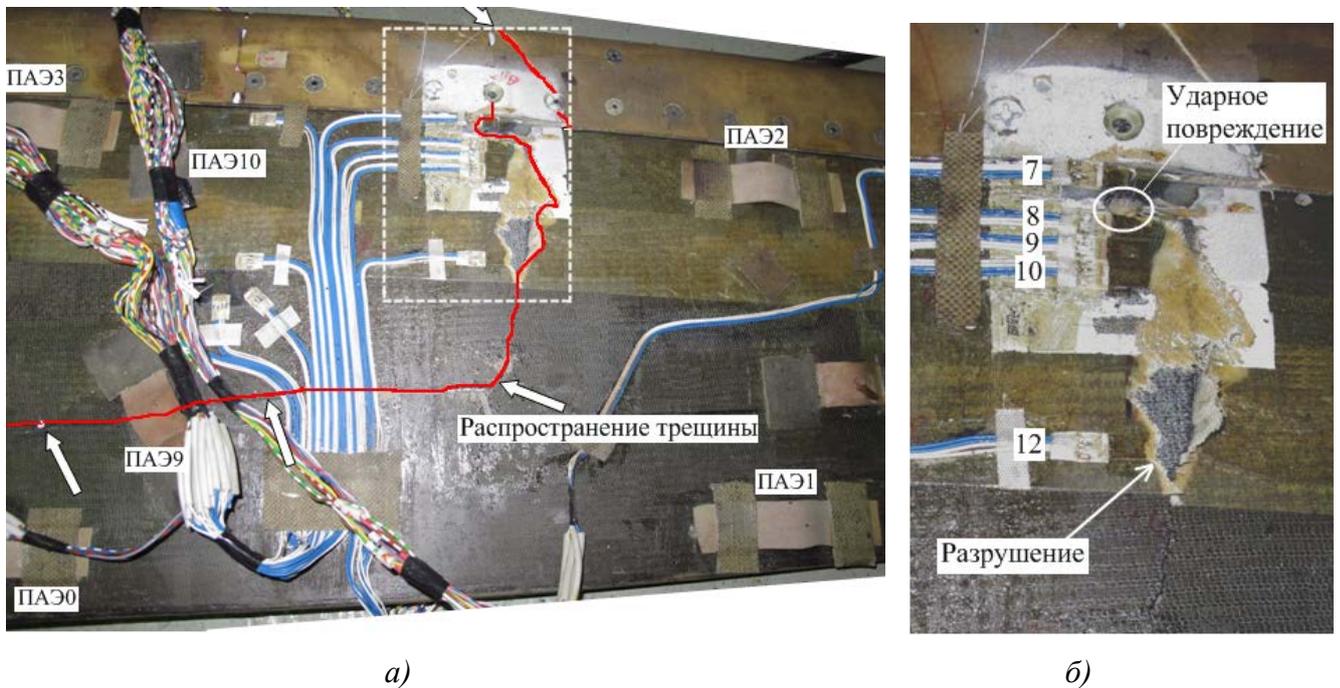


Рисунок 4.10 – Вид разрушенного фрагмента руля высоты (а) и области его ударного повреждения (б)

По результатам тензометрирования установлено, что максимальные деформации растяжения были зарегистрированы тензодатчиком 8 (рисунок 4.9), так как он был расположен бли-

же всего к концентратору напряжений. Анализ разрушенного фрагмента руля высоты показал, что трещина распространялась от ударного повреждения вдоль участка конструкции, на котором были наклеены тензодатчики 8–10, 12 (рисунок 4.10,а, б).

### 4.3 Прочностные испытания лонжеронов из углепластика

Лонжероны совместно со стрингерами образуют продольный набор крыла, фюзеляжа, оперения, рулей и элеронов. Совместно с обшивкой они воспринимают нормальные усилия при изгибе фюзеляжа. Один из поясов лонжерона при этом работает на растяжение, второй – на сжатие. Стенки лонжеронов воспринимают поперечную силу и часть крутящего момента крыла, работая при этом на сдвиг. Соединяя верхнюю и нижнюю обшивку крыла, лонжероны и стенки совместно с обшивкой образуют в поперечном сечении крыла замкнутые контуры, воспринимающие кручение [98].

Прочностные испытания трех авиационных лонжеронов, выполненных из углепластика на основе волокна *Toray*, проводились с учетом условий их эксплуатации. Для мониторинга лонжеронов на исследуемые конструкции устанавливались пьезоантенны. Число зон контроля и количество ПАЭ выбиралось в зависимости от особенностей исследуемой области конструкции. Регистрация и обработка информации осуществлялась АЭ-системой СЦАД-16.10 с «плавающими» порогами селекции. Время прихода сигналов АЭ на ПАЭ определялось двухинтервальным методом [2]. Результаты прочностных испытаний лонжеронов приведены в таблице 4.3.

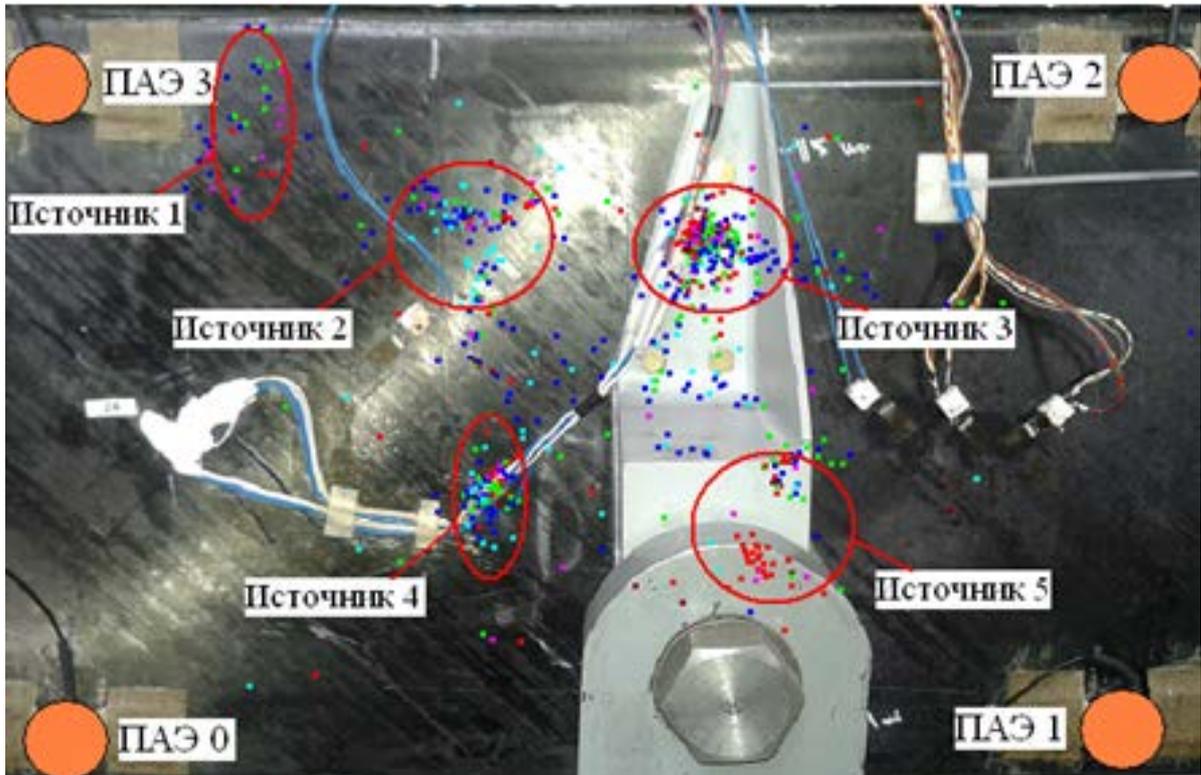
**Таблица 4.3 – Результаты прочностных испытаний лонжеронов**

№ лонжерона	Область контроля	Разрушающая нагрузка, кН	Нагрузка, при которой началась активная локация сигналов АЭ, кН
1	Зона навески крыла на фюзеляж	Правый фрагмент: 90	80
		Левый фрагмент: 80	30
2	Зона стыка секций	15	5
3	Зона крепления подкоса	19	15

При испытании лонжерона 1 были испытаны на изгиб его правый и левый фрагменты. Контроль выполнялся в зоне навески крыла на фюзеляж. На конструкцию была установлена пьезоантенна, состоящая из четырех ПАЭ. Особенность каждого фрагмента состояла в наличии металлического крепления, расположенного в центре пьезоантенны. При подготовке к испытаниям выполнялась настройка зоны контроля с последующей автокалибровкой, что поз-

воляло учитывать влияние данного конструктивного элемента на точность локации сигналов АЭ.

При испытании правого фрагмента лонжерона 1 была получена устойчивая локация сигналов АЭ (рисунок 4.11), которые условно были разделены на 5 источников. Некоторые из них были активны в течение определенного интервала времени, а другие – на протяжении всего испытания.

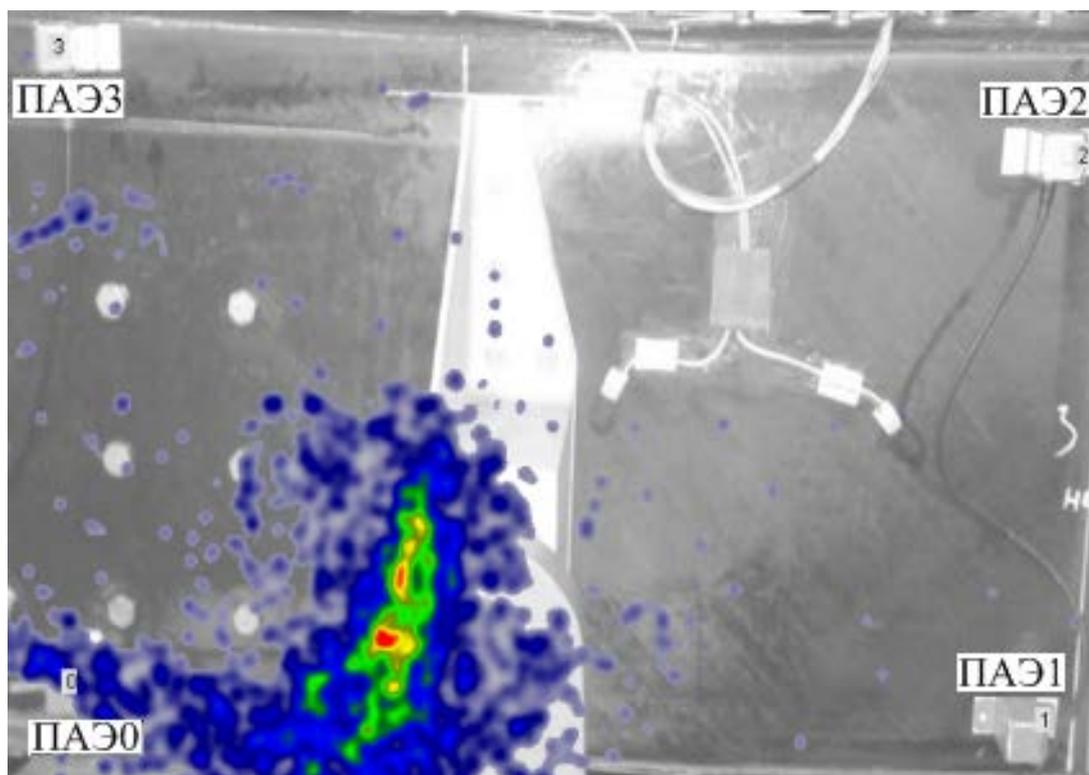


**Рисунок 4.11 – Локация сигналов АЭ, зарегистрированных при испытании правого фрагмента лонжерона 1**

Сигналы АЭ от источника 1 были зарегистрированы при нагрузке (60 – 80) кН, а на заключительном этапе испытаний сигналы от этого источника отсутствовали. Однако от источника 2 они регистрировались практически в период всего нагружения лонжерона 1. При этом их активность в начале нагружения была больше, чем в конце. Таким образом, в области локации сигналов источников 1 и 2 при низких значениях нагрузки происходила приработка материала. Наиболее активным был источник 3 (рисунок 4.11), сигналы которого были локализованы в области крепления лонжерона к испытательному стенду. Первые сигналы АЭ в данной области были локализованы при нагрузке  $P = (40...50)$  кН, после чего их активность увеличивалась, что характеризовало разрушение конструкции. Установлено, что сигналы АЭ от источника 3 обладали затянутым передним фронтом. Активность источников 4 и 5 была невысокой, а сигналы регистрировались только в момент увеличения нагрузки.

При испытании левого фрагмента лонжерона 1 также выполнялся контроль зоны навески крыла на фюзеляж. Локализованные сигналы АЭ были сконцентрированы в нижней части

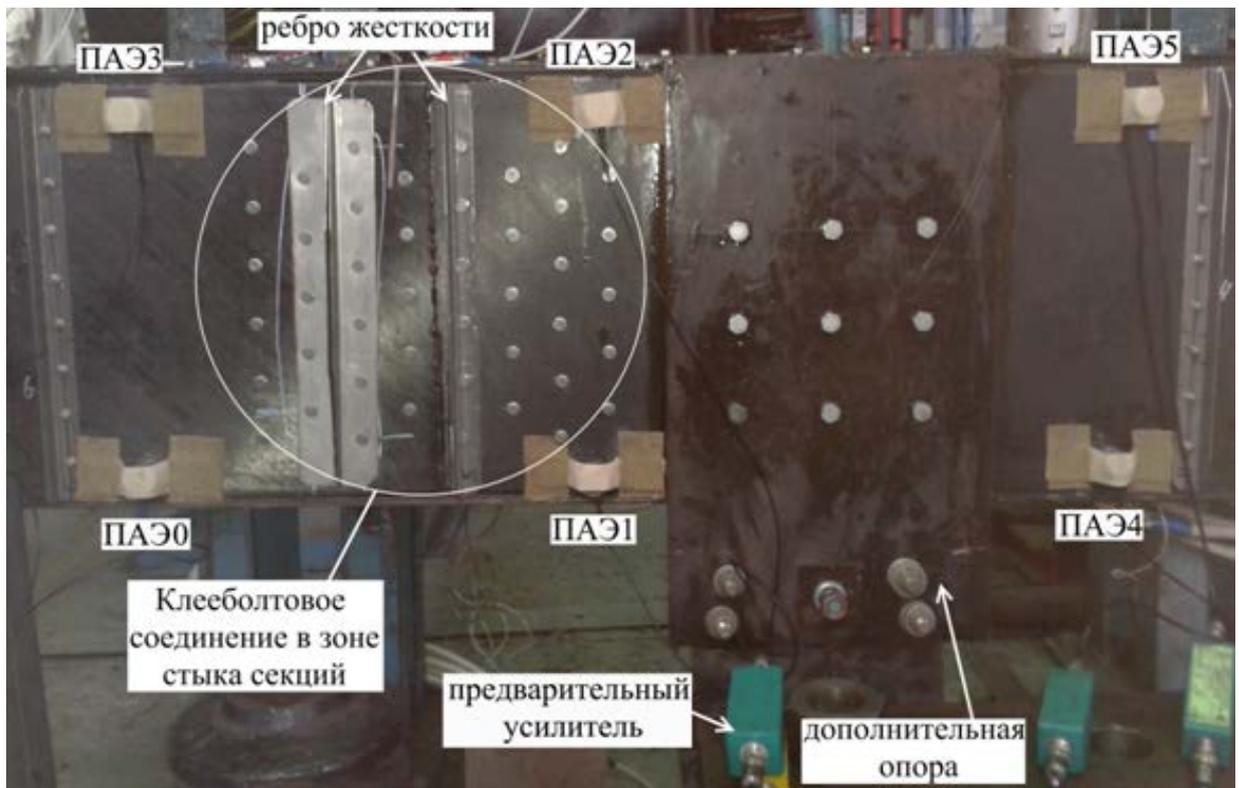
ОК в области крепления к испытательному стенду (рисунок 4.12). В процессе всего нагружения в зоне крепления локализовались сигналы АЭ с максимальной суммарной амплитудой.



**Рисунок 4.12 – Локация сигналов АЭ при испытании  
левого фрагмента лонжерона 1**

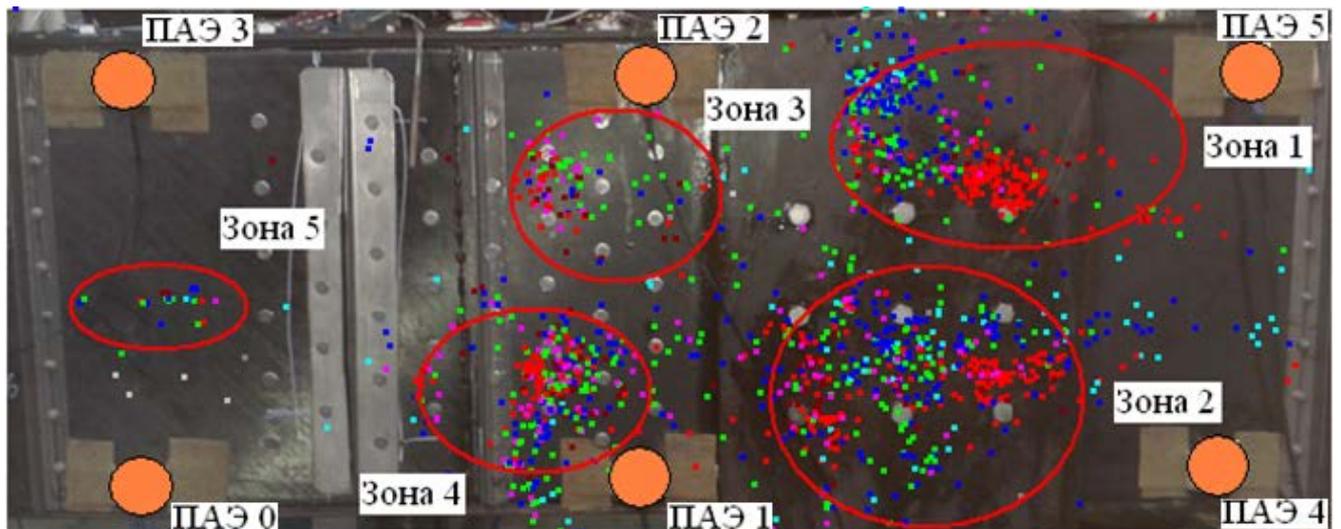
В соответствии с техническим заданием при прочностных испытаниях лонжерона 2 требовалось контролировать зону стыка секций (рисунок 4.13). Из-за наличия ребер жесткости и болтового соединения на конструкцию устанавливалось две зоны контроля, образованные шестью ПАЭ. Зона 0 состояла из ПАЭ 0, ПАЭ 3; зона 1 – из ПАЭ 1, ПАЭ 2, ПАЭ 4, ПАЭ 5. Расположение преобразователей было выбрано таким, чтобы регистрировались сигналы АЭ из области предполагаемого разрушения, которым являлось клееболтовое соединение в зоне стыка секций (рисунок 4.13).

Локализованные сигналы АЭ были разделены на 5 зон (рисунок 4.14). Зоны 1 и 2 были образованы в месте установки дополнительной опоры и ее крепления к лонжерону 2. Сигналы из зон 3 и 4 были локализованы в области клееболтового соединения в зоне стыка. Сигналы из зон (1 – 4) регистрировались только датчиками из ближайшей пьезоантенны. Соответственно два оставшихся ПАЭ такие сигналы практически не регистрировали.



**Рисунок 4.13 – Внешний вид испытанного фрагмента лонжерона 2 с установленными ПАЭ**

Локация сигналов АЭ наблюдалась в области дополнительной опоры и клеболтового соединения (рисунок 4.14). При анализе сигналов из зоны 5 было определено, что их источник излучения располагался за границами установленных пьезоантенн, в месте разрушения исследуемого лонжерона. Эти сигналы устойчиво регистрировались всеми ПАЭ независимо от пьезоантенны.

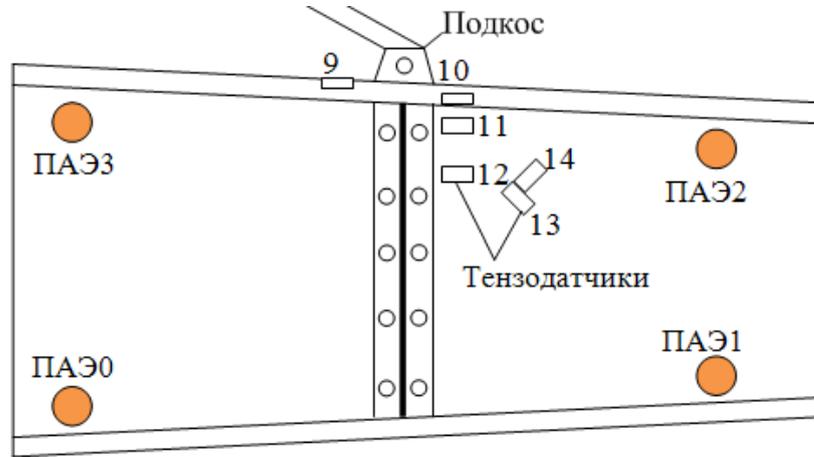


**Рисунок 4.14 – Локация сигналов АЭ при испытании лонжерона 2**

При нагрузке  $P = 10$  кН был слышен треск и началась непрерывная регистрация сигналов АЭ, соответствующая разрушению материала конструкции лонжерона 2. При увеличении

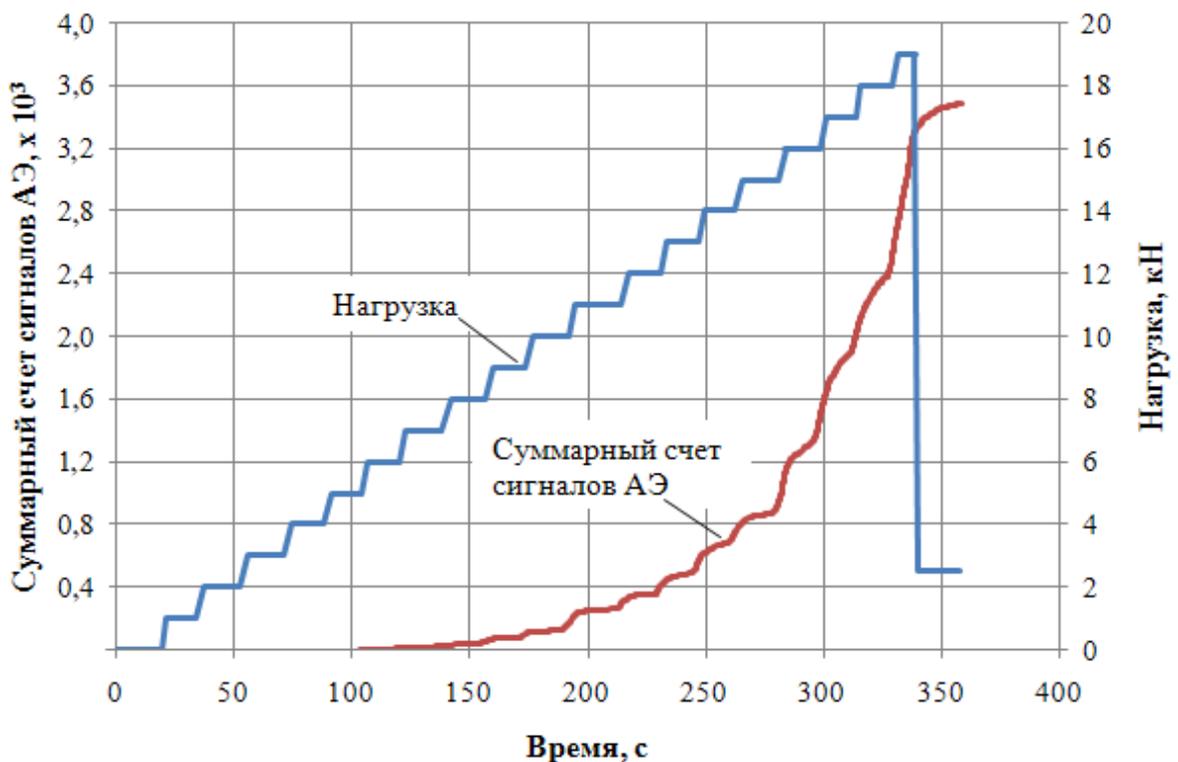
нагрузки от  $P = 14$  кН до  $P = 15$  кН произошло его разрушение, которое сопровождалось регистрацией и локацией сигналов АЭ от источника 5 (рисунок 4.14).

При испытаниях лонжерона 3 была поставлена задача мониторинга области крепления подкоса, где устанавливалась пьезоантенна, состоящая из четырех ПАЭ (рисунок 4.15).



**Рисунок 4.15 – Схема установки ПАЭ и тензодатчиков на лонжерон 3**

При подготовке к испытаниям предварительно проводилось несколько нагружений исследуемого лонжерона 3, в процессе которых выявлялись недостатки конструкции и выполнялась ее доработка. Максимальная нагрузка составляла  $P = 6$  кН. Поэтому на заключительном этапе нагружения регистрация сигналов АЭ началась только при нагрузке  $P = 5$  кН (рисунок 4.16). При этом они локализовались в области крепления подкоса к лонжерону.



**Рисунок 4.16 – Зависимость суммарного счета сигналов АЭ и нагрузки от времени при испытании лонжерона 3**

В процессе нагружения ОК наблюдалось увеличение активности сигналов АЭ. Было отмечено, что при каждом изменении нагрузки на  $\Delta P = 1$  кН активность сигналов АЭ выросла в 1,8 раза. Однако при увеличении нагрузки от  $P = 15$  кН до  $P = 16$  кН их активность увеличилась в 3 раза (от 12 сигн/с до 36 сигн/с), что сопровождалось треском лонжерона 3 и свидетельствовало об его активном разрушении.

При обработке АЭ-информации, полученной в процессе нагружения лонжерона 3, использовался табличный метод расчета координат. При этом он разбивался на  $N$  зон, после чего устанавливалась пьезоантенна и выполнялась калибровка [2, 23]. Связь между комбинацией РВП и точкой на ОК в программе задавалась в табличном виде и их значения учитывались одновременно. Для табличного метода характерна повышенная устойчивость 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 (рисунок 4.17):

$$T = \begin{vmatrix} \bar{t}_{x_1, y_1} & \bar{t}_{x_1, y_2} & \cdots & \bar{t}_{x_1, y_n} \\ \bar{t}_{x_2, y_1} & \bar{t}_{x_2, y_2} & \cdots & \bar{t}_{x_2, y_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots \\ \bar{t}_{x_m, y_1} & \bar{t}_{x_m, y_2} & \cdots & \bar{t}_{x_m, y_n} \end{vmatrix}, \quad (4.1)$$

где  $n$  – количество столбцов в таблице;

$m$  – количество 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.

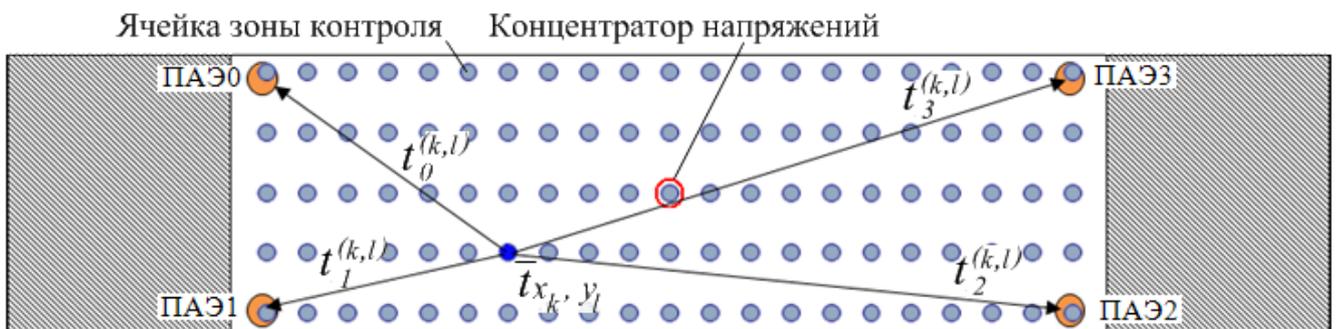


Рисунок 4.17 – Схема локации сигналов АЭ табличным методом

Элемент  $\bar{t}_{x_k, y_l}$  таблицы из формулы (4.1) представлял собой набор РВП  $(t_0^{(k,l)}, t_1^{(k,l)}, t_2^{(k,l)}, t_3^{(k,l)})$  для четырех ПАЭ (0...3) пьезоантенны (рисунок 4.17). Количество строк  $m$  и столбцов  $n$  таблицы выбиралось из соотношений:

$$n < \frac{y_n}{v_y \Delta_t}; \quad m < \frac{x_m}{v_x \Delta_t},$$

где  $v_x, v_y$  – скорости распространения звука в направлении координатных осей  $X, Y$  для зоны контроля;

$\Delta_t$  – интервал дискретизации при измерении времени прихода сигнала АЭ на датчик пьезоантенны.

Для каждой ячейки зоны контроля выполнялся поиск минимального значения функционала невязки, определяемого по формуле:

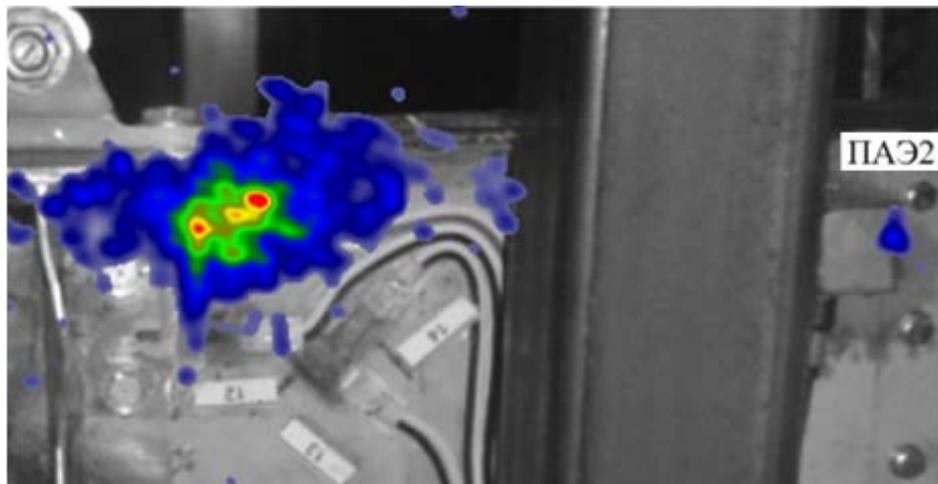
$$\Phi_{k,l} = \sum_{i=0}^3 \frac{|T_i - t_i^{(k,l)}|}{T_i}, \quad (4.2)$$

где  $T_i$  – РВП сигнала АЭ на ПАЭ с номером  $i$  и ПАЭ, принявший сигнал АЭ первым;

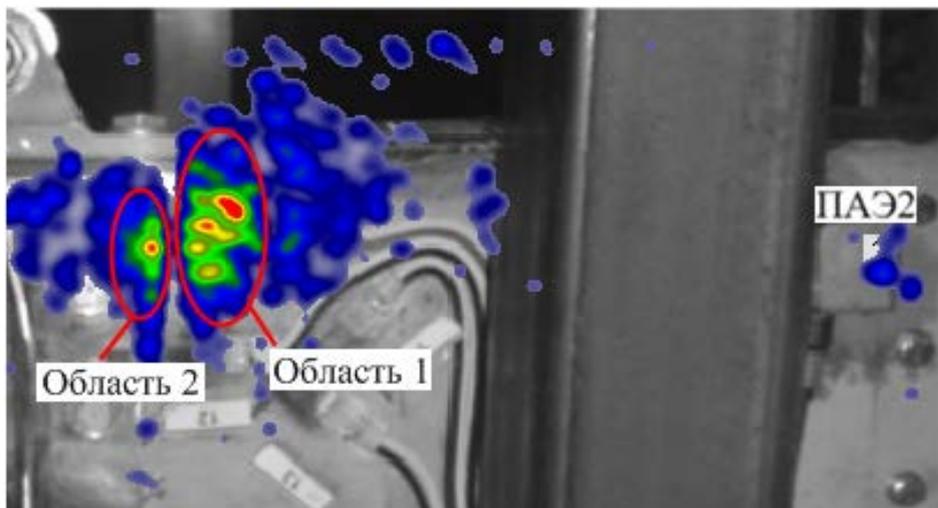
$t_i^{(k,l)}$  – значение РВП для ПАЭ с номером  $i$ , взятое из формулы (4.1).

При правильном подборе значений РВП это позволило повысить точность определения координат источников сигналов АЭ [80]. При анализе суммарной амплитуды сигналов АЭ наблюдалось разделение области, полученной аналитическим методом (рисунок 4.18,а), на две (рисунок 4.18,б). Область 1 соответствовала разрушению верхней полки лонжерона 3 в зоне крепления кронштейна, а область 2 – разрушению материала вдоль фитинга. При осмотре конструкции после испытаний было выявлено разрушение на верхней полке лонжерона в области крепления подкоса (рисунок 4.18, в), что соответствовало локации, показанной на рисунке 4.18,б.

Для анализа деформации материала в области разрушения были рассмотрены показания тензодатчиков 9–14. Тензодатчики 9 и 10 были наклеены на верхнюю полку лонжерона с внешней и внутренней стороны, которая разрушилась при испытаниях. Тензодатчики 11 и 12 располагались перпендикулярно, а тензодатчики 13 и 14 – под углами к прикладываемой нагрузке (рисунок 4.15).



а)



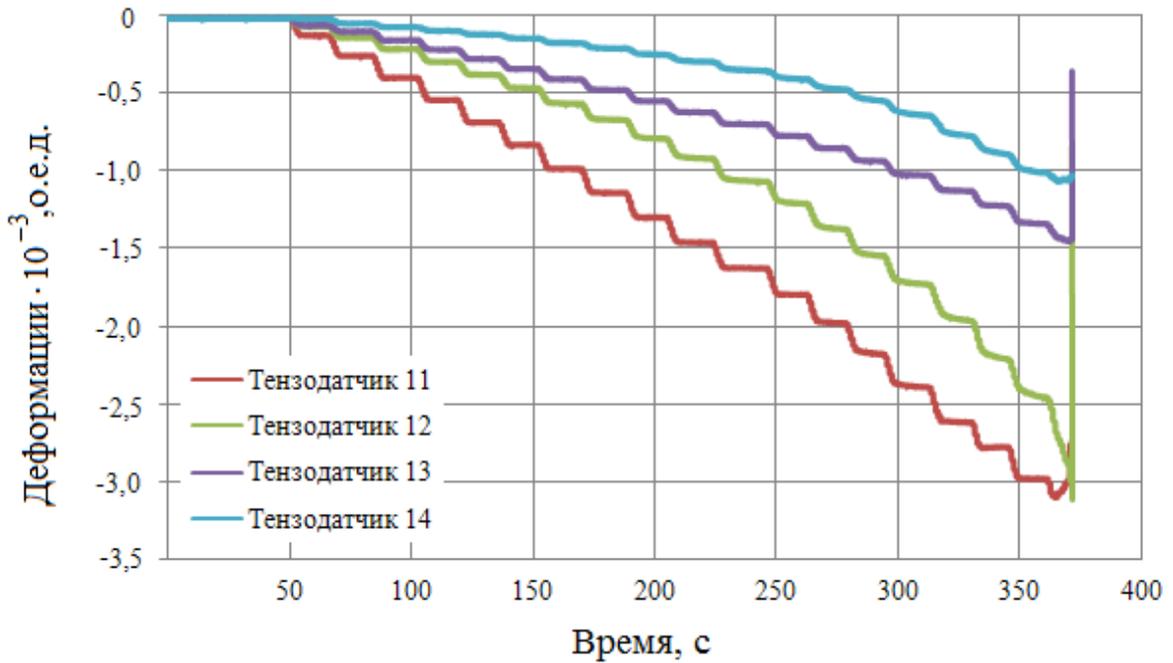
б)



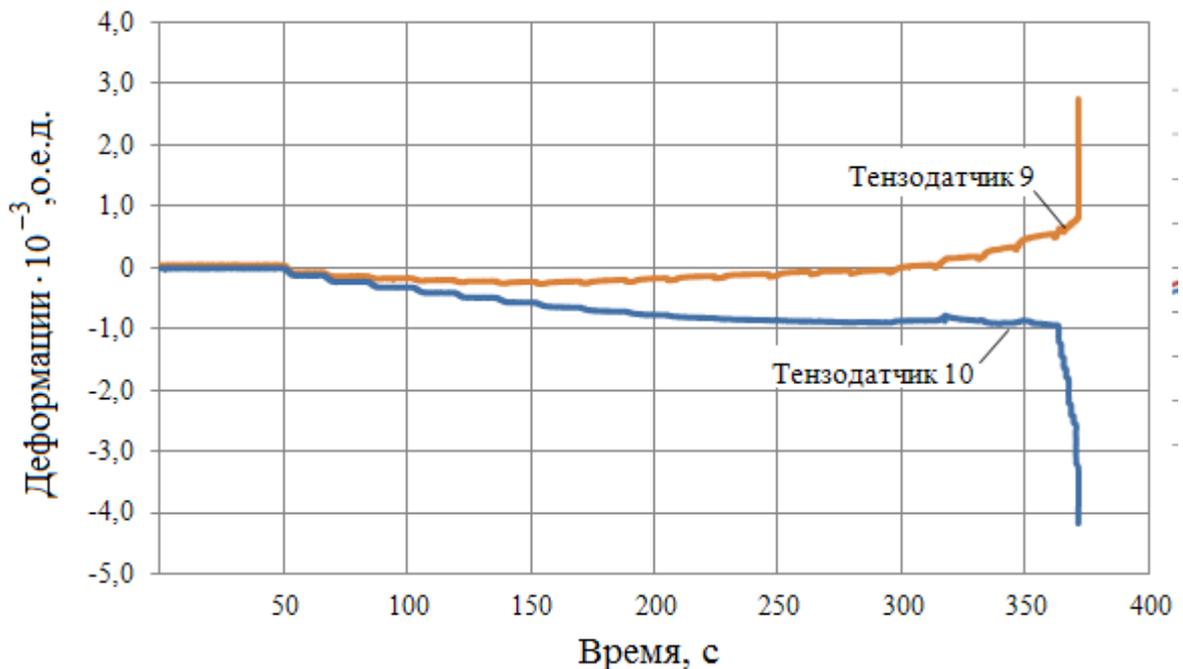
в)

Рисунок 4.18 – Локация сигналов АЭ при статическом испытании лонжерона 3 аналитическим (а) и табличным (б) методами; вид разрушения (в)

В процессе нагружения конструкции лонжерона 3 тензодатчики 10 – 14 испытывали деформацию сжатия. При этом деформация материала в области расположения тензодатчиков 11 – 14 изменялась пропорционально до полного разрушения конструкции (рисунок 4.19, *a*).



*a)*



*б)*

**Рисунок 4.19 – Показания тензодатчиков, расположенных в области разрушения лонжерона 3: *a* – тензодатчики 11 – 14; *б* – тензодатчики 9 и 10**

Деформация тензодатчика 10 изменялась пропорционально изменению нагрузки до  $P = 7$  кН ( $t = 150$  с), после чего наблюдалось сглаживание зависимости деформации от времени. Показания тензодатчика 9 до нагрузки  $P = 15$  кН ( $t = 290$  с) практически не изменялись (рисунок

4.19,а), а при превышении нагрузки данного значения материал в области наклейки тензодатчика 9 испытывал деформации растяжения (рисунок 4.19, а). В области крепления подкоса при изменении нагрузки от  $P = 7$  кН до  $P = 15$  кН происходили процессы, которым соответствовала непропорциональная изменению нагрузки деформация материала, а также локация сигналов АЭ с активностью 1 сигн/с. При нагрузке  $P = 15$  кН в исследуемой области наблюдалась деформация растяжения в зоне наклейки тензодатчика 9 и рост активности сигналов АЭ до 36 сигн/с. Таким образом, в режиме реального времени было обнаружено разрушение лонжерона 3 по увеличению активности сигналов АЭ и по изменению показаний тензодатчиков, непропорциональному изменению нагрузки. Локация сигналов АЭ с использованием двухинтервального метода позволила установить на раннем этапе, что началось разрушение верхней полки в области крепления подкоса. При использовании табличного метода было получено более точное разделение сигналов АЭ на источники.

Выполненный контроль состояния лонжеронов показал, что применение метода АЭ позволяет отслеживать момент появления разрушений конструкции. Непрерывная регистрация сигналов АЭ характеризовала начало активного разрушения, что подтверждалось данными тензометрии и результатами визуального осмотра. Выполняемая локация источников сигналов АЭ позволила определить области разрушения.

#### Выводы к главе 4

1. Проведен мониторинг состояния различных элементов авиационных конструкций в режиме реального времени в процессе прочностных испытаний с использованием метода АЭ и тензометрии. Это позволило выполнить локацию источников сигналов АЭ и определить нагрузку, при которой начиналась их активная регистрация. Анализ результатов АЭ-контроля и визуальный осмотр конструкций во время и после испытаний установил, что в области, соответствующей активной локации сигналов АЭ, происходило разрушение композита или крепежных элементов. Это подтверждалось изменением показаний тензодатчиков, расположенных в данных областях.

2. По результатам прочностных испытаний элементов конструкций из углепластика была обоснована эффективность применения метода АЭ при решении задач локации дефектов на ранней стадии. При АЭ-контроле композиционных конструкций необходимо для каждого исследуемого элемента выполнять калибровку пьезоантенны. Это позволяет учитывать влияние анизотропных свойств углепластика, болтовых соединений, стрингеров и т.д. на скорость распространения сигналов АЭ в ОК.

3. При нагружении элементов авиационных конструкций болтовые, заклепочные, клеевые соединения являлись источниками сигналов АЭ. При этом разрушение ОК не всегда происходило в области креплений. Поэтому для анализа и оценки активности источников сигналов применялось распределение суммарной амплитуды локализованных сигналов АЭ. По результатам испытаний всех представленных конструкций было получено, что при нагружении источники с максимальной суммарной амплитудой соответствовали зонам разрушения.

4. Предложена методика локализации дефектов сигналов АЭ с использованием табличного метода. По результатам локализации сигналов, зарегистрированных при прочностных испытаниях лонжерона горизонтального оперения, был уменьшен разброс сигналов АЭ и получено более четкое разделение области разрушения на источники.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В процессе экспериментальных исследований образцов из углепластиков КМКУ , *T700* и стеклопластика СППС при статическом, циклическом и ударном нагружении получена устойчивая локация сигналов АЭ. Применение двухинтервального метода позволило разработать методику, более точно определяющую координаты источников сигналов АЭ, соответствующие появлению и распространению дефектов. При этом были выделены кластеры, сигналы которых локализованы либо в области развития усталостной трещины, либо в области ударного воздействия образца из углепластика. Экспериментально подтверждено, что разработанная методика может использоваться как при мониторинге, так и при прочностных испытаниях композиционных материалов и конструкций.

2. Для анализа источников сигналов АЭ, зарегистрированных при циклическом нагружении, применена методика двухэтапной кластеризации. Важным преимуществом данного алгоритма кластеризации является сокращение времени выполнения анализа более, чем в 100 раз при уменьшении точности локации не более 3 % по сравнению с кластерным анализом, выполняемым по оцифрованной форме сигналов.

3. Разработан алгоритм расчета структурного коэффициента  $P_D$  с применением вейвлет-преобразования для анализа изменения частотно-временной структуры сигналов АЭ. Установлено, что сигналы от источников различных типов характеризовались наличием максимумов амплитуды вейвлет-преобразования и временем их появления в смежных диапазонах частот. По изменению статистического распределения структурного коэффициента  $P_{D32}$  выполнена локация и определен момент начала разрушения образца из углепластика.

4. Показана зависимость изменения структурных коэффициентов  $P_{D32}$  сигналов АЭ, локализованных в области отверстия образца из углепластика *T700*, от нагрузки. Уменьшение структурного коэффициента  $P_{D32}$  наблюдалось при увеличении нагрузки от 15 до 40 кН и соответствовало разрушению волокон и матрицы, выявленному при фрактографическом анализе с использованием микроскопа *CarlZeissEVO 50 XVP*. При дальнейшем увеличении нагрузки до 65 кН происходило увеличение структурного коэффициента  $P_{D32}$ , что равносильно смещению энергии сигналов АЭ в область низких частот. При этом фрактография выявила наличие крупных расслоений в материале образца в результате действия касательных напряжений.

5. Предложен алгоритм определения момента появления неупругих пластических деформаций по изменению энергетического параметра *MARSE* и структурного коэффициента  $P_{D32}$ . Для их одновременного учета предложено определять функционал  $F$ . Автоматизация измерений, выполняемых по данной методике, осуществляет оценку состояния углепластиков в процессе испытаний без прерывания процесса нагружения.

6. Мониторинг состояния различных элементов авиационных конструкций в процессе прочностных испытаний с использованием метода АЭ и тензометрии позволил выполнить локацию источников сигналов АЭ в режиме реального времени. Установлено, что область активной локации сигналов АЭ соответствовала разрушению композита или крепежных элементов. Предложена методика локации дефектов с использованием табличного метода. По результатам локации сигналов АЭ, зарегистрированных при прочностных испытаниях лонжерона горизонтального оперения, было получено уменьшение разброса координат сигналов АЭ и более четкое разделение на источники.

**ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ**

- АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
- АЭ – акустическая эмиссия;
- ВП – вейвлет-преобразование;
- ИК – инфракрасный;
- КМ – композиционный материал;
- КМКУ – композиционный материал клеевой на основе углепластика;
- НДС – напряженно-деформированное состояние;
- НК – неразрушающий контроль;
- о.е.д. – относительные единицы деформации;
- ОК – объект контроля;
- ПАЭ – преобразователь акустической эмиссии;
- ПКМ – полимерный композиционный материал;
- ПСП – полимерсотопласт;
- Р – радиационный;
- РВП – разность времен прихода;
- СВЧ – сверхвысокочастотный;
- СКО – среднеквадратическое отклонение;
- УЗ – ультразвук;
- Э – электрический.

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА

## 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, используемых 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 локации 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. Положительное решение о выдаче патента. 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. / Дата подачи заявки 09.06.2015. Дата получения положительного решения - 19.07.2016.
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 использованием 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». – 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.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Адамов, А.А. Анализ отечественной и зарубежной нормативной базы по механическим испытаниям полимерных композиционных материалов / А.А. Адамов, М.Ю. Лаптев, Е.Г. Горшкова // Конструкции из композиционных материалов. – 2012. – № 3. – С. 72 – 77.
2. Акустико-эмиссионная диагностика конструкций / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Муравьев и др.; Под ред. Л.Н. Степановой. – М.: Радио и связь. – 2000. – 280 с.
3. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов и др.; Под ред. Л.Н. Степановой, А.Н. Серьезнова. – М.: Машиностроение / Машиностроение – Полет. – 2008 – 440 с.
4. Акустико-эмиссионный контроль дефектов в процессе многопроходной сварки образцов из судостроительной стали / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, Е.Ю. Лебедев и др. // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 12. – С. 74–81.
5. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Ивлиев и др. – Новосибирск: Наука. – 2011. – 272 с.
6. Армированные пластики – современные конструкционные материалы / Э.С. Зеленский, А.М. Куперман, Ю.А. Горбаткина и др. // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). – 2001. – т. XLV. – № 2. – С.56 – 74.
7. Барат, В.А. Статистические методы обработки сигналов акустической эмиссии и их параметров для повышения достоверности результатов контроля / В.А. Барат, А.Л. Алякритский // Неразрушающий контроль и диагностика: сборник трудов 17-й Российской научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2005.
8. Батаев, А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: Учебник / А.А. Батаев, В.А. Батаев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2002. – 384 с.
9. Бигус, Г.А. Вейвлет-анализ сигналов акустической эмиссии при диагностике конструкций / Г.А. Бигус, А.А. Травкин, Ю.Ф. Даниев // Сварка и диагностика. – 2012. – № 4. – С.34 – 38.
10. Быков, С.П. Вейвлет-анализ акустико-эмиссионных сигналов / С.П. Быков, А.В. Юшин, И.Н. Скрябиков // Неразрушающий контроль и диагностика: сборник трудов 17-й Российской научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2005.
11. Быков, С.П. О достоверности акустико-эмиссионного контроля / С.П. Быков, Б.Ф. Юрайдо, В.И. Иванов // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 12. – С. 53 – 60.
12. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В.П. Вавилов. – 2-е изд., доп. – М.: Издательский дом «Спектр». – 2013. – 544 с.
13. Вавилов, В.П. Обработка результатов активного теплового контроля методом вейвлет-анализа / В.П. Вавилов, В.В. Ширяев, В.С. Хорев // Дефектоскопия. – 2011. – № 4. – С. 70 – 79.

14. Вавилов, В.П. Ультразвуковой инфракрасный метод выявления ударных повреждений и усталостных трещин в металлах и композитах / В.П. Вавилов, Д.А. Нестерук, В.С. Хорев // В мире неразрушающего контроля. – 2010. – № 1 (47). – С. 56 – 58.
15. Вандельт, М. Активная термография - эффективный метод неразрушающего контроля крупногабаритных изделий из композиционных материалов/ М. Вандельт, Т. Крегер. М. Йоханнес // В мире неразрушающего контроля. – 2016, Т.19. – № 1. – С.8 – 12.
16. Вапиров, Ю.М. Накопление повреждений в ПКМ авиационных конструкций под воздействием климатических факторов [Электронный ресурс] / Ю.М. Вапиров, А.С. Дзюба, В.И. Голован // Научный электронный журнал «Новости материаловедения. Наука и техника». – 2013. – № 3.
17. Власенко, Ф.С. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях [Электронный ресурс] / Ф.С. Власенко, А.Е. Раскутин // Труды ВИАМ. – 2013. – № 8. – С. 3.
18. Возбуждение акустической эмиссии лазерным излучением для исследования структурных изменений в композитах и полимерах / С.И. Буйло, В.В. Белозеров, С.П. Зинченко и др. // Дефектоскопия. – 2008. – №9. – С. 38 – 46.
19. Гайдачук, В.Е. Уровни дефектов структуры в изделиях из полимерных композиционных материалов, возникающих в процессе их производства / В.Е. Гайдачук, В.А. Коваленко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 6 (93). – С. 5 – 12.
20. Головин, С.А. Микропластичность и усталость металлов / С.А. Головин, А. Пушкар. – М.: Металлургия. – 1980. – 240 с.
21. Далин, М.А. Обзор акустических методов неразрушающего контроля полимерных композиционных материалов, применяемых в России и за рубежом при изготовлении и эксплуатации изделий авиационной техники [Электронный ресурс] / М.А. Далин // Научный электронный журнал «Новости материаловедения. Наука и техника». – 2014. – № 1.
22. Дерусова, Д.А. Неразрушающий контроль материалов методом резонансной ультразвуковой инфракрасной термографии / Д.А. Дерусова, В.П. Вавилов // В мире неразрушающего контроля. – 2016. – Т.19. – № 1. – С. 21 – 23.
23. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, В.В. Муравьев и др. – М.: Машиностроение. Машиностроение – Полет. – 2004. – 368 с.
24. Ермолов, И.Н. Ультразвуковой контроль: Неразрушающий контроль: Справочник / Ермолов И.Н., Ланге Ю.В.; Под ред. В.В. Ключева. В 8-ми томах. Т.3. М.: Машиностроение. – 2006. – 864 с.

25. Использование вейвлет-фильтрации при локализации сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, С.И. Кабанов и др. // Контроль. Диагностика. – 2007. – №9. – С. 27 – 31.
26. Использование двухэтапной кластеризации сигналов акустической эмиссии для определения дефектов сварки / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин и др. // Дефектоскопия. – 2011. – №6. – С. 44 – 49.
27. Использование метода акустической эмиссии при циклических испытаниях композиционных элементов авиационных конструкций / Л.Н. Степанова, В.Н. Чаплыгин, Е.Ю. Лебедев и др. // Контроль. Диагностика. – 2004. – №12. – С. 53 – 60.
28. 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 и др. // Контроль. Диагностика. – 2015. – №4. – С. 29 – 36.
29. Использование микропроцессорных акустико-эмиссионных систем при ресурсных испытаниях самолета / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, Е.Ю. Лебедев и др. // Дефектоскопия. – 2013. – № 8. – С. 35 – 42.
30. Исследование деформации и разрушения по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии / С.В. Панин, А.В. Бяков, П.С. Любутин и др. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2011. – № 9. – Т. 77. – С. 50 – 59.
31. Исследование локализованной деформации при нагружении образцов из углерод-углеродного композиционного материала с различными концентраторами напряжений по данным акустической эмиссии, метода корреляции цифровых изображений и тензометрии / С.В. Панин, М.В. Бурков, А.В. Бяков и др. // Перспективные материалы. – 2011. – С. 129 – 138.
32. Исследование механизма разрушения углеродных композиционных материалов на основе механических испытаний с регистрацией сигналов акустической эмиссии / А.И. Шилова, В.Э. Вильдеман, Д.С. Лобанов и др. // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. – №4. – С.169 – 179.
33. Исследование неупругих свойств углепластика при циклических испытаниях образцов с использованием методов акустической эмиссии и тензометрии / Л.Н. Степанова, М.Г. Петров, В.В. Чернова и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 5. – С. 37 – 41.
34. Исследование процесса разрушения композиционных конструктивных элементов с использованием тензометрии и метода акустической эмиссии/ А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, Е.Ю. Лебедев и др. // Дефектоскопия, 2004, № 9, С. 11 – 18.
35. Исследование разрушения образцов из стеклопластика с использованием методов акустической эмиссии и тензометрии / Л.Н. Степанова, Е.Ю. Лебедев, С.И. Кабанов и др. // Дефектоскопия. – 2009. – № 2. – С. 39 – 46.

36. Кавун, Н.С. Влияние прошивки стеклянного и углеродного армирующих волокон на остаточную прочность композиционных материалов после удара / Н.С. Кавун, И.Ф. Давыдова, Т.В. Гребнева // Композиты и наноструктуры. – 2013. – №1. – С. 57 – 63.
37. Кареев, А.Е. Влияние погрешностей координат установки датчиков пьезоантенны на точность локализации источников сигналов акустической эмиссии / А.Е. Кареев, Л.Н. Степанова, Е.С. Тенитилов // Дефектоскопия. – 2010. – № 11. – С. 21 – 28.
38. Кластеризация источников сигналов акустической эмиссии по скорости нарастания переднего фронта / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, С.И. Кабанов и др. // Дефектоскопия. – 2009. – № 10. – С. 27 – 35.
39. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения / Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, А.С. Кротов и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 11. – С.19 – 27.
40. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравновесности и градиент свойств по толщине / Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, А.С. Кротов и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – № 12. – С.40 – 46.
41. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения / Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, А.С. Кротов и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 1. – С.34 – 40.
42. Комбинированный метод исследования деформации и разрушения образцов из углерод-углеродного композиционного материала по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии / С.В. Панин, М.В. Бурков, А.В. Бяков и др. // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 4 (5). – С. 129 – 138.
43. Комплексное исследование дефектов в композиционных материалах с применением хрупких тензопокрывтий и акустической эмиссии / Ю.Г. Матвиенко, А.В. Фомин, В.И. Иванов и др // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – № 1. – том 80. – С. 46 – 50.
44. Комплексные экспериментальные исследования характеристик деформирования и разрушения углерод-углеродного композиционного материала при квазистатическом нагружении / А.А. Смердов, Л.П. Таирова, А.Н. Миронихин и др. // Конструкции из композиционных материалов. – 2011. – № 1. – С. 37 – 50.
45. Кудря, А.В. Классификация источников акустической эмиссии в тонкой пластине по различиям структуры сигналов / А.В. Кудря, Е.А. Марков // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – №6. – С.32 – 38.
46. Кудря, А.В. Количественная оценка разрушения по акустической эмиссии в различных масштабах измерения/ А.В. Кудря, Е.А. Марков// Материаловедение. – 2007. – № 1. – С. 13 – 18.

47. Лексовский, А.М. Некоторые аспекты зарождения и развития трещин микро- и мезомасштаба и квазихрупкое разрушение однородных материалов / А.М. Лексовский, Б.Л. Баскин // Физика твердого тела. – 2011. – том 53. – вып. 6. – С. 1157 – 1168.
48. Леонов, В.В. Материаловедение и технология композиционных материалов: Курс лекций. / В.В. Леонов, О.А. Артемьева, Е.Д. Кравцова. Красноярск: СФУ – 2007. – 241 с.
49. Лурье, С.А. Моделирование изменения характеристик слоистых композиционных материалов при циклическом нагружении / С.А. Лурье, И.И. Криволицкая, Юсефи Шахрам // Конструкции из композиционных материалов. – 1999. – № 3. – С. 90 – 97.
50. Мадарас, Э. Подчеркивание роли NASA в развитии искусства неразрушающего контроля композитов // Исследовательский центр NASA Langley, научное отделение неразрушающего контроля конструкций и материалов. – Гэмптон. – VA 23681.
51. Махутов, Н.А. Расчетно-экспериментальное определение сопротивления усталости углепластиков и элементов конструкций из них / Н.А. Махутов, А.М. Думанский, В.Б. Стрекалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2006. – №6. – том. 72. – С. 41 – 46.
52. Механические свойства полимерных композиционных материалов с интегрированным оптическим волокном (обзор) / В.В. Махсидов, М.Ю. Федотов, В.А. Гончаров и др. // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 9. – С. 2 – 7.
53. Микропроцессорные акустико-эмиссионные системы для прочностных испытаний конструкций / Л.Н. Степанова, В.В. Муравьев, Е.Ю. Лебедев и др. // Контроль. Диагностика. – 2002. – № 11. – С. 38 – 45.
54. Многомасштабный метод анализа деформации сплавов и углерод-углеродных композиционных материалов по данным тензометрии, картирования деформации на поверхности и акустоэмиссии / В.Е. Панин, С.В. Панин, А.В. Бяков и др. // Контроль. Диагностика. – 2011. – №11. – С. 56 – 62.
55. Моваггар, А. Экспериментальное исследование усталостной прочности стекловолоконного композита СТЭФ-1 / А. Моваггар, Г.И. Львов // Проблемы прочности. – 2012. – № 2. – С.145 – 155.
56. Муравьев, В.В. Применение методики обработки сигналов для повышения точности локализации сигналов АЭ / В.В. Муравьев, М.В. Муравьев, С.А. Бехер // Дефектоскопия. – 2002. – № 8. – С. 53 – 65.
57. Мурашов, В.В. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов / В.В. Мурашов, А.Ф. Румянцев // Контроль. Диагностика. – 2007. – № 4. – С. 23 – 32.

58. Мурашов, В.В. К вопросу определения упругих и прочностных свойств полимерных композиционных материалов акустическим комплексным методом / В.В. Мурашов // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 11. – С. 39 – 45.
59. Мурашов, В.В. Неразрушающий контроль многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическим импедансным методом без применения контрольных образцов для настройки приборов [Электронный ресурс] / В.В. Мурашов // Научный электронный журнал «Новости материаловедения. Наука и техника». – 2014. – № 1.
60. Нестерук, Д.А. Инфракрасно-ультразвуковой контроль воды в сотовых панелях самолета / Д.А. Нестерук, В.С. Хорев, К.Н. Коробов // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 11. – С. 11 – 14.
61. Новые идеи в активном тепловом контроле / В.П. Вавилов, А.О. Чулков, Д.А. Дерусова и др. // В мире неразрушающего контроля. – 2016. – Т.19. – № 1. – С. 5 – 7.
62. Парнасов, В.С. Методы, средства и технология дефектоскопии изделий из полимерных композиционных материалов / В.С. Парнасов, В.А. Добромислов // Измерительная техника. – 1997. – № 11. – С. 34 – 39.
63. Пат. РФ № 2396557 МПК G 01 N 29/14. Многоканальное акустико-эмиссионное устройство / Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю. и др.; заявитель и патентообладатель ФГУП СибНИА им. С.А. Чаплыгина заявл. 16.12.2008, опубл. 10.08.2010, Бюл. № 22.
64. Переберин, А.В. О систематизации вейвлет-преобразований / А.В. Переберин // Вычислительные методы и программирование. – 2001. – т.2. – С.15 – 40.
65. Петров, М.Г. Прочность и долговечность элементов конструкций: подход на основе моделей материала как физической среды. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing. – 2015. – 472 с.
66. Петров, М.Г. Связь долговечности и неупругости металлических сплавов / М.Г. Петров // Транссиб 99: Материалы научно-практической конференции. – Новосибирск: СГУПС. – 1999. – С. 450 – 452.
67. Полимерные композиционные материалы. Свойства. Структура. Технологии / под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия. – 2009. – 560 с.
68. Поллок, А.А. Акустико-эмиссионный контроль / А.А. Поллок // Металлы (Metals handbook), 9-ое издание, т. 17. – ASM International. – 1989. – С.278 – 294.
69. Положительное решение о выдаче патента Российской Федерации, МПК G01N29/14 (2006.1) 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.; заявитель и патентообладатель ФГБОУВО "Сибирский государственный университет путей сообщения"; заявл. 09.06.2015. Дата получения положительного решения - 19.07.2016.

70. Преображенский, А.И. Стеклопластики – свойства, применение, технологии / А.И. Преображенский // Главный механик. – 2010. – № 5. – С. 27 – 36.
71. Применение датчиков деформации интегрального типа для оценки усталостной поврежденности углеродных композитов / С.В. Панин, М.В. Бурков, П.С. Любутин и др. // Дефектоскопия. – 2014. – №5. – С. 48 – 59.
72. Прочностные испытания фрагмента руля высоты самолета SSJ-100 методами акустической эмиссии и тензометрии / Л.Н. Степанова, В.В. Чернова, Е.С. Огнянова и др // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 7. – С. 38 – 46.
73. Разработка метода кластеризации по параметрам сигналов акустической эмиссии /Л.Н. Степанова, К.В. Канифадин, И.С. Рамазанов и др. // Дефектоскопия. – 2010. – №2. – С. 78 – 89.
74. Регистрация процесса разрушения образцов из композиционного материала методом акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, Е.Ю. Лебедев, А.Е. Кареев и др. // Дефектоскопия. – 2004. – № 7. – С. 56 – 62.
75. Серьезнов, А.Н. Акустико-эмиссионная система для регистрации непрерывных и дискретных сигналов / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов // Датчики и системы. – 2010. – №8. – С.55 – 60.
76. Серьезнов, А.Н. Метод акустической эмиссии при прочностных испытаниях самолетов / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова // Полет. – 2005. – № 11. – С. 14 – 19.
77. Серьезнов, А.Н. Создание встроенных систем диагностики для мониторинга конструкции самолета в полете / А.Н. Серьезнов, Л.Н. Степанова // Полет. – 2013. – № 2. – С. 43 – 48.
78. Скальский, В.Р. Исследование особенностей макроразрушения композиционных материалов / В.Р. Скальский, Е.М. Станкевич, Ю.Я. Матвиив // Дефектоскопия. – 2013. – № 10. – С. 14 – 25.
79. Смоленцев, Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н.К. Смоленцев. – Кемерово. – 2003. – 200 с.
80. Совершенствование акустико-эмиссионной локации дефектов при прочностных испытаниях конструкций из углепластика / Л.Н. Степанова, Г.Г. Анохин, С.И. Кабанов и др.// Контроль. Диагностика. – 2016. – №6. – С.66 – 72.
81. Стадийность локализованной деформации при растяжении образцов из углерод-углеродного композиционного материала с отверстиями различного диаметра по данным акустоэмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии / С.В. Панин, М.В. Бурков, А.В. Бяков и др. // Дефектоскопия. – 2012. – №10. – С. 57 – 70.
82. Степанова, Л.Н. 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.

83. Степанова, Л.Н. Вейвлет-фильтрация в задачах локализации сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, И.С. Рамазанов // Контроль. Диагностика. – 2008. – №1. – С.15 – 19.
84. Степанова, Л.Н. Динамическая кластеризация по набору параметров сигналов акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 10. – С. 12 – 16.
85. Степанова, Л.Н. 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.
86. Степанова, Л.Н. Исследование процесса разрушения образцов из композиционных материалов методом акустической эмиссии / Л.Н. Степанова, В.В. Чернова // Изв. вузов. Строительство. – 2014. – № 3. – С. 118-124.
87. Степанова, Л.Н. Локализация источников акустической эмиссии в объектах с малыми геометрическими размерами / Л.Н. Степанова, Е.С. Тенигилов // Дефектоскопия. – 2012. – №11. – С.62 – 72.
88. Степанова, Л.Н. 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.
89. Степанова, Л.Н. Оценка погрешности определения времени прихода сигналов акустической эмиссии пороговым методом / Л.Н. Степанова, И.С. Рамазанов, К.В. Канифадин // Дефектоскопия. – 2009. – №4. – С.69 – 78.
90. Степанова, Л.Н. Прочностные исследования композиционных материалов, используемых на транспорте / Л.Н. Степанова, В.В. Чернова, В.К. Кулешов // Вестник РГУПС. – 2015. – №3. – С. 13 – 18.
91. Степанова, Л.Н. Прочностные исследования образцов из углепластика с различной укладкой монослоев / Л.Н.Степанова, Г.Г. Анохин, В.В. Чернова // Дефектоскопия. – 2016. – № 1. – С. 30 – 40.
92. Степанова, Л.Н. Разработка метода динамической кластеризации сигналов акустической эмиссии для повышения точности их локализации / Л.Н. Степанова, А.Е. Кареев // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 6. – С. 15 – 21.
93. Степанова, Л.Н. Расчет координат источников сигналов акустической эмиссии в образцах из углепластика / Л.Н. Степанова, Е.Ю. Лебедев, И.С. Рамазанов // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 8. – С. 74 – 78.

94. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении / Научные редакторы А.Г. Братухин, В.С. Боголюбов, О.С. Сироткин. – М: Изд-во Готика, 2003 – 517 с.
95. Троицкий, В.А. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов / В.А. Троицкий, М.Н. Карманов, Н.В. Троицкая // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – № 3. – С. 29 – 33.
96. Трунин, Ю.П. Усталостная прочность авиационных конструкций из композиционных материалов (по материалам открытой иностранной печати за 1971 – 1979 гг.): Обзоры. Рефераты. / Ю.П. Трунин, И.М. Ягудина. М.: – 1981. – № 597 – 70 с.
97. Хорошавина, С.Г. Оценка качества композиционных материалов с использованием статистической обработки сигналов акустической эмиссии / С.Г. Хорошавина // Контроль. Диагностика. – 1999. – № 9. – С. 34 – 38.
98. Шульженко, М.Н. Конструкция самолетов / М.Н. Шульженко. – М.: Машиностроение, 1971 – 416 с.
99. Экспериментальное исследование жесткостных и прочностных характеристик углепластика / А.А. Смердов, О.А. Смердова, Л.П. Таирова и др. // Конструкции из композиционных материалов. – 2009. – № 3. – С. 68 – 82.
100. Acoustic emission detection of impact damage on space shuttle structures / W. Prosser, E. Madaras, G. Studor et al. // Journal of Acoustic Emission. – 2005. – v. 23. – p. 37 – 46.
101. Acoustic emission monitoring of composite blade of NM48/750 NAG-MICON wind turbine / D. Papasalouros, N. Tsopelas, A. Anastasopoulos, et al. // Journal of Acoustic Emission. – 2013. – Vol. 31. – pp. 34 – 49.
102. Beckermann, G. Nanofibre veils for high-performance composites / G. Beckermann // JEC Composites magazine. – 2016. – № 102. – January – February. – pp. 39 – 42.
103. Blind deconvolution of acoustic emission signals for damage identification in composites / G.T. Zheng, M.A. Buckley, G. Kister et al. // AIAA Journal. – 2001. – Vol.39. – № 6. – pp. 1198 – 1205.
104. Cardoni, M. A low frequency lamb-waves based structural health monitoring of an aeronautical carbon fiber reinforced polymer composite / M. Cardoni, A. Gianneo, M. Giglio // Journal of Acoustic Emission. – Vol. 32. – 2014. – pp. 1 – 20.
105. Dykes, B.C. An acoustic emission pre-failure warning system for composite structural tests / B.C. Dykes, W.T. Hardrath, D.S. Ulm // AECM-4 International Symposium on Acoustic Emission from Composite Materials, 4<sup>th</sup>, Seattle. – WA. – July 27 – 31. – 1992. – Proceedings (A93-52551 22-38). – pp. 175 – 181.

106. Feasibility of optical fiber sensor for condition monitoring of composite structures. Part I: comparison of Bragg-sensors and strain gauges / W. De Waele, J. Degrieck, W. Moerman, et al. // *Insight*. – 2003. – Vol. 45. – № 4. – pp. 266-270.
107. Feasibility of optical fiber sensor for condition monitoring of composite structures. Part II: combination of Bragg-sensors and acoustic emission detection / W. De Waele, J. Degrieck, W. Moerman, et al. // *Insight*. – 2003. – Vol. 45. – № 8. – pp. 542-553.
108. Gorman, M. Modal AE analysis of fracture and failure in composite materials, and the quality and life of high pressure composite pressure vessels / M. Gorman // *Journal of Acoustic Emission*. – 2011. – Vol. 29. – pp. 1-28.
109. Hazell, P.J. Impact, penetration and perforation of a bonded carbon-fiber-reinforced plastic composite panel by a high velocity steel sphere: an experimental study / P.J. Hazell, G.J. Appleby-Thomas, G. Kister // *J. Strain Analysis*. – 2010. – Vol. 45. – pp. 439 – 450.
110. Holroyd, T.J. Development of practical acoustic emission – based structural monitoring system / T.J. Holroyd, H.M. Meisuria, D. Lin // *Insight*. – 2003. – Vol. 45. – № 2. – pp. 127 – 129.
111. Kurokawa, Y. Real time executing source location system applicable to anisotropic thin structures / Y. Kurokawa, Y. Mizutani, M. Mayuzumi // *Journal of Acoustic Emission*. – 2005. – Vol. 23. – pp. 224 – 232.
112. Madaras, E. Investigation of the magneto-acoustic villari effect for measuring the internal stress in composites / E. Madaras, M. Horne // *Seedling Technical seminar*. – February 19 – 27. – 2014. – NASA.
113. Malnati, P. A hidden revolution: FRP rebar gains strength / P. Malnati // *Composites Technology*. – 2011. – № 12. – pp. 25 – 29.
114. Maradei, C. Monitoring of the tool condition with acoustic emission signal analysis using wavelet packets / C. Maradei, R. Piotrkowski, E. Serrano // *Insight*. – 2002. – Vol. 44. – № 12. – pp. 786 – 791.
115. Sause, Markus G. R. Acoustic emission signal propagation in damaged composite structures / Markus G. R. Sause // *Journal of Acoustic Emission*. – 2013. – Vol. 31. – pp. 1 – 18.
116. Structural health management for future aerospace vehicles / W.H. Prosser [et al.] // *NASA Technical Reports Server*. – 2004.
117. Sudha, J. Condition monitoring of delamination during drilling of GFRP composites using acoustic emission technique – a neural model / J. Sudha, S. Sampathkumar, R. Kumar // *Insight*. – 2011. – v. 53. – № 8. – pp. 445 – 449.
118. Sutton, M.A. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements / M.A. Sutton, J.-J. Orteu, H. Schreier. – University of South Carolina, Columbia, SC. – USA. – 2009. – 364 p.
119. Zhang, T. An investigation into the propagation characteristics of AE signals in PE/PE composite laminates / T. Zhang, X. Wang, B. Yang // *Insight*. – 2007. – vol. 49. – № 11. – pp. 665 – 668.

**Акты использования результатов диссертационного исследования**



**Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С. А. Чаплыгина»  
(ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина»)**

Ползунова ул., д. 21, г. Новосибирск, 630051  
Тел. (383) 279-01-56  
Факс (383) 227-88-77  
E-mail: sibnia@sibnia.ru, http://www.sibnia.ru

ОКПО 07541511, ОГРН 1025400530836, ИНН/КПП 5401101598/540101001  
р/с 40502810944080100010 в Сибирском банке СБ РФ г. Новосибирск  
к/с 30101810500000000641  
БИК 045004641

№ \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Директор ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А.Чаплыгина»

В.Е. Барсуک

«14» ию



**АКТ**

практического использования результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук аспирантки СГУПС Черновой Валентины Викторовны «Разработка методики акустико-эмиссионного контроля дефектов на ранней стадии их развития в изделиях из композиционных материалов»

Комиссия в составе председателя – главного инженера Оспенникова В.В. и членов комиссии: главного специалиста института Шустова Ю.А., к.т.н., ведущего научного сотрудника Кабанова С.И. подтверждает, что результаты диссертационной работы Черновой В.В. представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в научно-исследовательской деятельности ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А.Чаплыгина». Под руководством д.т.н., профессора Степановой Л.Н. совместно с сотрудниками ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина» аспирант Чернова В.В.

принимала участие при прочностных испытаниях образцов и элементов авиационных конструкций из углепластика T700, осуществляла мониторинг их состояния с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии.

В процессе проведения исследований в ФГУП «СибНИА имени С.А.Чаплыгина» получены следующие результаты:

1. Использовалась разработанная в процессе диссертационных исследований методика локации дефектов в композиционных материалах с учетом направления распространения сигналов акустической эмиссии. Данная методика позволила получать устойчивую локацию сигналов АЭ, соответствующую области разрушения образцов и элементов авиационных конструкций на стадии их зарождения в режиме реального времени.

2. Предложен алгоритм расчета структурного коэффициента  $P_D(f)$  с использованием вейвлет-преобразований, основанный на определении изменения частотно-временной структуры сигналов акустической эмиссии. Разработанная методика контроля позволила локализовать источники сигналов АЭ, регистрируемые в процессе нагружения исследуемых объектов от момента зарождения до их полного разрушения в режиме реального времени.

3. Проведены исследования изменения неупругих свойств образцов из углепластика при их циклическом нагружении. Разработанный алгоритм определения типа разрушения образцов из углепластика по изменению частотно-временной структуры сигналов может быть использован для создания методики оценки степени опасности дефектов в композитных конструкциях в процессе прочностных испытаний.

4. Использовалась методика двухэтапной кластеризации в процессе циклических испытаний образцов из углепластика с локацией сигналов акустической эмиссии в режиме реального времени. Данный метод кластерного анализа позволил разделить получаемую информацию по источникам, сократив при этом время обработки по сравнению с кластеризацией по оцифрованной форме. Это является важным преимуществом при выполнении исследований образцов и

конструкций, а также позволяет своевременно определять координаты областей разрушения в режиме реального времени.

5. Разработанная методика анализа изменения структуры сигналов АЭ с использованием структурного коэффициента  $P_D(f)$  применялась при прочностных испытаниях элементов авиационных конструкций (фрагмент руля высоты, передний лонжерон верхнего крыла, лонжерон вертикального и горизонтального оперения, панели, укрепленных стрингерами и ребрами жесткости).

Председатель комиссии



В.В.Оспенников

Члены комиссии:



Ю.А.Шустов

С.И.Кабанов

УТВЕРЖДАЮ

Ректор ФГБОУ ВО СГУПС  
А.Л. Манаков«    »  
2016 г.

МП

## АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы аспирантки СГУПС Черновой В.В. «Разработка методики акустико-эмиссионного контроля дефектов на ранней стадии их развития в изделиях из композиционных материалов» в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается практическое использование в учебном процессе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» на кафедре «Электротехника, диагностика и сертификация» факультета «Управление транспортно-технологическими комплексами» основных результатов диссертационной работы В.В. Черновой «Разработка методики акустико-эмиссионного контроля дефектов на ранней стадии их развития в изделиях из композиционных материалов» в рамках дисциплин «Приборы неразрушающего контроля», «Автоматизация измерений, контроля и испытаний» по специальности 221700 «Стандартизация и метрология», профиль 200503 «Стандартизация и сертификация».

В процессе чтения лекций по данным курсам использовался следующий материал диссертационной работы В.В. Черновой:

1. Рассмотрены типы композиционных материалов и их основные технические характеристики, которые используются в таких отраслях промышленности, как строительство, машиностроение, железнодорожный и авиационный транспорт

и т.д. Представлена классификация основных типов дефектов композитов и методов неразрушающего контроля (НК), позволяющих их своевременно выявлять. Показаны достоинства и недостатки наиболее перспективных методов НК. К наиболее распространенному методу контроля дефектов композитов при прочностных испытаниях, как в нашей стране, так и за рубежом относится метод акустической эмиссии, так как он позволяет определять дефекты на ранней стадии развития, осуществлять автоматизацию измерений, определять степень опасности дефектов и мониторинг конструкций. В диссертации приведены примеры контроля дефектов с использованием метода акустической эмиссии и тензометрии, позволяющей определять деформации и напряжения в зонах объектах контроля, где проводится локация дефектов.

2. В лекциях использованы результаты статических и циклических испытаний образцов из углепластика *T700* и стеклопластика *СППС*. Приведены результаты акустико-эмиссионного контроля, которые позволили осуществить локацию дефектов в режиме реального времени при прочностных испытаниях образцов и элементов авиационных конструкций.

3. С использованием вейвлет-преобразований приведен алгоритм расчета структурного коэффициента  $P_D(f)$ . Рассмотрена методика оценки разрушения, позволившая осуществлять анализ неупругих свойств образцов из углепластика по изменению частотно-временной структуры сигналов акустической эмиссии с использованием структурного коэффициента.

Результаты диссертационной работы Черновой В.В. нашли применение в качестве лекционного материала, который наглядно показал студентам возможности и преимущества практического применения микропроцессорной акустико-эмиссионной системы СЦАД-16.10 при диагностике образцов и элементов авиационных конструкций из композиционных материалов в режиме реального времени.

Зав. кафедрой «Электротехника,  
диагностика и сертификация»  
д. т. н., профессор



Л.Н. Степанова