

На правах рукописи



Брянский Антон Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И
РАЗРУШЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ АКУСТИЧЕСКОЙ
ЭМИССИИ**

Специальность 2.6.17 — Материаловедение (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», на кафедре «Материаловедение и технология новых материалов».

Научный руководитель - **Башков Олег Викторович**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» ФГБОУ ВО «Комсомольск-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре

Официальные оппоненты: **Барат Вера Александровна**, доктор технических наук, доцент кафедры «Диагностические информационные технологии» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва

Коневцов Леонид Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Хабаровский Федеральный исследовательский центр Институт Материаловедения ДВО РАН», г. Хабаровск

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФПМ СО РАН), г. Томск

Защита состоится «10» июня 2022 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.316.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КнАГУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/174.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета, а также на электронную почту diss.material@yandex.ru.

Автореферат разослан « » 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета, к.т.н.



Проценко Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Увеличение доли использования и расширение сфер применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в современной промышленности обусловлено их высокой удельной прочностью, хемостойкостью, возможностью задания направленных механических свойств. Стеклопластики получили наибольшее распространение в промышленности, авиа- и судостроении. Однако, сложная структура таких материалов создаёт проблемы при проектировании и эксплуатации изделий из них, что особенно критично для ответственных деталей и конструкций. Комплексная структура полимерных композитов обуславливает многообразие образующихся повреждений, степень опасности которых зависит от их размера, интенсивности образования и стадии эксплуатации.

Исследование процесса накопления повреждений в стеклопластиках в условиях их деформирования является одной из важных задач оценки структурного состояния материала и возможности его дальнейшей эксплуатации. Для решения данных задач необходимо установление связи между механизмами разрушения, протекающих в условиях деформирования ПКМ и структурным состоянием материала. Одним из решений поставленных задач является разработка методик и средств определения образующихся повреждений, позволяющих количественно и качественно оценивать информацию о структурном состоянии ПКМ.

Степень разработанности темы

Акустическая эмиссия (АЭ) нашла широкое применение в качестве информативного метода анализа структурных изменений в условиях деформирования материалах, когда применение других методов неразрушающего контроля затруднено. Сигналы АЭ несут в себе информацию об образовании и развитии локальных дефектов, механизмах разрушения и степени их опасности. Поиск методов анализа и интерпретации параметров сигналов АЭ является актуальной задачей в связи необходимостью достоверной оценки механизма разрушения по характеру сигналов АЭ, зарегистрированных при механическом нагружении изделий и конструкций из ПКМ.

Большой вклад в развитие теоретических и практических исследований основ анализа АЭ при деформации и разрушении материалов внесли такие российские и зарубежные ученые, как Г.А. Бигус, С.И. Буйло, Ю.Б. Дробот, В.И. Иванов, Д.Л. Мерсон, В.В. Муравьев, К. Оно, Аки К., Шиотани Т., А. Грин, М. Хамстед, Маркус Г.Р. Саус, Д. Кайзер, Годин Н., Гуткин Р. и другие. В большинстве научных работ описаны теоретические аспекты, моделирование разрушения материалов и распространения волн АЭ в материалах, обработки АЭ сигналов, зарегистрированных при разрушении, и причины их происхождения.

Активное использование статических методов показало эффективность применения комплексного анализа данных АЭ для интерпретации и понимания происходящих событий в структуре исследуемых материалов. Поиск эффективных методов оценки параметров регистрируемой АЭ позволяет в дальнейшем повысить качество и результативность исследования материалов в различных условиях внешнего воздействия.

Цель диссертационной работы заключается в установлении закономерностей и критериев оценки накопления повреждений и разрушения стеклопластиков по параметрам акустической эмиссии в условиях действия статических и циклических нагрузок.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ методов оценки повреждений и механизмов разрушения ПКМ.
2. Проведение экспериментальных исследований для установления связи между структурным состоянием стеклопластиков, полученных различными методами формования, и кинетикой развития и накопления повреждений в условиях статической и циклической деформации.
3. Разработка критериев идентификации повреждений стеклопластиков по параметрам регистрируемых сигналов АЭ.
4. Разработка методики определения показателей механических и эксплуатационных свойств стеклопластиков на основе метода АЭ при испытании образцов на статический изгиб, статическое и циклическое растяжение.

Объектом исследования являются структура и повреждения в образцах стеклопластиков, изготовленных с использованием связующих ЭДТ-69Н, DION FR 9300, Derakane 411-350 и стеклотканей Т10, Т11-ГВС-9, Ст-62004.

Предметом исследований являются кинетика и стадийность образования и развития структурных дефектов в исследуемых образцах стеклопластиков на основе анализа зарегистрированных сигналов АЭ.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Установлена связь между исходным структурным состоянием, показателями механических свойств и кинетикой накопления повреждений стеклопластика в условиях статических и циклических деформаций. Раскрыто влияние технологических факторов изготовления стеклопластика на дефектность структуры, показатели механических свойств и кинетику накопления повреждений.
2. Выявлена связь между структурными изменениями при деформировании и разрушении стеклопластика и параметрами регистрируемых сигналов АЭ. Обоснована необходимость использования комплексов параметров АЭ для эффективного определения стадий разрушения стеклопластика.
3. Экспериментально показано влияние скорости нагружения на процесс образования и развития повреждений в ПКМ в условиях статического деформирования изгибом и растяжением. Увеличение скорости

деформирование приводит к увеличению масштаба образующихся повреждений. Сигналы АЭ, идентифицированные как излучение при расслоении стеклопластика, начинают превалировать над остальными типами повреждения матрицы при увеличении скорости деформации.

4. Сформулированы критерии оценки разрушения стеклопластика от действия статических и циклических нагрузок, основанные на результатах кластеризации сигналов АЭ и идентификации типов повреждений по спектрам Фурье с использованием нейронной сети.

Практическая значимость диссертации:

1. Разработана методика классификации регистрируемых сигналов АЭ и идентификации повреждений структурных компонентов стеклопластика на различных стадиях деформации и разрушения, основанная на способе двухстадийной кластеризации спектров Фурье сигналов АЭ с использованием алгоритмов самоорганизующейся карты Кохонена и k-средних.

2. Разработан способ оценки свойств среды, являющейся источниками АЭ, генерируемыми в результате образования и развития дефектов типа трещин, находящихся на различных расстояниях от приемника АЭ.

3. Результаты научной работы были внедрены в учебный процесс при курсовом и дипломном проектировании и использованы при чтении курсов на кафедре «Материаловедение и технология новых материалов».

На защиту выносятся:

1. Связь характера образования и кинетики развития повреждений с исходной структурой стеклопластиков и условиями механических воздействий.

2. Идентификация повреждений структурных компонентов стеклопластиков на различных стадиях деформации и разрушения, основанная на классификации регистрируемых сигналов АЭ методом двухстадийной кластеризации спектров Фурье сигналов АЭ с использованием алгоритмов самоорганизующейся карты Кохонена и k-средних.

3. Характер влияния технологических факторов на показатели механических свойств и кинетику образования и развития повреждений в стеклопластиках в условиях статических и циклических нагрузок.

4. Зависимости между стадийностью образующихся повреждений, характеризующих механизмы разрушения, и показателями механических и эксплуатационных свойств стеклопластика.

Методология и методы исследования

В работе использовались современные методы исследования структуры материалов и эволюции структурных изменений при механическом воздействии на материалы. Экспериментальные исследования проводились на базе оборудования центра коллективного пользования научным оборудованием «Новые материалы и технологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет». Механические испытания выполнялись на универсальной испытательной машине Instron 3382. Микроскопические

исследования проводились на оптическом микроскопе Nikon Eclipse MA200 и растровом электронном микроскопе Hitachi S 3400-N. Регистрация и анализ сигналов акустической эмиссии выполнялись с использованием системы на базе АЦП Adlink PCI-9812 и программного обеспечения AE Pro-2.0. Для расчета результатов экспериментальных исследований использовалось программное обеспечение MS Excel, Matlab.

Достоверность и обоснованность результатов обусловлена применением современных методов исследования в материаловедении (оптическая и электронная микроскопия, методы механических испытаний, метод акустической эмиссии и методы анализа экспериментальных данных), корректностью постановки задач и обоснованным выбором материалов исследования, достаточным объемом экспериментальных данных и обоснованностью представленных результатов.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской конференции с международным участием «АПМАЭ» (г. Тольятти, 2018 г.); Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures (г. Томск, 2016, 2018 г.); Международная научно-техническая конференция ICMTMTE (г. Севастополь, 2019 г.); «Far East Con» международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям (г. Владивосток, 2018, 2019 и 2020 г.); Международной конференции АПП (г. Пермь, 2017 г., г. Тольятти, 2021 г.).

Публикации

По результатам исследований опубликовано 14 работ, из них 2 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 8 публикаций в зарубежных изданиях, входящих в перечни Web of Science или Scopus, 3 публикаций в журналах, сборниках научных трудов и трудов международных и всероссийских научно-технических конференций, получен один патент на изобретение.

Участие в научных проектах

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-38-90318/19, а также Российского научного фонда в рамках проектов № 21-19-00896 и 16-19-10149.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследований, проведении экспериментальных исследований и их анализе, подготовке публикации и формировании выводов по работе.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложений. Содержит 140 страниц основного текста, включая 14 таблиц, 49 рисунков и список литературы из 133 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научных исследований, сформулирована цель и определены задачи работы. Показана научная новизна, практическая значимость и апробация полученных результатов.

В первой главе приведен анализ современного состояния исследований кинетики и механизмов процесса разрушения ПКМ, способов анализа параметров АЭ для регистрации и идентификации повреждений в них. На основании анализа по результатам обзора современного состояния применения метода АЭ для исследования структурной деградации материалов по теме диссертации изложена цель работы, сформулированы основные задачи исследования, необходимость выполнения практических исследований, проанализированы способы анализа результатов работы.

Во второй главе приведено описание материалов, разработан план и приведены методики выполнения исследований. Рассмотрены методы анализа структуры, параметров АЭ для установления стадийности и оценки природы образующихся в стеклопластиках повреждений в условиях различных видов нагружения.



Рисунок 1 – Изготовление и испытание образцов: а – лабораторный автоклав; б – метод вакуумной инфузии; в – испытание на статический изгиб; г – испытание на статическое растяжение

Экспериментальные исследования были разделены на три части. Первая часть исследований была направлена на оценку несущей способности образцов стеклопластика, изготовленных их связующего ЭДТ-69Н и стеклоткани Т10-П(92), и основана на анализе степенной зависимости накопления суммарной АЭ от параметра нагружения. Степенной показатель n_i рассчитывался по формуле (1):

$$n_i = \frac{(N_{\text{АЭ}} \sigma_i)}{(\Delta \sigma N_i)}, \quad (1)$$

где $N_{\text{АЭ}}$ и N_i – приращение суммарной АЭ и значение суммарной АЭ на i -ом шаге испытания; $\Delta \sigma$ и σ_i – приращение напряжения и значение напряжения на i -ом шаге испытания.

Проведены анализ параметра b-value и оценка распределения пиковых амплитуд и медианных частот сигналов АЭ. Параметр b-value рассчитывался по формуле (2):

$$b = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - M_1}, \quad (2)$$

где $\bar{M}$ и M_1 – среднее и минимальное (пороговое) значения магнитуды.

Распределение параметров АЭ рассчитывалось по формуле (3):

$$p(x) = f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где $p(x)$ и x – вероятность значения и исследуемая величина; μ и σ – среднее значение и среднеквадратическое отклонение.

Вторая часть исследований посвящена идентификации образующихся в стеклопластиках повреждений при статическом трехточечном изгибе и растяжении многослойных образцов ПКМ. Образцы изготовлены с использованием связующего DION 9300 FR и 46 слоёв стеклоткани Т11-ГВС9. Разработан и применен алгоритм двухстадийной кластеризации с использованием самоорганизующейся карты Кохонена и частотных спектров Фурье зарегистрированных сигналов АЭ в качестве входных параметров.

Испытаны образцы из чистых связующих ЭД-20 и Derakane 411-350 для установления характерных пиковых частот повреждений матрицы. Повреждения, образованные в испытанных образцах, установлены микроскопическими исследованиями на растровом электронном микроскопе.

Для выявления влияния старения материала на его структуру и образующиеся в условиях нагружения повреждений проведены механические испытания образцов стеклопластика статическим трехточечным изгибом. Образцы были получены с использованием связующего Derakane 411-350 и стеклоткани Ст-62004 и подвергнуты термоокислительному старению в течение 96 часов при температурах 60, 100, 120 и 200 °С. Использован разработанный подход двухстадийной кластеризации.

Третья часть исследований была направлена на установление кинетики образования повреждений в условиях циклического растяжения. Образцы стеклопластика аналогичны образцам на основе связующего DION 9300 FR второй части исследования. Оценка масштаба и распределения повреждений проведена по статистическому распределению пиковых частот и долей энергии каждого уровня вейвлет-декомпозиции Добеши 14 для выборок сигналов АЭ.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований по установлению связи между исходным структурным состоянием, несущей способностью и кинетикой накопления повреждений в образцах стеклопластика в условиях статической деформации. В главе приведены результаты исследований, выполненных на основе трех серий механических испытаний. Первая серия испытаний проведена ступенчатым нагружением статическим трехточечным изгибом. Вторая серия испытаний проведена статическим трёхточечным изгибом со скоростями нагружения 0,24 мм/мин и 2,4 мм/мин и статическим растяжением со скоростями нагружения 1 мм/мин и 2 мм/мин. Третья серия испытаний проведена методом

статического изгиба для образцов стеклопластика, подвергнутых термоокислительному старению.

Несущая способность стеклопластиков оценивалась по концу линейного участка диаграммы нагружения, среднее значение которой для всех образцов составило $0,8\sigma_{max}$.

Для определения влияния метода формования были построены графики зависимости $n_i(\sigma_i)$ (рисунок 2). При установленном значении отношения $\sigma_i/\sigma_{max} = 0,8$ показатель степени находится в пределах $n_i = 2,9 - 3,3$, поэтому установленное значение было выбрано равным $n_i = 3,0$.

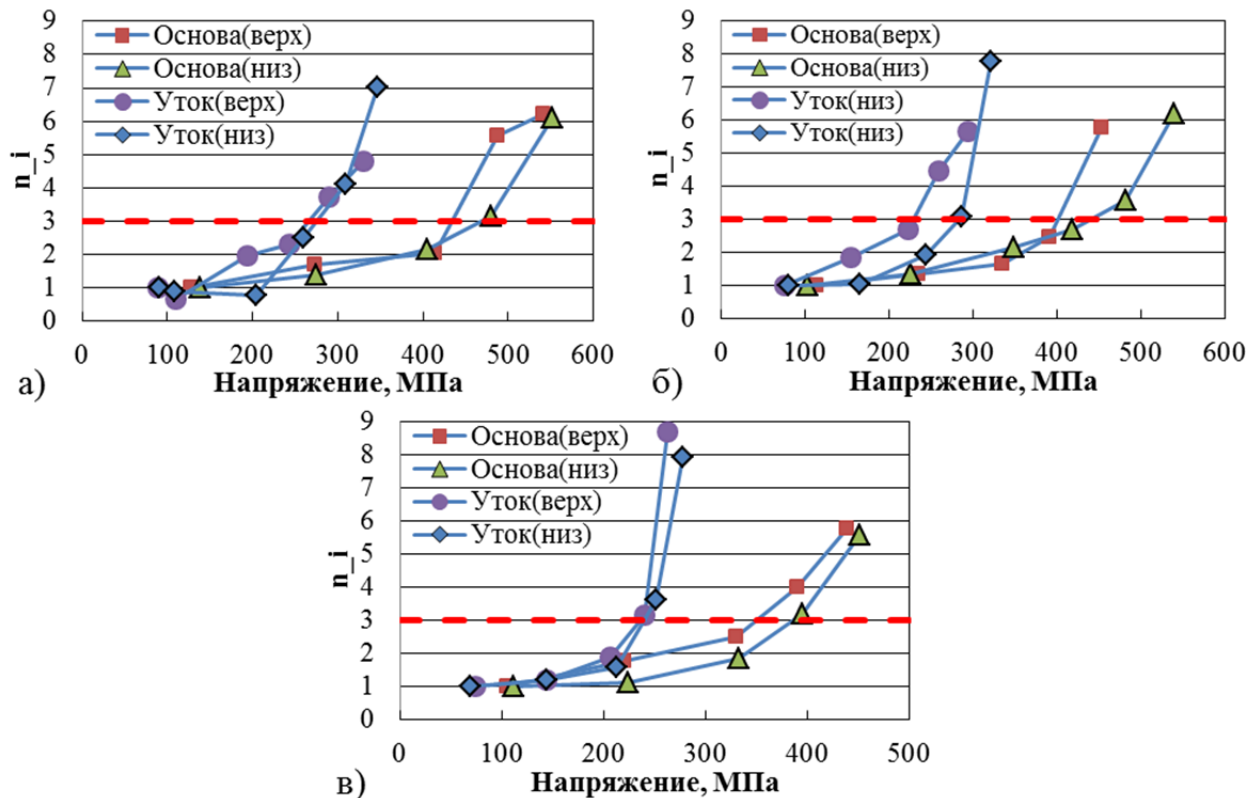


Рисунок 2 – Зависимость показателя степени n_i от напряжения нагружения $n_i(\sigma_i)$ для образца, полученного: а – вакуум-автоклавным; б – вакуум-автоклавным с перегревом; в – вакуумным методами формования

Значения отношения σ_i / σ_{max} варьируются в пределах $\sigma_i / \sigma_{max} = 0,70 - 0,85$. При оценке графиков нагружения данное отношение было признано допустимым.

Критерий оценки поврежденности стеклопластиков по показателю степени n_i ограничен необходимостью наличия информации об истории нагружения материала. В связи с этим потребовался поиск такого критерия, который позволял бы получить информацию о текущем состоянии изделия из ПКМ в некоторый период эксплуатации или испытания объекта исследований. Основываясь на этом, были проведён дополнительный анализ параметров АЭ по методикам, описанных во второй главе.

Для расчёта значений b-value на каждом шаге испытания, использовались выборки сигналов АЭ, зарегистрированных во время нагружения, чтобы исключить из анализа релаксационные процессы, протекающие в образцах стеклопластика при остановке нагружения. Для анализа использовали данные, полученные для 6-тислового образца, изготовленного вакуум-автоклавным методом формования, при нагружении сверху по основе стеклоткани. График изменения значений параметра b-value на каждом этапе нагружения представлен на рисунке 3. Номера на графике, показывают порядковый номер этапа нагружения.

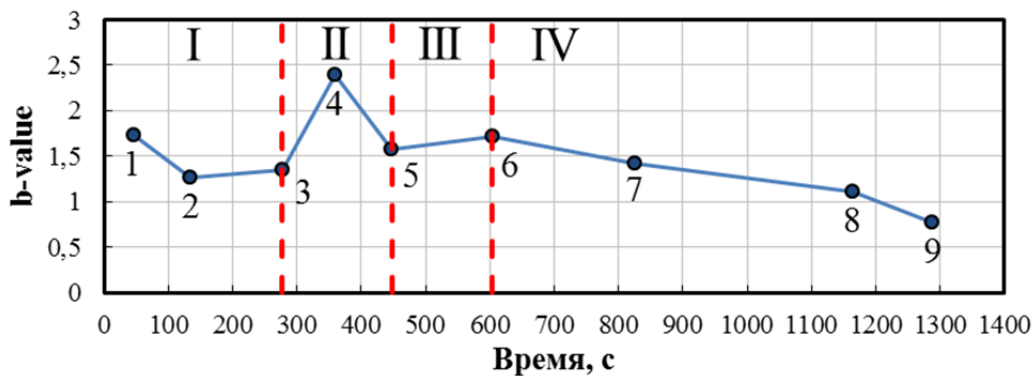


Рисунок 3 – Значения b-value на каждом этапе нагружения

Исходя из полученных данных было проведено разделение процесса накопления повреждений в образцах на ряд стадий: I) низкая активность АЭ с низкой степенью повреждений; II) начало разрушения матрицы связующего; III) смешанное повреждение связующего и стекловолокон; IV) разрушение стекловолокон, образование расслоений и трещин.

Анализ данных с помощью b-value не позволяет рассуждать об источниках сигналов АЭ и требует наличия информации о структуре материала.

Дальнейший анализ был проведён с использованием амплитуды, в качестве параметра оценки масштаба повреждений, и медианной частоты для характеристики природы источников АЭ. Использовались те же выборки данных, что и при анализе параметра b-value. Для анализа рассмотрены пиковые значения функций плотностей вероятности на каждом шаге испытания, и их значения на уровне $\sqrt{2}/2$ от пикового значения функций распределения (рисунок 4).

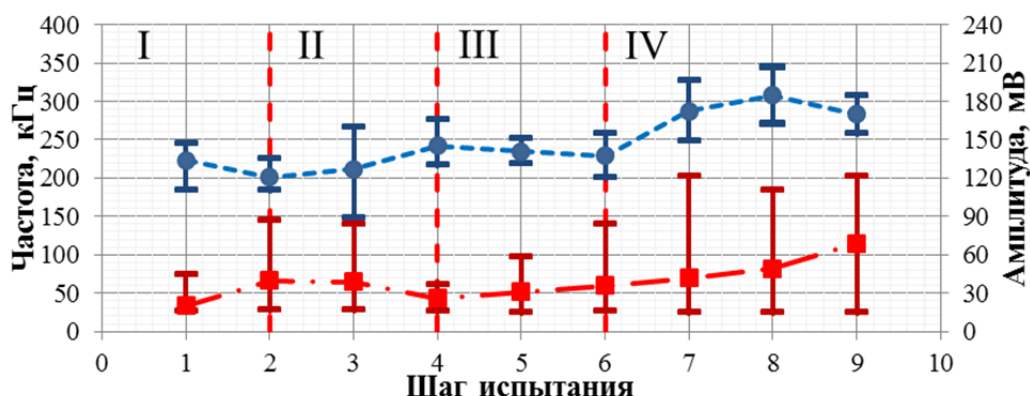


Рисунок 4 – Пиковые значения функций распределения максимальных амплитуд и медианных частот

Для идентификации природы сигналов АЭ на основании анализа литературы, приняли, что сигналы с частотой 70 – 150 кГц относятся к образованию повреждений в матрице, 150 – 200 кГц к выскальзыванию волокон и расслоениям, 210 – 270 кГц к нарушению соединения матрица/волокно и 300 – 450 кГц к разрушению стекловолокон. При проведении испытаний на разрыв лоскутов стеклоткани значения амплитуды и медианной частоты, в пиках плотностей распределения, составили 118 мВ (14 – 276 мВ) и 238 кГц (181 – 271 кГц), соответственно.

Стадийность процесса разрушения, полученная при анализе b-value, была охарактеризована более подробно согласно рисунку 4: I) рост масштаба повреждений в матрице связующего; II) масштаб повреждений уменьшается, начало процесса нарушения адгезии отдельных волокон к матрице; III) активное образование повреждений в материале, начало смешанного разрушения; IV) процесс критического разрушения стекловолокон, «долом» матрицы связующего к концу испытания.

В результате проведённых на растровом электронном микроскопе микроскопических исследований были выявлены структурные повреждения образцов в соответствии с предложенной классификацией стадий разрушения (рисунок 5).

Совокупный анализ амплитуд и медианных частот позволил выявить границы смены стадий процесса разрушения и механизмы повреждения ПКМ. Однако использование резонансного датчика и анализ значений медианных частот не позволяет в полной мере выявить природу образующихся повреждений по параметрам сигналов АЭ. Для дальнейших исследований был применён анализ частотного представления сигналов АЭ и разработанной методики двухстадийной кластеризации.

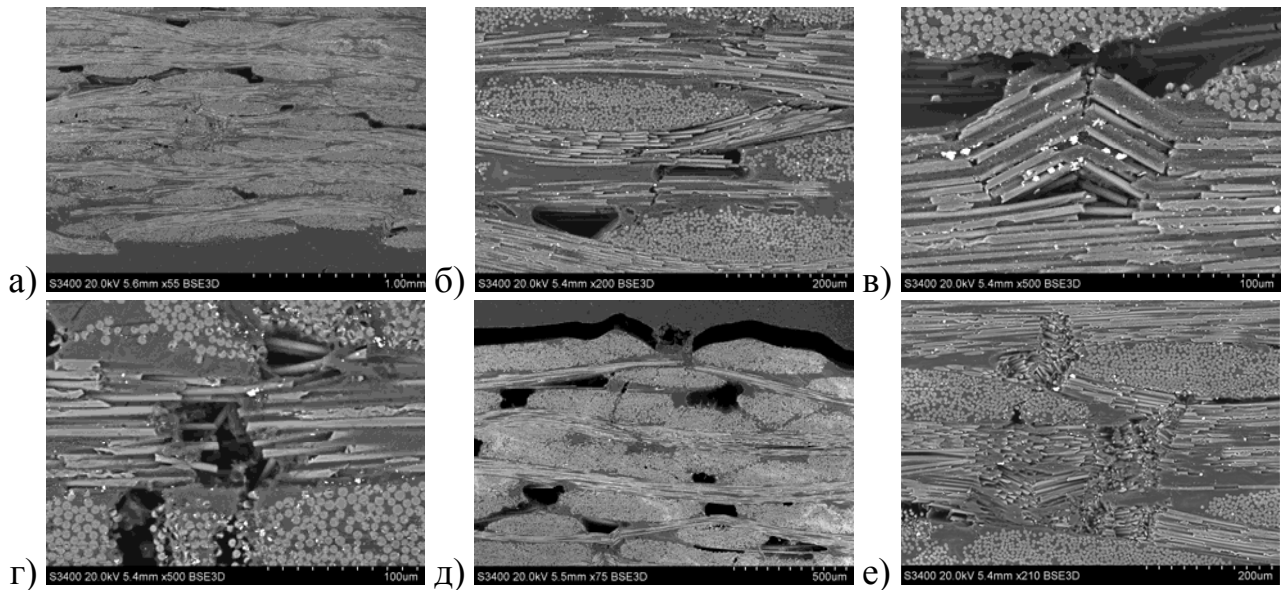


Рисунок 5 – Образуемые типы повреждений на стадиях: а – стадия II, нарушение адгезии матрица/волокно; б – стадия III, выскальзывание волокон; в – стадия III, образование кинка; г – стадия III, разрыв волокон; д – стадия IV, образование расслоения; е – стадия IV, критическое разрушение стекловолокон

Объектом исследования выступили образцы многослойного стеклопластика. С использованием методики кластеризации спектров сигналов зарегистрированной АЭ по методике, приведенной в главе 2, получены типовые спектры-центроиды, представленные на рисунке 6. Выборки данных АЭ каждого испытания обрабатывались отдельно.

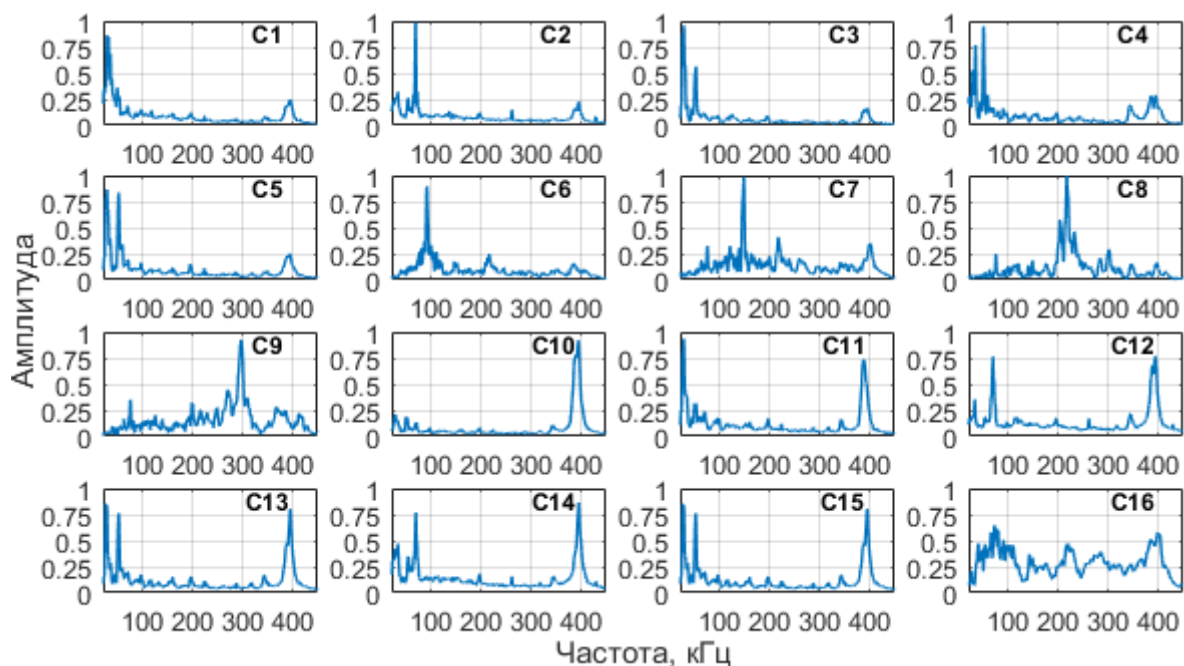


Рисунок 6 – Типовые спектры центроидов полученных кластеров C1 – C16

При испытании образцов из чистого связующего на статический изгиб и растяжение было установлено, что частоты 30-70 и 80 кГц характеризуют микроповреждения матрицы сдвига и сжатия (масштаба 1 и 2), 100 кГц – сколы и разрывы в матрице (масштаб 3), а 130-150 кГц – образование расслоений.

Характеристика кластеров, соответствующих какому-либо типу повреждения, производилась по значениям пиковых частот. Соответствие частот типам образующихся повреждений, принятых в данной работе, приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика типов повреждений по частотам

Частоты, кГц	Тип образующегося повреждения
30 – 70, 80 и 100	Повреждения матрицы масштаба 1, 2 и 3 соответственно
130 – 150	Критические повреждения матрицы (межслоевые повреждения)
150 – 220	Образование расслоений
180 – 260	Скольжение волокон
270 – 310	Отклеивание волокон
360 – 400	Излом волокон

Кривые нагружения и накопления кластеров различных типов повреждений в ходе механических испытаний приведены на рисунке 7.

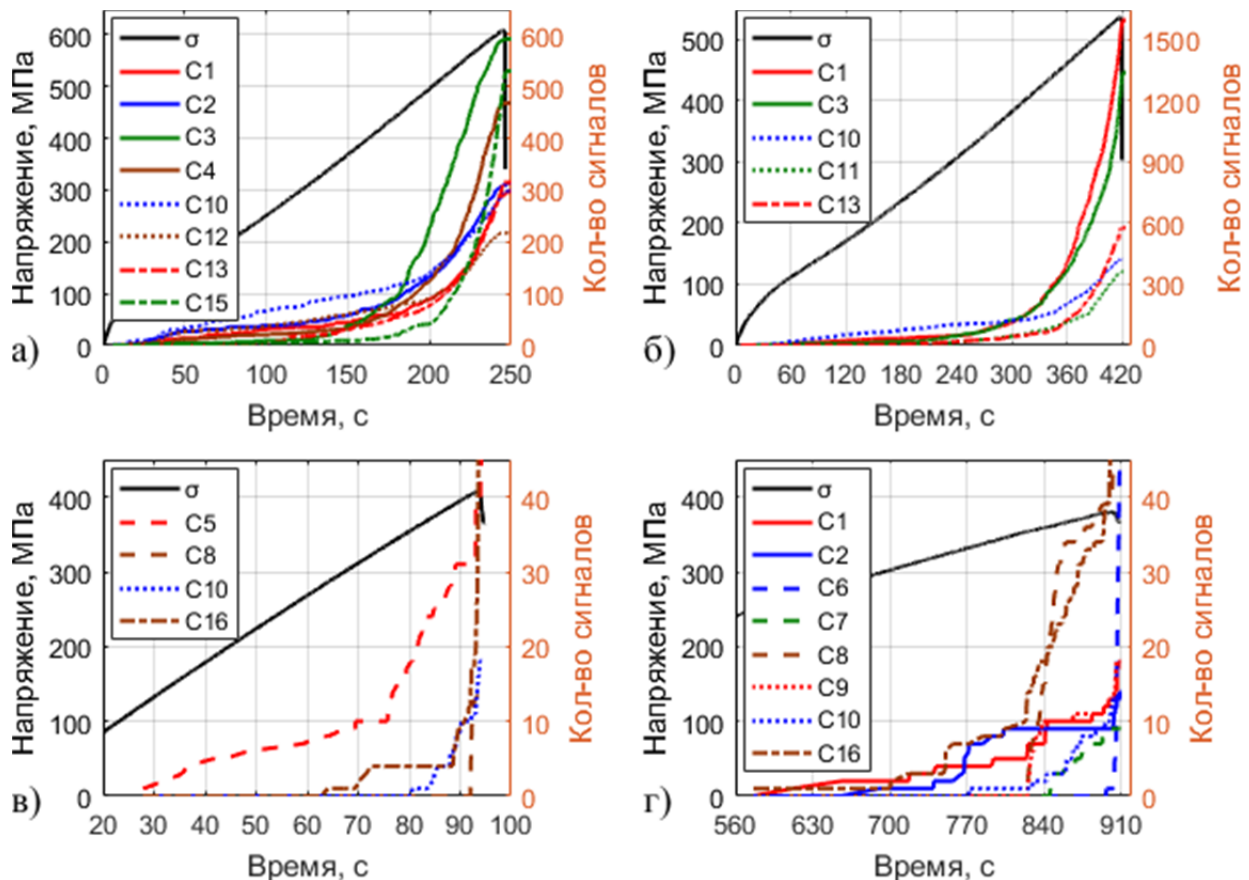


Рисунок 7 – Накопление кластеров различных типов повреждений при испытании: а – растяжение, 2 мм/мин; б – растяжение, 1мм/мин; в – изгиб, стандартная скорость; г – изгиб, скорость ниже стандартной в 10 раз

В результате анализа кривых накопления кластеров типовых повреждений установлено, что при испытании на растяжение, вне зависимости от скорости нагружения, процесс накопления повреждений в материале имеет схожую тенденцию. В случае трехточечного изгиба снижение скорости нагружения приводит к более поздней релаксации внутренних напряжений формирования и остальных этапов разрушения.

В обоих случаях снижение скорости нагружения обеспечивает более равномерную диссипацию напряжений по всему объему деформируемого материала, которое приводит к более равномерному распределению образования дефектов и увеличению общего числа актов формирующихся повреждений, что приводит к увеличению суммарной АЭ. При растяжении отмечается уменьшение масштаба повреждений матрицы, а при изгибе – увеличение количества дефектов адгезии, таких как расслоения и отклеивания волокон. Перераспределение дефектов, как источников повреждений, приводит к снижению максимального напряжения разрушения.

Обнаруженные в результате микроскопических исследований повреждения испытанных образцов соответствуют идентифицированным с помощью метода АЭ повреждениям структуры стеклопластика. В условиях статического растяжения в поверхностных слоях (рисунок 8, а) обнаружены внутрислойные повреждения в пучках волокон ткани, расслоения, микроповреждения смешанной природы. Во внутренних слоях (рисунок 8, б) наблюдаются внутрислойные повреждения в пучках волокон, расслоения и межслойные трещины.

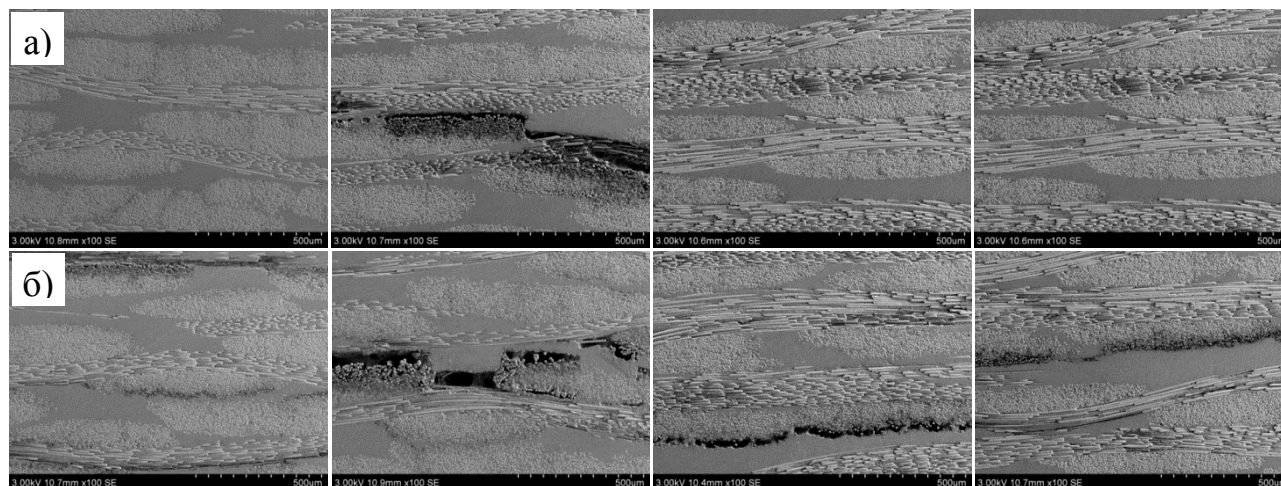


Рисунок 8 – Повреждения при статическом растяжении: а – поверхностных слоев; б – внутренних слоев

В условиях статического изгиба в верхних слоях (рисунок 9, а) отмечено отклеивание волокон из-за сжимающего деформирования матрицы, расслоения, излома волокон сжимающей нагрузкой. В нижних слоях (рисунок 9, б) наблюдается утонение волокон от растяжения и их отклеивание, расслоения с отклеиванием волокон, повреждение структуры пучков волокон основы ткани.

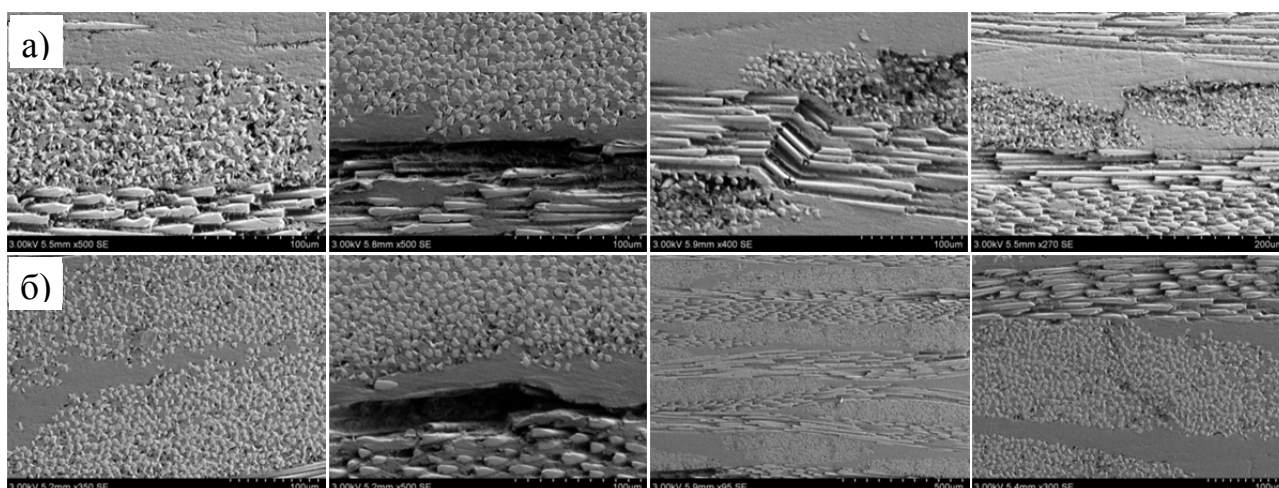


Рисунок 9 – Повреждение при изгибе: а – верхних слоев; б – нижних слоев

Результаты микроскопических исследований согласуются с теорией разрушения многослойных пластиков растяжением и изгибом соответствуют типам идентифицированных повреждений с использованием метода АЭ.

В результате обработки сигналов АЭ, полученных при испытании термически состаренных образцов стеклопластика, было получено 11 кластеров, центроиды которых представлены на рисунке 10, а количество сигналов в каждом кластере – на рисунке 11.

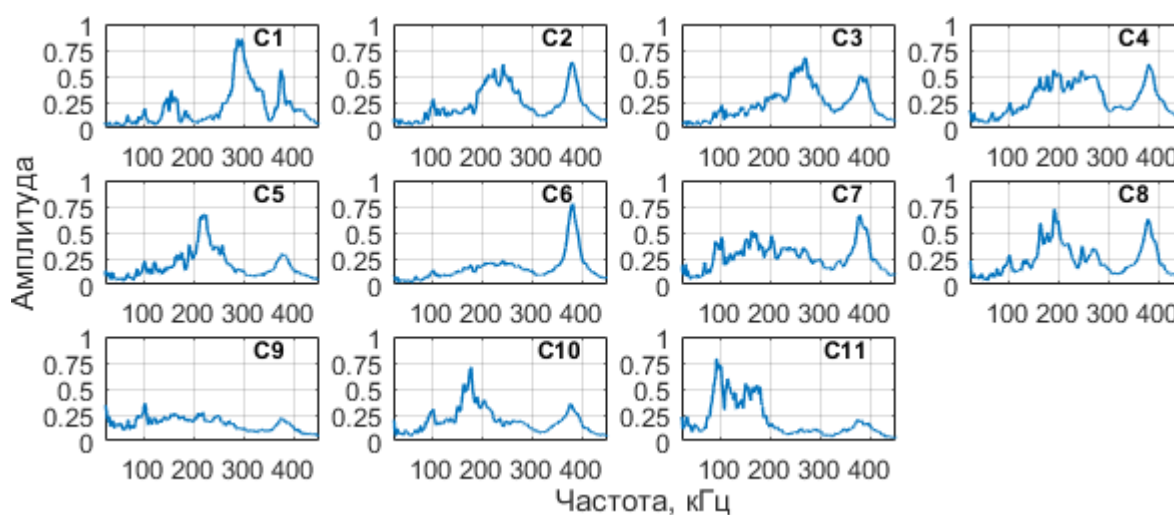


Рисунок 10 – Типовые спектры центроидов полученных кластеров C1 – C11

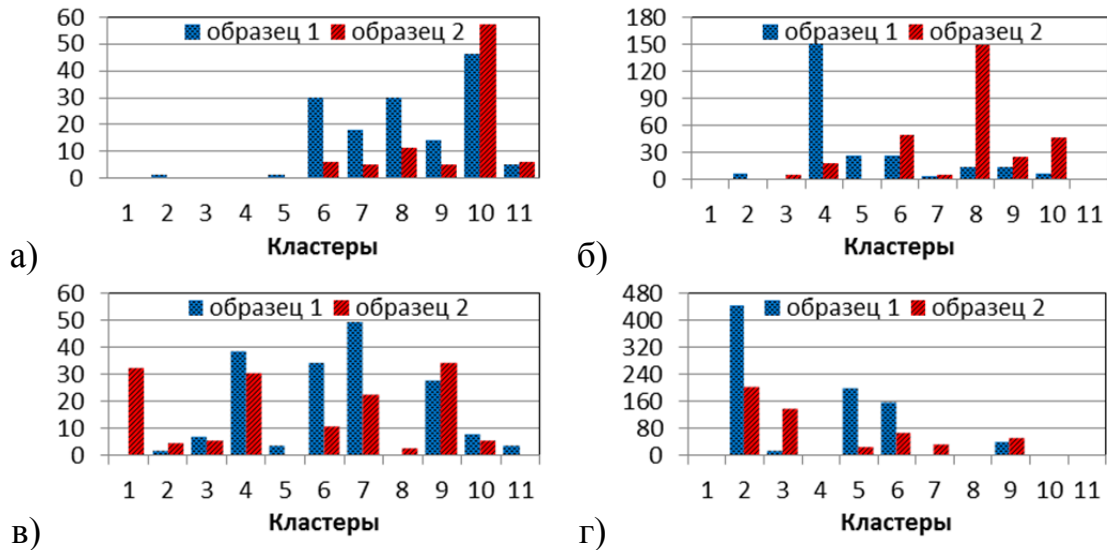


Рисунок 11 – Количество сигналов в каждом кластере при испытании образцов, выдержанных при температуре: а – 60 °С; б – 100 °С; в – 120 °С; г – 200 °С

С применением методики двухстадийной кластеризации выявлено отсутствие деградации матрицы у образцов, выдержанных при температуре 60 °С. При температуре выдержки 100 °С отмечена незначительная деградация матрицы. Выдержка при 120 °С приводит большому числу повреждений смешанной природы, а при 200 °С – к снижению способности матрицы распределять напряжения на армирующие волокна. Данные выводы подтверждаются результатами микроскопических исследований (рисунок 12).

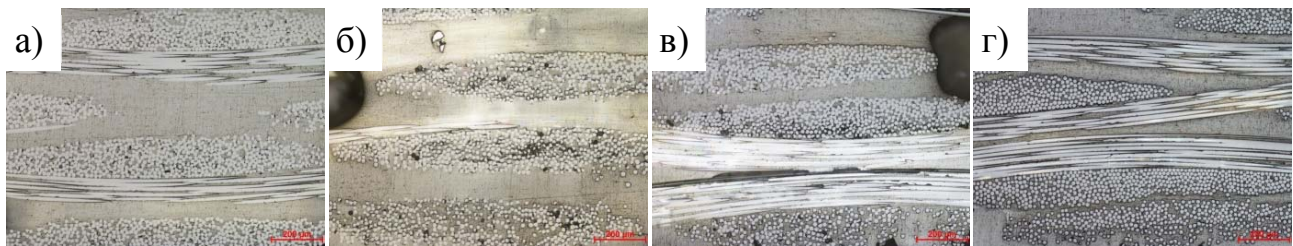


Рисунок 12 – Структура образцов в области разрушения: а – 60 °С; б – 100 °С; в – 120 °С; г – 200 °С

В условиях воздействия высокой температуры негативное воздействие в большей степени оказывается на матрицу ПКМ. При выдержке в условиях повышения температуры до 100 °С деградация матрицы проявляется за счет увеличения микроповреждений полимерной матрицы. Однако в условиях выдержки при температурах свыше 120 °С значительно увеличиваться доля повреждений по типу нарушения адгезии между матрицей и армирующим материалом, вызывая снижение прочности полимерной матрицы и её неспособности к эффективному распределению внутренних напряжений по объёму ПКМ.

В четвертой главе представлены результаты исследования процесса накопления повреждений в условиях циклического растяжения образца

стеклопластика. С использованием ранее разработанной методики двухстадийной кластеризации и установленные пиковыми частотами для различных типов повреждений получены и идентифицированы 18 кластеров регистрируемых повреждений.

При анализе интенсивного накопления кластеров (рисунок 13) в первую очередь были выделены только стадии повреждений матрицы масштаба 1 и стекловолокон, которые были границами стадий.

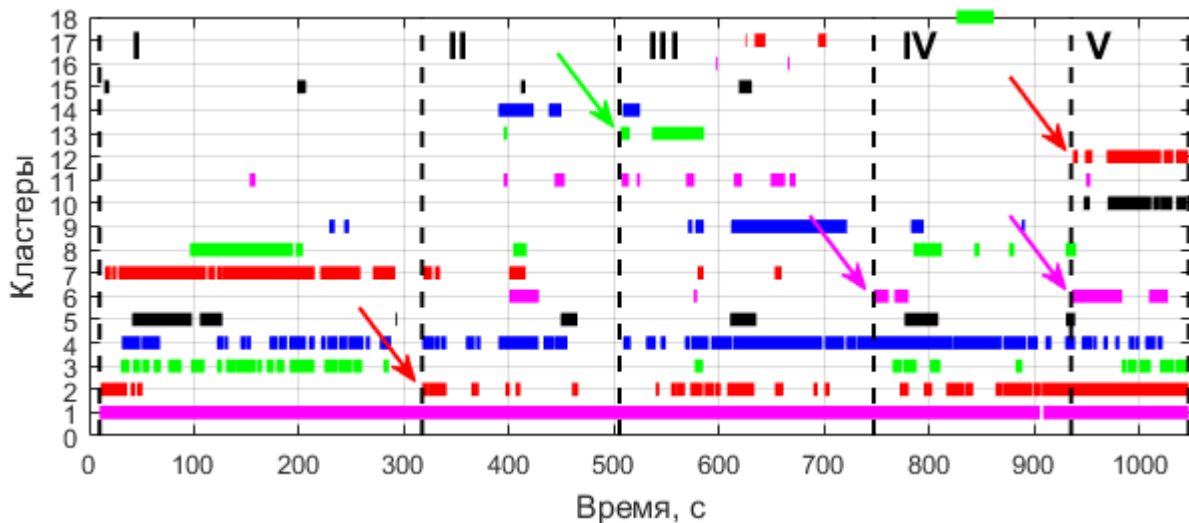


Рисунок 13 – Периоды активного накопления кластеров

Весь период циклических испытаний образцов до разрушения был разделен на 5 стадий:

I) Повреждения матрицы масштабом не больше 2. Повреждения волокон в начале стадии вызвано захватами испытательной машины.

II) Комбинированные повреждения матрицы с волокнами, инициируется межслоевая трещина, которая приводит к повреждениям матрицы масштаба 3 и к более сложному и интенсивному повреждению волокон.

III) Образование комбинированных повреждений матрицы и волокон, дальнейший рост межслоевой трещины. С середины стадии начинают периодически образуются критические повреждения матрицы, существенно растёт интенсивность образования ее повреждений масштаба 3.

IV) Процесс образования комбинированных повреждений матрицы и волокон становится более однородным и сопровождается периодической регистрацией смешанных повреждений материала.

V) Наблюдаются смешанные повреждения материала, повреждения полимерной матрицы масштабами 1 и 2, с преобладанием масштаба 2.

Инициация разрушения стеклопластика начинается с повреждений матрицы, приводящих к нарушению адгезии как между связующим и наполнителем, так и между слоями ПКМ. Нарушение структуры материала переходит в хаотический процесс, заканчивающийся изломом основной части волокон и крупномасштабными повреждениями матрицы вплоть до

разрушения материала в целом. Достижение образцами исследуемого ПКМ стадии, предшествующей стадии разрешения, может быть выявлено по локальному образованию микроповреждений матрицы и излому части волокон. Дальнейший рост повреждений в виде нарушения адгезии, может свидетельствовать о начале разрушения материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены стадии накопления повреждений в стеклопластиках, характеризующие их масштаб и природу в условиях деформирования статическим изгибом и растяжением и в условиях циклического растяжения с использованием параметров сигналов АЭ.

2. Дана оценка характера разрушения стеклопластиков по информативным параметрам регистрируемых сигналов АЭ. Установлено, что для эффективного выявления степени поврежденности стеклопластиков требуется использование комплекса параметров, позволяющих выделять стадии накопления повреждений в ПКМ, находящихся в различном структурном состоянии. Для эффективного выявления типов повреждений использовались частотные спектры сигналов АЭ, была предложена и апробирована методика двухстадийной кластеризации на основе самоорганизующейся карты Кохонена, позволяющая формировать группы сигналов АЭ по типам источников разрушения полимерной матрицы и армирующих волокон.

Исследования показали эффективность применения методики идентификации и анализа стадийности разрушения стеклопластиков для оценки накопления повреждений в условиях действия различных видов нагружения.

3. Установлено, что скорость деформирования стеклопластиков оказывает влияние на масштаб повреждений, образующихся в полимерной матрице. В случае испытаний на трехточечный изгиб, снижение скорости нагружения в 10 раз привело к увеличению отношения текущего напряжения к разрушающему с 85 % до 94 %, которое характеризует стадию начала глобальных разрушений в стеклопластике. В условиях статического растяжения стадия активного разрушения стеклопластика наступала при напряжении, равном 70 % от разрушающего.

4. Выявлено влияние термоокислительного старения на кинетику накопления повреждений и разрушения ПКМ. Установлено, что термическая деструкция матрицы в большей степени сосредоточена на границе фаз с пучками волокон. Увеличение температуры воздействия приводит к увеличению числа регистрируемых сигналов АЭ, излучаемых в результате повреждения полимерной матрицы и выскальзывания волокон. При увеличении температуры выдержки до 100 °С установлено преобладание процесса разрушения по типу образования расслоений, увеличение температуры выдержки до 200 °С привело к разрушению матрицы в виде микроповреждений и высокой интенсивности разрушения стекловолокон.

5. Установлено, что циклическое нагружение характеризуется более сложным процессом дефектообразования и отличается большим числом стадий накопления повреждений и разрушения, в отличие от статического нагружения стеклопластиков. Начальные стадии накопления усталостных повреждений при циклическом нагружении в значительной мере характеризуются повреждениями полимерной матрицы стеклопластика. К середине периода циклической долговечности начинает преобладать процесс межслоевых повреждений и образования расслоений. Стадия циклической усталости, предшествующая разрушению, характеризуется накоплением микроповреждений полимерной матрицы с комплексным разрушением волокон. При нагрузке, равной 60 % от разрушающей, зарождение межслоевой трещины зарегистрировано при достижении 48 % от периода циклической долговечности. Наступление стадии смешанных повреждений стеклопластика, предшествующей стадии разрушения, зарегистрировано при достижении 70 % от периода циклической долговечности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Брянский, А. А. Идентификация источников акустической эмиссии в полимерном композиционном материале в условиях циклического растяжения / А. А. Брянский, О. В. Башков // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2021. – № 3. – С. 19 – 27.

2. Брянский, А. А. Исследование термоокислительного старения ПКМ с использованием метода акустической эмиссии / А. А. Брянский, О. В. Башков, Д. П. Малышева // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2021. – Т. 26. – № 3. – С. 155 – 168.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных *Web of Science/Scopus*:

3. Bashkov, O. V. Diagnostics of glass fiber reinforced polymers and comparative analysis of their fabrication techniques with the use of acoustic emission / O. V. Bashkov, A. A. Bryansky, S. V. Panin, V. I. Zaikov // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing. – 2016. – Т. 1783. – № 1. – С. 020012.

4. Bashkov, O. V. Diagnostics of polymer composite materials and analysis of their production technology by using the method of acoustic emission / O. V. Bashkov, A. E. Protsenko, A. A. Bryanskii, R. V. Romashko // Mechanics of Composite Materials. – 2017. – Т. 53. – № 4. – С. 533 – 540.

5. Bashkov O. V. Investigation of the Stages of Damage Accumulation in Polymer Composite Materials / O. V. Bashkov, A. A. Bryansky, I. V. Belova, D. B. Solovev // Materials Science Forum. – 2019. – Т. 945. – № 1. – С. 515 – 522

6. Bashkov, O. V. Bearing capacity of polymer composite materials determination by parameters of registered acoustic emission / O. V. Bashkov, A. A.

Bryansky, O. G. Shakirova // *Materials Today: Proceedings.* – 2019. – Т. 19. – С. 2434 – 2437.

7. Bryansky A. A. PCM Bearing Capacity Prediction Criteria Development Based on Registered AE Parameters / A. A. Bryansky, O. V. Bashkov, I. O. Bashkov, D. B. Solovev // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* – IOP Publishing. – 2020. – Т. 459. – № 6. – С. 062105.

8. Khon, H. Failure Analysis of Polymer Blinder Using Acoustic Emission Method / H. Khon, O. V. Bashkov, A. A. Bryansky, D. B. Solovev // *Materials Science Forum.* – Trans Tech Publications Ltd. – 2020. – Т. 992. – С. 1030 – 1035.

9. Bryansky, A. A. Investigation of the Staging of Damage Accumulation in Polymer Composite Materials during Bending and Tensile Tests / A. A. Bryansky, O. V. Bashkov, D. P. Malysheva, D. B. Solovev // *Key Engineering Materials.* – Trans Tech Publications Ltd. – 2021. – Т. 887. – С. 116 – 122.

10. Башков, О. В. Идентификация источников акустической эмиссии при циклическом нагружении используемого в кораблестроении полимерного композиционного материала (на английском языке) / О. В. Башков, А. А. Брянский, Т. И. Башкова // *Морские интеллектуальные технологии.* – 2021. – Т. 2 – № 2 – С. 28 – 33.

В прочих изданиях:

11. Башков, О. В. Исследование разрушения полимерных композиционных материалов методом акустической эмиссии / О. В. Башков, А. А. Брянский, Х. Кхун, Ф. Бао // *LVIII Международная конференция "Актуальные проблемы прочности": межд. конф. (Пермь, 16 - 19 мая).* Пермь: ИМСС УрО РАН. – 2017 – С. 167.

12. Брянский, А.А. Акустическая эмиссия в исследовании механизмов разрушения полимерных композиционных материалов / А. А. Брянский, О. В. Башков, Х. Х. Кхун // *Актуальные проблемы акустической эмиссии (АПМАЭ-2018): Всероссийская конф. с междунар. участием (Тольятти, 28 мая–1 июня 2018г.).* – Тольяттинский государственный университет. – 2018. – С. 97.

13. Брянский, А.А. Кластеризация сигналов акустической эмиссии при анализе кинетики накопления повреждений в полимерном композиционном материале / А. А. Брянский, О. В. Башков // *Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии»(АПМАЭ-2021).* – 2021. – С. 124 – 125.

Патентные документы:

14. Пат. 2737235 Российская Федерация, МПК C1G01N 29/14. Способ идентификации источников акустической эмиссии / О. В. Башков, Кхун Хан Хту Аунг, И. О. Башков, А. А. Брянский: заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» – № 2020115070; заявл. 26.03.2020 опубл. 26.11.2020, Бюл. № 33. – 14 с.

Брянский Антон Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И
РАЗРУШЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ АКУСТИЧЕСКОЙ
ЭМИССИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __.04.2022.
Формат 60 x 84 1/16. Бумага 80 г/м². Ризограф EZ570E.
Усл. печ. л. __. Уч.-изд. л. __. Тираж __ экз.

Полиграфическая лаборатория Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.