

Лунегова Екатерина Михайловна

**АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ
ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ
И КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ
НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: **Вильдеман Валерий Эрвинович**,
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Полилов Александр Николаевич**,
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего лабораторией безопасности и прочности композитных конструкций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (г. Москва)

Пантелеев Иван Алексеевич,
кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Цифровизации горнотехнических процессов «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (г. Пермь)

Ведущая организация: ФГБУН Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, (г. Екатеринбург)

Защита состоится «22» декабря 2021 года в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 99.0.067.02 (Д 999.211.02), созданного на базе ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, по адресу: 614990, г. Пермь, пр-т Комсомольский д.29, ауд. 423 б.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат разослан «___» октября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

/ А.Г. Щербинин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования.

В настоящее время наблюдается широкое использование композиционных материалов при создании ответственных конструкций авиационной и космической отрасли. Углеродные слоисто-волоконистые и пространственно-армированные композиционные материалы на основе полимерной матрицы (УКМ) при этом являются весьма перспективными ввиду сочетаний таких преимуществ, как легкий вес, высокие прочность и жесткость, возможность создания изделий сложной геометрии. Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) помимо этого могут быть использованы при создании несущих элементов, эксплуатируемых при высоких температурах. Для улучшения термомеханических характеристик конструкций из УУКМ и увеличения их срока службы, используют керамические теплозащитные покрытия.

Описание процессов деформирования и разрушения дает информацию о закономерностях накопления повреждений и формировании условий разрушения композита, что в свою очередь имеет большое значение при проектировании ответственных конструкций. Разрушение волоконистых композитов является сложным многостадийным процессом, который начинается задолго до окончательного разрушения, поэтому при исследовании процессов накопления повреждений в материале зачастую интересен не только момент макроразрушения образцов, но и момент инициации дефекта на начальном этапе нагружения.

В связи с этим требуется комплексное изучение механического поведения данных материалов с использованием современных методов экспериментальной механики для анализа прочности, количественной и качественной оценки условий катастрофического разрушения и контроля опасных состояний конструкций, что является необходимым для обеспечения безопасности, требуемого ресурса, надежности и живучести. Кроме того, актуальными представляются вопросы установления связи технологических параметров производства изделий с характером накопления повреждений в них при эксплуатации.

Развитие современных методов экспериментальной механики, в том числе с использованием диагностирующих систем для мониторинга состояния испытываемых объектов, позволяет получить новые данные о кинетике накопления повреждений в материалах. В ряду данных методов можно выделить метод акустической эмиссии, который позволяет оценить интенсивность накопления повреждений, установить связь с механизмами структурного разрушения композитов, позволяет получать дополнительную ценную информацию о поведении материалов под действием нагрузки в режиме реального времени.

Таким образом, к числу **актуальных задач** механики деформируемого твердого тела, в частности экспериментальной механики, относится изучение и описание процессов накопления повреждений, возникающих при испытаниях современных углеродных композиционных материалов и теплозащитных покрытий, на основе перспективного и развивающегося метода регистрации и анализа сигналов акустической эмиссии.

Вопросы теоретического и экспериментального изучения закономерностей накопления повреждений и формирования условий макроразрушения в композиционных материалах описаны в работах Тамужа В.П., Куксенко В.С., Соколкина Ю.В., Ташкинова А.А., Васильева В.В., Фитцера Э., Лурье С.А., Тарнопольского Ю.М., Сапожникова С.Б., Ломакина Е.В., Полилова А.Н., Вильдемана В.Э., Аношкина А.Н. и др. Изучение процессов накопления повреждений методом акустической эмиссии отражено в работах авторов Mehan R.L. Mullin J.V., Stephens R.B., Pollock A.A., Liptai R.G., Bentahar M., Robinson E.Y., Rotem. A., Liu P.F., Shiwa M., Park J.M., Czigany T., Башкова О.В., Бехера С.А., Виноградова А., Иванова В.И., Ломова С.В., Матвиенко Ю.Г., Носова В.В., Степановой Л.Н., Серьезнова А.Н., Пантелеева И.А. и др. Вопросам установления связи с механизмами структурного повреждения в композиционных материалах по параметрам акустической эмиссии посвящены работы авторов Groot P. J., Gutkin R., Han W.-Q., Peter J.G., Romhany G., Willems F., Benz J., Bonten C., Yousefi J., Bohse J., Bussiba A., Панина С.В. Степановой Л.И., Матвиенко Ю.Г., Иванова В.И., Серьезнова А.Н., Бехера С.А. и др. Вопросы экспериментального изучения процессов накопления повреждений в функциональных керамических покрытиях методом акустической эмиссии описаны в работах авторов Fu L., Kawasaki A., Kucuk A., Ma X.Q., Yang L., Appleby M.P., Park J.-H., Kim J. S., Lee K.-H. и др. Вопросы математической обработки опытных данных при регистрации акустической эмиссии отражены в работах Barre S., Chen O., Godin N., Iwamoto M., Marec A., Giordano M., Groot P.J., Hamstad M.A., Gutkin R. и др.

В то же время создание новых волокнистых композиционных материалов со сложными пространственными схемами армирования и применение новых технологических режимов влечет за собой необходимость решения ряда вопросов, связанных с исследованием закономерностей возникновения и развития дефектных структур, изучения стадийности накопления повреждений, идентификацией механизмов разрушения с использованием современных методов экспериментальной механики.

Цель диссертационной работы.

Получение и анализ экспериментальных данных о закономерностях накопления повреждений в условиях квазистатического деформирования углеродных композиционных материалов и теплозащитных керамических покрытий композитных изделий на основе регистрации и обработки сигналов акустической эмиссии.

Основные задачи исследования.

- Комплексное решение методических вопросов совместного использования испытательных систем и аппаратуры регистрации сигналов акустической эмиссии при механических испытаниях композиционных материалов.
- Исследование возникновения и последующей эволюции повреждений в волокнистых углепластиках с различными пространственными схемами переплетения армирующего каркаса в режиме квазистатического нагружения.
- Изучение влияния технологических режимов производства изделий, в частности температурной обработки тканого наполнителя, на характер накопления

повреждений углеродного композиционного материала в процессе квазистатического нагружения.

- Решение вопросов, связанных с исследованием нарушения целостности теплозащитных керамических покрытий композитных изделий.

Научная новизна работы.

- Разработаны новые методические рекомендации, связанные с совместным использованием испытательных машин и систем регистрации сигналов акустической эмиссии, получены новые опытные данные, свидетельствующие о связи параметров сигнала с основными механизмами накопления повреждений в волокнистых композитах.
- Выявлены новые закономерности процессов деформирования и разрушения углеродных композиционных материалов с различными пространственными схемами армирования, впервые получены результаты комплексного анализа механических характеристик и параметров сигнала акустической эмиссии для различных структур пространственного армирования.
- Получен комплекс новых экспериментальных данных, иллюстрирующий влияние дополнительной высокотемпературной обработки тканого наполнителя на процессы деформирования и разрушения углерод-углеродных композиционных материалов, исследованных на разных технологических этапах производства.
- Разработан и реализован способ идентификации сигналов акустической эмиссии, связанных с разрушением керамического покрытия.
- Получены новые экспериментальные данные, иллюстрирующие зарождение и развитие повреждений в функциональном теплозащитном керамическом покрытии, нанесенном на подложку из углерод-углеродного композита.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в развитии подходов к изучению закономерностей и анализу накопления повреждений и анализа условий разрушения композиционных материалов и керамических теплозащитных покрытий с использованием метода акустической эмиссии.

Результаты исследований используются на предприятии ПАО «ОДК Сатурн» при оценке свойств полимерных композиционных материалов в зависимости от типов переплетения при проектировании деталей из 3D-армированного ПКМ и на предприятии АО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов» при анализе возникновения повреждений в композиционных материалах и керамических покрытиях при деформировании, что подтверждено актами использования результатов НИР. Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» в рамках образовательной программы подготовки магистров по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Достоверность результатов основывается на использовании аттестованного оборудования и поверенных средств измерений в условиях аккредитованной испытательной лаборатории Центр экспериментальной механики ПНИПУ

(аттестат аккредитации № ИЛ-046 Федерального агентства воздушного транспорта (Росавиация)) и подтверждается качественным соответствием полученных результатов данным других авторов для частных случаев нагружения.

Методы диссертационного исследования.

Экспериментальное исследование закономерностей накопления повреждений в слоисто-волоконистых и пространственно-армированных композиционных материалах, а также керамических покрытиях осуществлялось с использованием комплекса современного испытательного оборудования Центра экспериментальной механики ПНИПУ. Изучение механического поведения углеродных композитов и теплозащитных покрытий проводилось с использованием электромеханических испытательных систем Instron 5882 (100 кН) и Instron 5989 (600 кН), сервогидравлической двухосевой (растяжение-сжатие/кручение) испытательной системы Instron 8850 (100 кН/1000 Нм). При проведении экспериментальных исследований использовались методики, согласующиеся с российскими и международными стандартами. Регистрация сигналов акустической эмиссии осуществлялась при помощи системы AMSY-6, Vallen Systeme GmbH. Изучение поверхности изломов опытных образцов проводилось с использованием стереомикроскопа Carl Zeiss Discovery V12. Для сбора экспериментальных данных проводилась синхронизация системы регистрации сигналов акустической эмиссии и блока сбора данных с контроллера испытательной системы.

Положения, выносимые на защиту.

1. Методические рекомендации по совместному использованию испытательных систем и системы регистрации сигналов акустической эмиссии при механических испытаниях композиционных материалов с целью описания процессов зарождения и развития дефектов, а также выявления связи с механизмами повреждения.
2. Комплекс новых экспериментальных данных о возникновении и развитии дефектов в структуре материала в процессе деформирования, полученных на основе регистрации и анализа сигналов акустической эмиссии для образцов пространственно-армированных углепластиков.
3. Результаты комплексного сопоставления механических характеристик и параметров сигнала акустической эмиссии для различных схем пространственного армирования углепластиков.
4. Совокупность новых экспериментальных данных о связи технологических параметров производства с характером накопления повреждений при деформировании рассматриваемых композиционных материалов.
5. Совокупность методических рекомендаций и результаты исследования нарушения целостности теплозащитного керамического покрытия, нанесенного на подложку из композиционного материала, при помощи метода регистрации сигналов акустической эмиссии.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении НИР в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований (№ 16-01-00239 А, № 16-41-590360 р_а, № 17-48-

590096 p_a, № 17-48-590158 p_a, № 18-31-00452 мол_a (руководитель), № 19-31-90148-Аспиранты, 19-41-590005 p_a); Российского научного фонда (№ 18-79-00209, 15-19-00243, 16-19-00069, № 20-79-1023); гранта Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-885.2020.1); по постановлению Правительства РФ №220 от 9 апреля 2010 г.; Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№FSNM-2020-0027).

Результаты исследований использованы также в рамках НИР по заказам предприятий АО «ОДК-Авиадвигатель», АО «УНИИКМ» и ПАО «ОДК-Сатурн».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 8 всероссийских и 9 международных научных конференциях и семинарах: Всероссийская школа-конференция «Математическое моделирование в естественных науках», г. Пермь, Россия (2017-2019 гг.), Зимняя школа по механике сплошных сред, г. Пермь, Россия (2017, 2019 г.), X Всероссийская конференция по механике деформируемого твердого тела, г. Самара, Россия (2017 г.), Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации», г. Пермь, Россия (2017-2019 гг.), XII Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург, Россия (2018 г.), 22-я Европейская конференции по разрушению (ECF22), г. Белград, Сербия (2018 г.), Международная научно-техническая молодежная конференция «Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения», г. Томск, Россия (2018-2020 гг.), Международная научно-техническая конференция «Функциональные материалы: прогнозирование свойств и технологии изготовления» (ICFM-2019), г. Пермь, Россия (2019 г.), 25-й Международная конференции «Разрушение и конструкционная прочность» (IGF25), г. Катания, Италия (2019 г.), 3-я Международная конференции по конструкционной прочности (ICSI-2019), г. Фуншал, Португалия (2019 г.), XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Уфа, Россия (2019 г.), XXXI Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения, г. Москва, Россия (2019 г.), XIII Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли, г. Алушта, Россия (2020 г.), Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии» АПМАЭ-2021, г. Санкт-Петербург, Россия, (2021 г.).

В полном объеме диссертация докладывалась и обсуждалась на семинарах Центра экспериментальной механики ПНИПУ, объединенном семинаре кафедры механики композиционных материалов и конструкций ПНИПУ и кафедры экспериментальной механики и конструкционного материаловедения ПНИПУ, кафедры математического моделирования систем и процессов ПНИПУ, Института механики сплошных сред УрО РАН.

Публикации. Результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 42 работах, из них – 8 статей в изданиях, рекомендованных ВАК

[1-8], включая 8 статей, опубликованных в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора. Совместно с научным руководителем выбрано направление исследований, осуществлены постановка научной задачи и составление плана работ. Соискателем лично выполнен анализ методических вопросов экспериментальных исследований, проведены все испытания в части использования системы регистрации сигналов акустической эмиссии, а также математическая обработка полученного массива экспериментальных данных с анализом результатов, установлением и описанием закономерностей накопления повреждений при деформировании исследуемых композитов. Совместно с научным руководителем и соавторами подготовлены и опубликованы статьи в научных журналах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Работа содержит 68 рисунков и 12 таблиц. Общий объем диссертационной работы составляет 143 страницы, библиографический список включает 195 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основная цель и задачи, обоснованы новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость полученных научных результатов. Приведены сведения об апробации работы и краткое содержание всех глав диссертации.

Первая глава носит обзорный характер. Рассмотрено описание основных закономерностей накопления повреждений и формирования условий макроразрушения в слоисто-волоконистых композиционных материалах. Отражено содержание научных публикаций, связанных с изучением процессов накопления повреждений в композиционных материалах и теплозащитных покрытиях методом акустической эмиссии. Отмечена высокая эффективность применения данного метода для изучения эволюции разрушения композитов в процессе механического нагружения.

Во второй главе рассматриваются методические вопросы, связанные с использованием системы регистрации сигналов акустической эмиссии при экспериментальных исследованиях закономерностей накопления повреждений и разрушения волоконистых пространственно-армированных и слоистых композиционных материалов, а также покрытий. Описаны основы метода и основные параметры регистрируемых и обрабатываемых сигналов.

Рассмотрен ряд методических вопросов проведения механических испытаний с одновременной регистрацией сигналов акустической эмиссии, в частности, описан процесс установки и калибровки датчиков, выбора необходимых параметров для регистрации акустической эмиссии. Отмечена необходимость синхронизации с испытательным оборудованием для корректной обработки экспериментальных данных. Описаны способы математической обработки

массивов опытных данных, такие как анализ временных зависимостей параметров сигнала, анализ частотного спектра, кластерный анализ и др. Рассмотрены вопросы идентификации механизмов по параметрам сигналов акустической эмиссии.

Получены результаты опытной отработки методик, подтверждающие возможность использования значений частот спектрального максимума и пиковой амплитуды сигналов акустической эмиссии для интерпретации полученных экспериментальных данных с точки зрения связи с основными механизмами накопления повреждений в композиционных материалах. Отмечается, что более низкие значения амплитуд и частот соответствуют растрескиванию матрицы, высокие значения характеризуют разрывы волокон, а промежуточные связаны с нарушением адгезии между волокном и матрицей и расслоением.

Для анализа экспериментальных данных в данной работе выбраны такие параметры сигнала акустической эмиссии, как пиковая амплитуда, энергетический параметр, частота максимума спектра (характеристика быстрого преобразования Фурье) и количество сигналов.

В третьей главе проводится анализ механического поведения углеродных пространственно-армированных и слоистых пластиков, рассматриваемых для практического применения. Представлены результаты механических испытаний углепластиков на одноосное квазистатическое растяжение плоских образцов и плоских образцов с отверстием со следующими структурами переплетения: *A* – ортогональная, *B* – ортогональная комбинированная, *C* – с попарно межслойным армированием, *D* – с попарно межслойным армированием и продольным слоем, *E* – с попарно межслойным комбинированным армированием, *F* – со сквозным межслойным армированием, *G* – слоистые образцы, *H* – слоистые образцы, усиленные методом прошивки Tufting.

Получены основные механические характеристики, построены диаграммы деформирования, проведен анализ некоторых параметров зарегистрированных сигналов акустической эмиссии. На рисунке 1 пунктирной линией показаны графики зависимости энергетического параметра сигналов, связанного с образованием и развитием дефектов в материале. Отмечено, что рост значений данного параметра наблюдается уже на начальном этапе нагружения, при этом на диаграмме «нагрузка-время» нагрузка растет линейно без срывов и переходов к динамическому разрушению. Также для примера на рисунке 2 представлены функции распределения значений частот спектрального максимума (ЧСМ) сигналов для двух образцов группы с ортогональной схемой переплетения. Наблюдается, что полученные распределения для образцов одного материала имеют схожий характер, значения частот спектрального максимума группируются в 3 диапазона, которые связываются с основными механизмами накопления повреждений в материале.

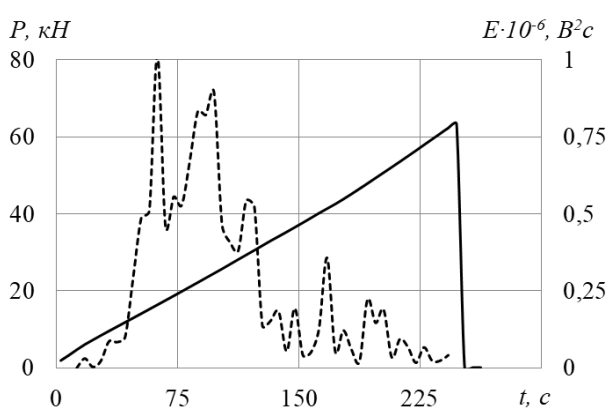


Рис. 1. График зависимости энергетического параметра от времени, совмещенный с диаграммой нагружения для образца группы А

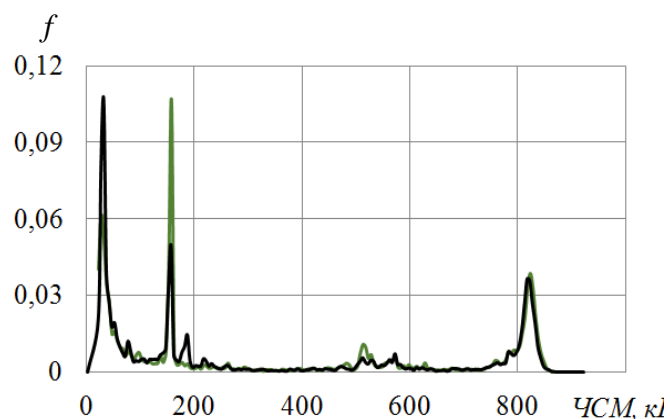


Рис. 2. Функции распределение значений частот спектрального максимума сигналов за все время нагружения для двух образцов группы А

Проиллюстрированы временные зависимости кумулятивной энергии, отражающей скорость образования дефектов в материале, для плоских образцов углепластика (рис. 3, а) и для плоских образцов с отверстием (рис. 3, б). Наблюдается, что некоторые группы углепластиков имеют качественное совпадение по виду полученных распределений. Отмечается, что кривые располагаются выше для слоистых образцов, что свидетельствует о высокой скорости образования повреждений в материале. При этом активный рост значений кумулятивной энергии в слоистых образцах с отверстием начинается позже, чем для образцов с пространственными схемами армирования.

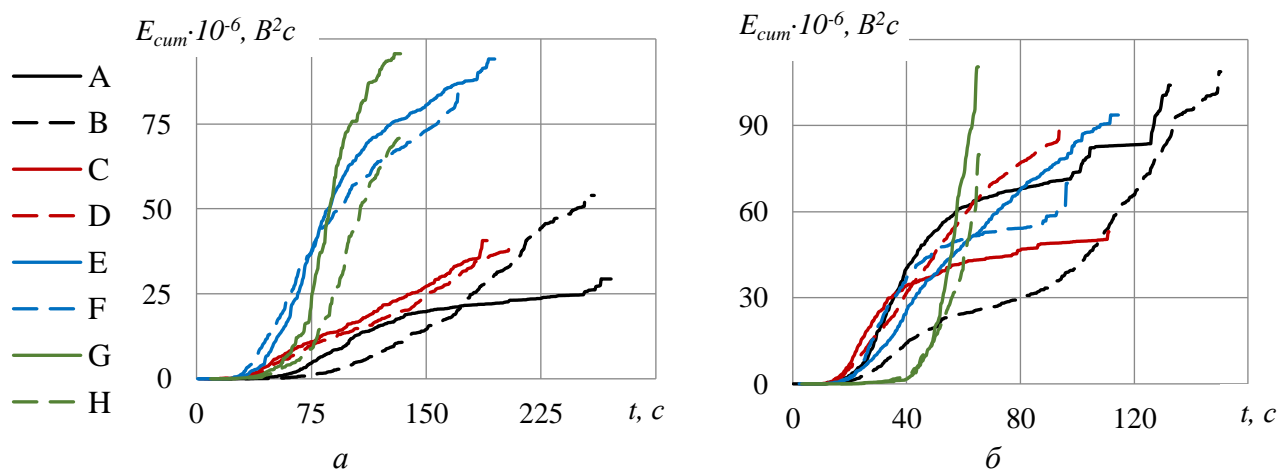


Рис. 3. Типовые диаграммы зависимости кумулятивной энергии от времени при испытаниях на растяжение образцов-полосок (а) и образцов с отверстием (б)

Построены и проанализированы функции распределения значений частот спектрального максимума сигналов за время нагружения для всех групп образцов (рис. 4). Можно отметить, что значения группируются в 3 диапазона. Основываясь на результатах, отраженных в научных работах, можно сделать вывод о наличии механизмов накопления повреждений, таких как растрескивание матрицы (50 – 80 кГц), нарушение адгезии между волокном и матрицей, расслоение (110 – 210 кГц), разрушение волокон (750 – 850 кГц). Каждый из диапазонов

рассмотрен в работе отдельно для более подробного представления о механизмах повреждения, реализуемых в образцах с разной структурой. Также для каждой группы образцов на ранней стадии нагружения определены значения нагрузок, соответствующие первичным образованиям повреждений в углепластике.

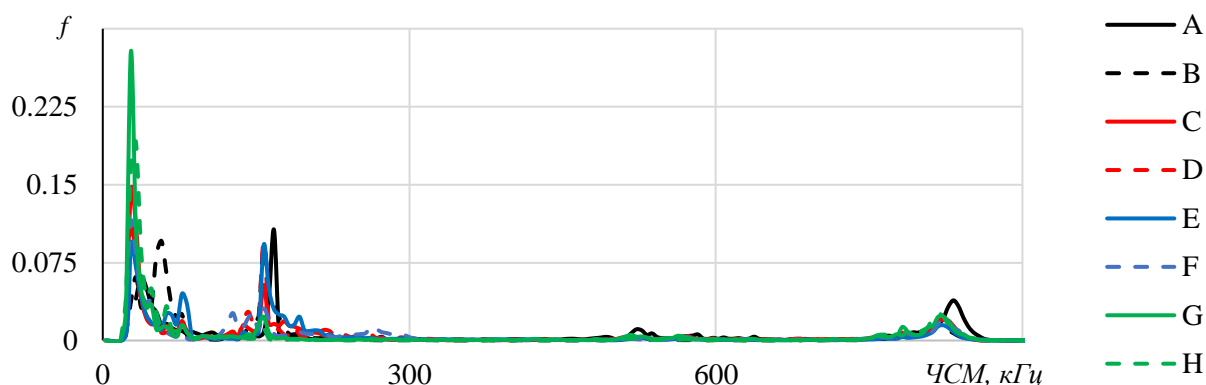


Рис. 4. Функции распределения частот спектрального максимума для всех групп образцов

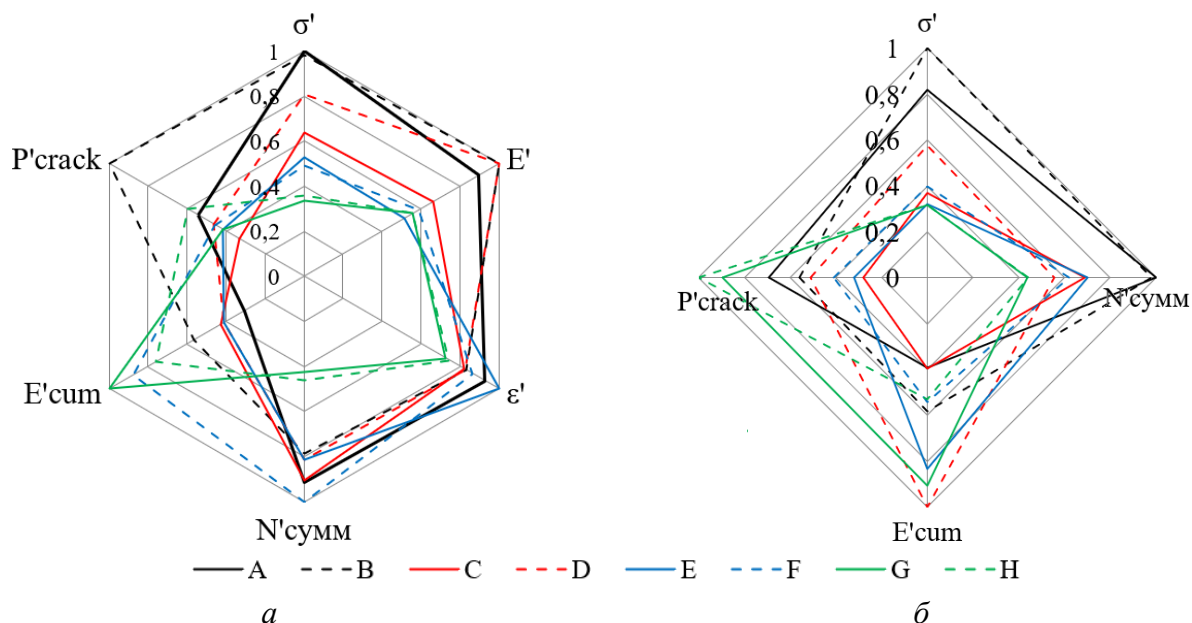


Рис. 5. Лепестковые диаграммы с характеристиками, полученными при испытаниях на одноосное квазистатическое растяжение образцов-полосок (а) и образцов с отверстием (б)

Проведен комплексный анализ механического поведения углепластиков с различными пространственными и слоистыми схемами армирования. Построены и проанализированы лепестковые диаграммы с характеристиками, полученными при испытаниях на одноосное квазистатическое растяжение образцов-полосок (рис. 5, а) и для испытаний на одноосное квазистатическое растяжение плоских образцов с отверстием (рис. 5, б).

Данное представление позволяет анализировать комплекс полученных экспериментальных данных, таких как механические характеристики (прочность на растяжение (σ , МПа), модуль упругости (E , ГПа), деформация при разрушении (ϵ , %)) и характеристики сигнала акустической эмиссии (количество зарегистрированных сигналов за все время испытаний ($N_{\text{сумм}}$, ед.), кумулятивная энергия полная ($E_{\text{сумм}}^{\text{max}}$, В²с)). Кроме того, учитывалась механическая

характеристика, полученная путем анализа начального этапа накопления повреждений с помощью метода АЭ – нагрузка инициации дефекта (P_{crack} , кН). Для удобства анализа данные параметры были проанализированы в относительных единицах. Проведенный комплексный многопараметрический анализ экспериментальных данных является основой выбора типов пространственных структур композитов в зависимости от требуемых условий эксплуатации.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния технологических режимов производства изделий, в частности высокотемпературной обработки тканого наполнителя (ВТО), на характер накопления повреждений углеродного композиционного материала при испытаниях на одноосное квазистатическое растяжение. Рассматривалось два технологических этапа изготовления образцов – это полимеризация «I этап» (образцы УКМ-1 (без ВТО) и УКМ-2 (с ВТО)) и карбонизация «II этап» (образцы УУКМ-1 (без ВТО) и УУКМ-2 (с ВТО)).

Получены основные механические характеристики, построены диаграммы деформирования, проведен анализ некоторых параметров зарегистрированных сигналов акустической эмиссии. На рисунке 6 для примера показаны типовые графики зависимости кумулятивной энергии для образцов двух технологических этапов с высокотемпературной обработкой тканого наполнителя и без. Отмечено отличие в характере накопления повреждений для образцов разных технологических этапов.

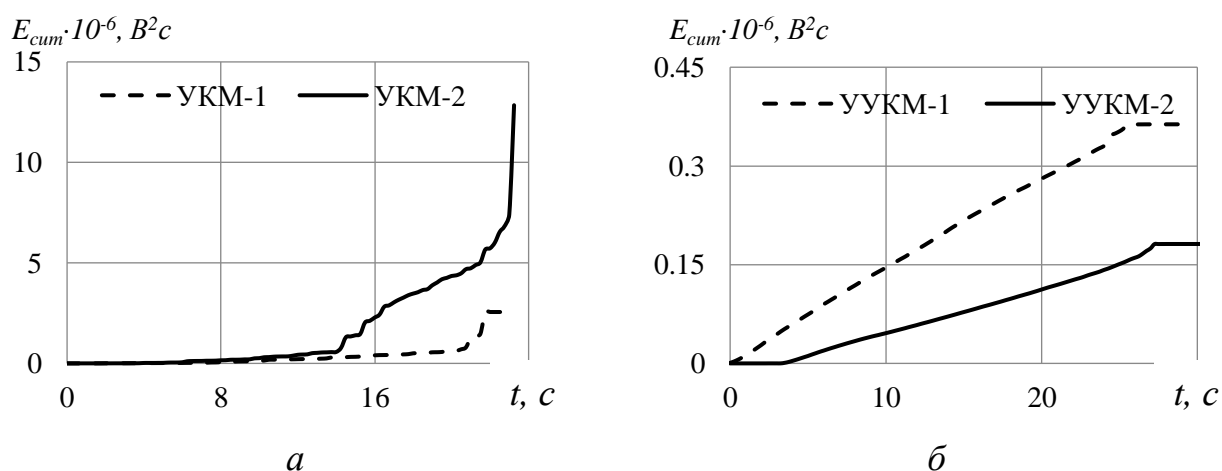


Рис 6. График зависимости кумулятивной энергии от времени для образцов первого технологического этапа (а) и второго (б)

Так при контроле процесса деформирования и разрушения образцов групп УКМ-1 и УКМ-2 первого технологического этапа отмечено, что интенсивный рост значений кумулятивной энергии наблюдается в момент, предшествующий окончательному разрушению образцов. Наоборот, для групп УУКМ-1 и УУКМ-2, рост значений кумулятивной энергии растет постепенно с начала нагружения без резких скачков. Общее значение кумулятивной энергии на первом этапе выше для образцов с ВТО тканого наполнителя в то время, как на втором технологическом этапе общее значение кумулятивной энергии выше для образцов без ВТО.

Также с целью оценки влияния высокотемпературной обработки тканого наполнителя на механическое поведение углеродных образцов построены и

проанализированы функции распределения значений частот спектрального максимума (ЧСМ) сигналов за все время нагружения для обоих технологических этапов. Для примера на рисунке 7 проиллюстрированы данные распределения.

Отмечено, что на первом технологическом этапе для образцов с ВТО регистрируется бóльшее количество сигналов в низком диапазоне частот (20 – 50 кГц), чем для образцов без ВТО каркаса. В среднем диапазоне частот (140 – 170 кГц) наибольшее количество сигналов регистрируется для образцов без ВТО каркаса. На втором технологическом этапе для образцов с ВТО каркаса зарегистрировано бóльшее количество сигналов в среднем диапазоне частот (100 – 170 кГц), чем для образцов с ВТО каркаса. И наоборот, для образцов с ВТО в высоком диапазоне частот (250 – 300 кГц) зарегистрировано большее количество сигналов, чем для образцов с ВТО. Кроме того, следует отметить, что сигналы в высоком диапазоне частот практически отсутствуют на первом технологическом этапе и появляются на втором.

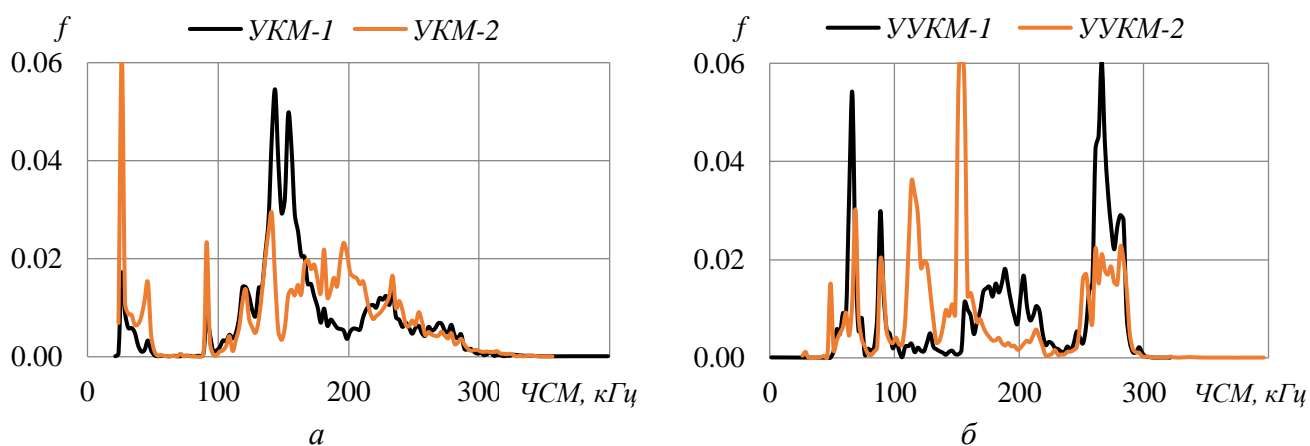


Рис. 7. Функции распределения частот спектрального максимума для образцов на первом технологическом этапе (а) и втором (б)

Таким образом, показано влияние технологической высокотемпературной обработки тканого наполнителя на процессы деформирования и разрушения углеродных композитов. Проведенный анализ частотных распределений, связанных со сменами механизмов повреждения при нагружении, показал, что для образцов с высокотемпературной обработки тканого наполнителя после прохождения карбонизации характерно снижение количества сигналов, связанных с разрушением волокна. Наличие высокотемпературной обработки, в целом, положительно повлияло на механические характеристики материалов, что подтверждено анализом сигналов акустической эмиссии.

Кроме того, проводилось экспериментальное изучение стадийности развития дефектов в образцах УУКМ при испытаниях на одноосное квазистатическое растяжение. По результатам анализа распределения энергетического параметра и амплитуды сигналов акустической эмиссии отмечены и описаны три этапа накопления повреждений. Построены и проанализированы графики зависимости нормированной кумулятивной энергии акустической эмиссии, которая отражает степень накопления дефектов в материале.

Построен и проанализирован график зависимости параметра поврежденности Качанова-Работнова от времени и отмечено, что на ниспадающей ветви диаграммы нагружения наблюдается рост параметра поврежденности, но активный рост значений кумулятивной энергии прекращается. Для примера на рисунке 8 представлена ниспадающая ветвь диаграммы нагружения и график зависимости параметра поврежденности ω для данного участка диаграммы и графики зависимости нормированной кумулятивной энергии для всех сигналов (КЭ'), для сигналов, связанных с разрушением матрицы (КЭ'-м), расслоением (КЭ'-р), разрывом волокон (КЭ'-в).

Отмечено, что кумулятивная энергия, связанная с разрушением матрицы растет на данном участке и коррелирует с графиком параметра поврежденности. Кумулятивная энергия, связанная с нарушением адгезии и разрывами волокон практически не изменяется. Однако активный рост параметра поврежденности и характерные срывы на ниспадающей ветви диаграммы нагружения указывают на наличие разрывов волокон. Следовательно, для данного типа материала необходимы дополнительные исследования с использованием преобразователей в расширенном диапазоне частот.

Пятая глава посвящена анализу процесса деформирования и оценке появления дефектов в теплозащитных керамических покрытиях, нанесенных на подложку из углерод-углеродного композиционного материала, в процессе квазистатических испытаний при нормальных температурах. Решен ряд методических вопросов, связанных с идентификацией сигналов акустической эмиссии, вызванных разрушением керамического покрытия.

Для выявления сигналов акустической эмиссии, регистрируемых при разрушении покрытия при испытаниях на одноосное растяжение, дополнительно проведен ряд механических испытаний на металлических образцах с покрытием и металлических образцах без покрытия. Определены диапазоны значений амплитуд и частот спектрального максимума сигналов, вызванных разрушением покрытия, нанесенного на металлические образцы.

В качестве примера на рисунках 9 и 10 показаны график зависимости кумулятивной энергии (пунктирная линия), совмещенный с диаграммой нагружения и график распределения значений частот спектрального максимума.

Отмечено, что рост кумулятивной энергии во время испытания металлических образцов совпадает с моментом перехода с верхнего предела текучести на нижний (рис. 9, а), а при испытаниях металлических образцов с

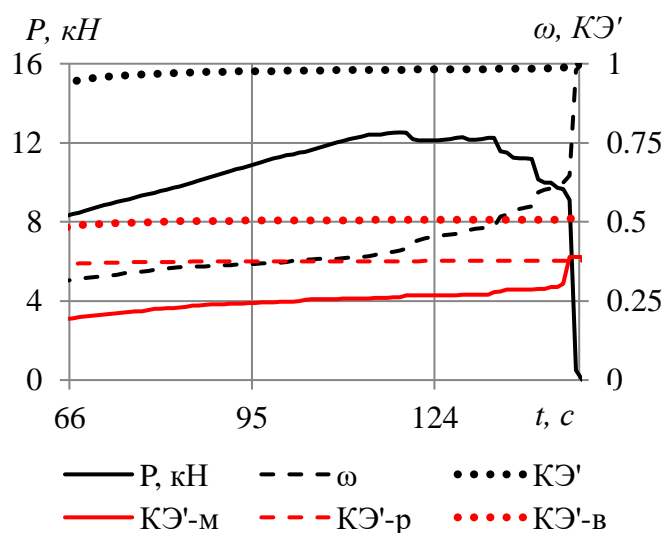


Рис. 8. Диаграмма нагружения и график зависимости параметра поврежденности ω от времени, совмещенные с графиком зависимости кумулятивной энергии от времени.

покрытием начинается с момента времени $t \approx 40$ с (рис. 9, б). В этот момент времени на поверхности образца наблюдается растрескивание и отслоение керамического покрытия. Также следует отметить, что значения кумулятивной энергии при испытании металлических образцов с покрытием выше на 3 порядка.

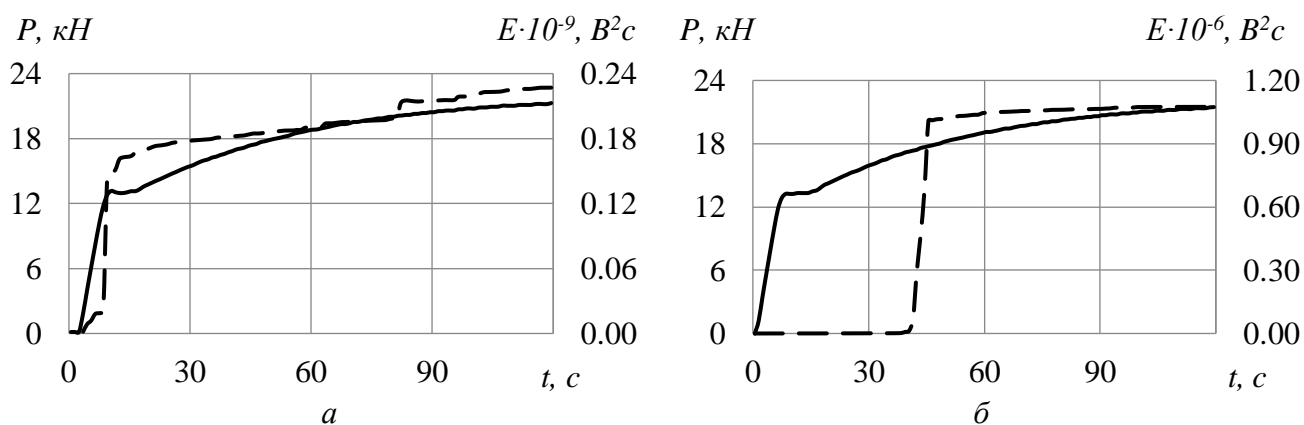


Рис. 9. График зависимости кумулятивной энергии от времени, совмещенный с графиком нагружения для металлического образца (а), и металлического образца с покрытием (б)

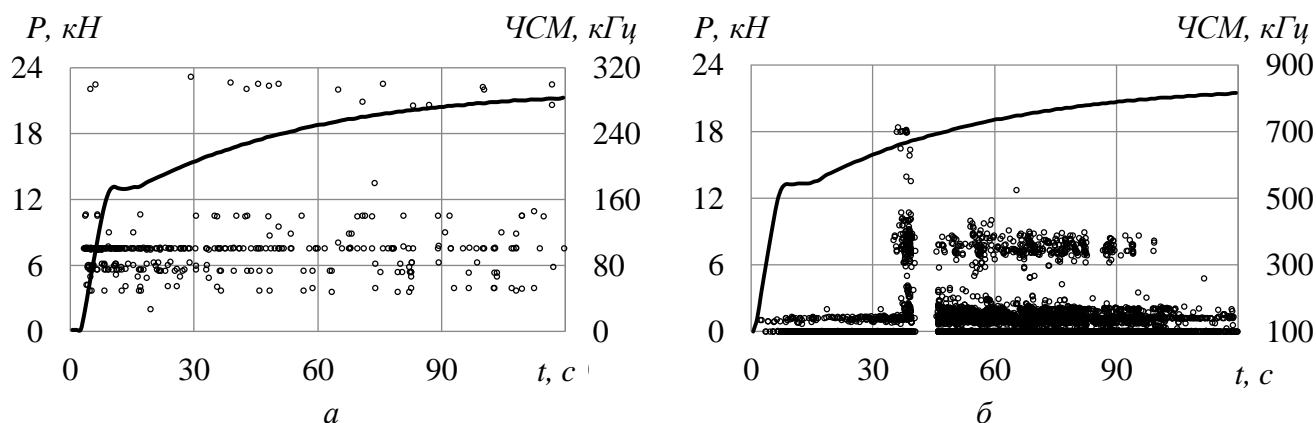


Рис. 10. Распределение значений частот спектрального максимума от времени, совмещенный с графиком нагружения для металлического образца (а) и металлического образца с покрытием (б)

Проанализировано распределение значений частот спектрального максимума для металлических образцов и металлических образцов с нанесенным керамическим покрытием (рис. 10). Отмечено, что увеличение значений частот спектрального максимума также совпадает с моментом начала растрескивания керамического покрытия). Обобщив полученные данные акустико-эмиссионного отклика в процессе нагружения металлических образцов и металлических образцов с керамическим покрытием, сделан вывод о том, что во время разрушения керамического покрытия регистрируются сигналы акустической эмиссии в диапазоне амплитуд 60 – 100 дБ и в диапазоне частот 150 – 200 кГц.

На следующем этапе проводилось экспериментальное изучение возникновения и развития дефектов в покрытии, нанесенном на углеродный композиционный материал, при испытаниях на одноосное растяжение.

На рисунке 11 для примера показана функция распределения значений частот спектрального максимума, где можно выделить 4 диапазона. Данная диаграмма подтверждает наличие сигналов в диапазоне частот 150 – 200 кГц, которые ранее в

работе были определены для идентификации сигналов, вызванных разрушением покрытия на металлах. На рисунке 12 показано распределение энергии всех сигналов акустической эмиссии, принятых на канал, и распределение энергии сигналов с параметрами, выбранными для описания деформирования покрытия.

Регистрация сигналов акустической эмиссии с параметрами, выбранными для исследования возникновения и развития дефектов покрытия, происходит в течение всего испытания равномерно. Каждый пик (рис. 12, б) может означать возникновение трещин на покрытии, которые появляются в процессе нагружения композитного образца. Таким образом, метод акустической эмиссии является эффективным для исследования процесса разрушения керамического покрытия.

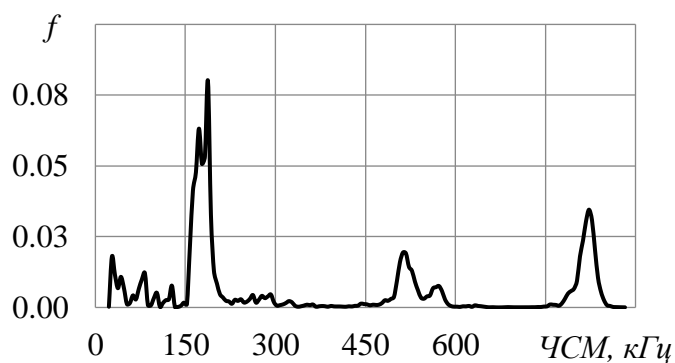


Рис. 11. Функция распределения значений частот спектрального максимума для образца композиционного материала с нанесенным керамическим покрытием

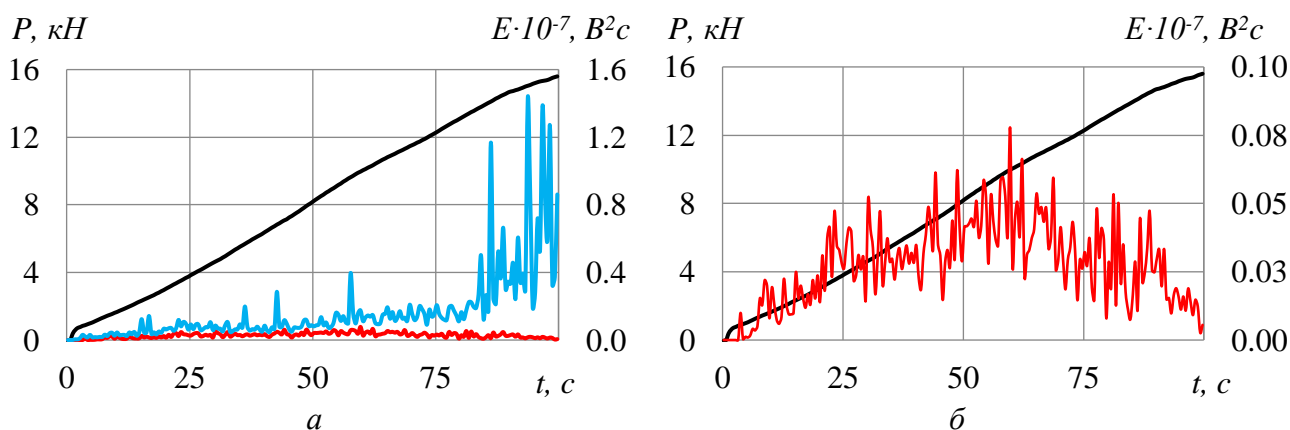


Рис. 12. График распределения энергии от времени, совмещенный с графиком нагружения для всех сигналов (а) и для сигналов с выбранными параметрами (б)

В Заключение представлены основные результаты.

1. Проведен анализ методических вопросов, связанных с использованием системы регистрации сигналов акустической эмиссии при экспериментальных исследованиях волокнистых композиционных материалов и керамических покрытий с целью описания процессов зарождения и развития дефектов. Экспериментально подтверждена возможность установления связи параметров сигнала с основными механизмами накопления повреждений в волокнистых композитах на основе определения характерных диапазонов значений частот и амплитуд сигналов акустической эмиссии.
2. Проведены экспериментальные исследования кинетики накопления повреждений в пространственно-армированных и слоисто-волокнистых углеродных композитах с полимерной матрицей в режиме квазистатического

нагружения. Получены результаты оценки влияния типов армирования на условия зарождения, стадии и механизмы развития дефектов.

3. Проведен комплексный сравнительный анализ механических характеристик и параметров сигналов акустической эмиссии для слоистых углепластиков и материалов с различными схемами пространственного армирования. Представлено обобщенное описание и сравнение групп рассматриваемых композитов с целью рационального выбора схемы армирования материалов, предполагаемых для практического использования.
4. Получены результаты экспериментального исследования влияния дополнительной высокотемпературной обработки тканого каркаса углеродного композита с последующей полимеризацией и карбонизацией на особенности деформирования и разрушения при одноосном квазистатическом растяжении.
5. Решен ряд методических вопросов, связанных с идентификацией сигналов акустической эмиссии, вызванных разрушением керамического покрытия, нанесенного на изделие из углерод-углеродного композиционного материала. Получены результаты экспериментального исследования повреждения при деформировании керамического теплозащитного покрытия в процессе квазистатических испытаний при нормальных температурах.
6. Результаты работы использованы на предприятиях ПАО «ОДК Сатурн», АО «УНИИКМ» и в учебном процессе кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГАОУ ВО «ПНИПУ» в рамках образовательной программы подготовки магистров по направлению 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Основные публикации по теме диссертационной работы

1. Третьякова Т.В., Душко А.Н., Струнгарь Е.М., **Зубова (Лунегова) Е.М.**, Лобанов Д.С. Комплексный анализ механического поведения и процессов разрушения образцов пространственно-армированного углепластика в испытаниях на растяжение // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 173-183. (**ВАК, Scopus**)
2. **Зубова (Лунегова) Е.М.**, Лобанов Д.С., Струнгарь Е.М., Вильдеман В.Э., Лямин Ю.Б. Применение метода акустической эмиссии к исследованию процесса накопления повреждений функционального керамического покрытия // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 38–48. (**ВАК, Scopus**)
3. **Zubova (Lunegova) E.M.**, Tretyakova T.V., Wildemann V.E. Application the acoustic emission technique to investigation of damage initiation in composites // Procedia Structural Integrity. – 2019. – Vol.18. – pp. 843-848 (**Scopus, WoS**).
4. Вильдеман В.Э., Струнгарь Е.М., Лобанов Д.С., **Зубова (Лунегова) Е.М.** Исследование развития технологического дефекта в конструкционном углепластике методами корреляции цифровых изображений и акустической эмиссии в условиях сложнонапряженного состояния // Дефектоскопия. – № 9. – 2019. – С. 3-9. (**ВАК, Scopus, WoS**)

5. **Zubova (Lunegova) E.M.**, Strungar E.M., Lobanov D.S., Wildemann V.E. Experimental study of the damage accumulation in composite materials and ceramic coatings by using of acoustic emission technique // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – Vol. – 17. – pp. 822-827. (**Scopus, WoS**)
6. Lobanov D.S., **Zubova (Lunegova) E.M.** Research of temperature aging effects on mechanical behaviour and properties of composite material by tensile tests with used system of registration acoustic emission signal // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – Vol. – 18. – pp. 347-352. (**Scopus, WoS**)
7. Strungar E.M., Yankin A.S., **Zubova (Lunegova) E.M.**, Babushkin A.V., Dushko A.N. Experimental study of shear properties of 3D woven composite using digital image correlation and acoustic emission // *Acta Mechanica Sinica*, 2019, pp. 448-459. (**Scopus, WoS**)
8. Лобанов Д.С., **Лунегова Е.М.**, Мугатаров А.И. Влияние предварительного температурного старения на остаточную межслоевую прочность и стадийность накопления повреждений в конструкционном углепластике // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2021. – № 1. С. 41–51. (**ВАК, Scopus**)

Статьи в других изданиях и материалах конференций

1. Tretyakova T.V., **Zubova (Lunegova) E.M.** Influence of additional vibration impact on kinetics of strain bands due to the Chernov-Lüders deformation and Portevin-Le Chatelier effect in metals // *Structural Integrity Procedia*. Vol. 13, 2018, pp. 1739-1744.
2. Lobanov D.S., Strungar E.M., Kurbatov Y., **Zubova (Lunegova) E.M.**, Wildemann V.E., Kashevarova G. G. Practical methods for the experimental determination of the mechanical characteristics of cement stone under compression // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 918. – 012107.
3. Lobanov D.S., **Zubova (Lunegova) E.M.** Temperature aging effects on mechanical behavior of structural GFRP on interlaminar shear tests // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 747. – 012119.
4. **Zubova (Lunegova) E.M.**, Lobanov D.S., Strungar E.M., Temerova M.S. Research of the carbon/epoxy laminated curved beams strength in four-point bending test // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. - Vol. 747. – 012139.
5. Tretyakov M.P., Tretyakova T.V., **Zubova (Lunegova) E.M.** Experimental study of the crack growth processes in composite samples // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2216. – 040020.
6. Strungar E. M., Lobanov D. S., **Zubova (Lunegova) E.M.**, Babushkin A.V. Analysis of the mechanical behavior of spatially reinforced composites with open holes // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 953. – 012094.
7. Lobanov D. S., **Zubova (Lunegova) E.M.** Damage accumulation after temperature aging in structural GFRP in interlayer shear tests // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. – 1093. – 012019.