

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 99.0.067.02 (Д 999.211.02),
созданного на базе федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский
политехнический университет» и федерального государственного бюджетного
учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук,
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 22 декабря 2021 г. № 11
о присуждении Лунеговой Екатерине Михайловне, гражданке России,
ученой степени кандидата технических наук

Диссертация «Анализ закономерностей накопления повреждений при деформировании углеродных композитов и керамических покрытий на основе регистрации сигналов акустической эмиссии» по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела принята к защите 22 октября 2021 года (протокол заседания №9) диссертационным советом 99.0.067.02 (Д 999.211.02), созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (614990, г. Пермь, ул. Комсомольский проспект, д. 29) и федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (614990, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13а) на основании приказа Минобрнауки России № 424/нк от 17.04.2018г.

Соискатель, Лунегова Екатерина Михайловна, 1993 года рождения, в 2017 году окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», в 2021 году окончила аспирантуру очной формы обучения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 01.06.01 Математика и механика (период обучения в аспирантуре 01.10.2017-30.06.2021), работает младшим научным сотрудником Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Диссертация выполнена на кафедрах «Механика композиционных материалов и конструкций» и «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор Вильдеман Валерий Эрвинович, заведующий кафедрой «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Официальные оппоненты:

1) Полилов Александр Николаевич, доктор технических наук (01.02.04), 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;

2) Пантелеев Иван Алексеевич, кандидат физико-математических наук (01.02.04), 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,

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург), в своем положительном отзыве, утвержденном директором, доктором технических наук, профессором Швейкиным Владимиром Павловичем и подписанном главным научным сотрудником лаборатории микромеханики материалов, доктором технических наук, профессором Смирновым Сергеем Витальевичем, указала, что диссертационная работа Лунеговой Е.М. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной задачи механики деформируемого твердого тела, связанной с изучением закономерностей накопления повреждений при деформировании композитных материалов и покрытий, диссертационная работа по своему содержанию и научным результатам отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела за исследования процесса деформирования и разрушения углеродных слоисто-волокнистых и пространственно-армированных композиционных материалов на основе полимерной матрицы, углерод-углеродных композиционных материалов и керамических теплозащитных покрытий.

Соискатель имеет 15 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе 8 в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для опубликования результатов диссертационных исследований на соискание ученой степени кандидата наук, из них 8 работ – в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science (общий объем 6,1 п.л., авторских – 3,1 п.л.)

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

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) 11 стр. / 3 стр.

В работе представлены полученные автором результаты экспериментальных исследований механического поведения пространственно-армированных углепластиков, в частности, представлен анализ параметров сигналов акустической эмиссии.

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**) 11 стр. / 8 стр.

В работе представлены результаты автора об экспериментальных исследованиях процесса накопления повреждений функционального керамического покрытия, нанесенного на металлические образцы. Описан способ идентификации сигналов акустической эмиссии, которые вызваны образованием трещин в покрытии.

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. – p. 843-848 (**Scopus, Web of Science**). 6 стр. / 4 стр.

В работе представлены полученные автором результаты экспериментальных исследований процесса накопления повреждений на начальном этапе квазистатического нагружения в полимерных композитах, армированных углеродным волокном.

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 сложнапряженного состояния // Дефектоскопия. — №9. — 2019. — с. 3-9. (**ВАК, Scopus, Web of Science**). 8 стр. / 2 стр.

Представлены полученные автором результаты анализа процессов накопления повреждений при ступенчатом нагружении образца углепластика с заложенным технологическим дефектом. С помощью метода акустической эмиссии удалось выявить момент, при котором произошло межслоевое расслоение в зоне дефекта.

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, Web of Science**) 6 стр. / 4 стр.

В работе представлены полученные автором результаты экспериментального изучения нарушения целостности функционального керамического покрытия, нанесенного на подложку из углерод-углеродного композиционного материала. Приведены полученные диапазоны значений амплитуд и частот спектрального максимума, предположительно связанные с образованием трещин при деформировании покрытия углерод-углеродного композита.

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, Web of Science**) 6 стр. / 2 стр.

В работе представлены полученные автором результаты экспериментальных исследований влияния температурного старения на процессы деформирования и разрушения волокнистого композиционного материала в части изучения процессов накопления повреждений с помощью метода акустической эмиссии.

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, Web of Science**) 12 стр. / 2 стр.

В работе представлены полученные автором результаты экспериментального исследования начального этапа деформирования углеродного композиционного материала с пространственной схемой армирования, полученные с помощью метода акустической эмиссии.

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. (**Scopus, ВАК**) 11 стр. / 3 стр.

В работе представлены полученные автором результаты экспериментального изучения процессов разрушения углеродных композиционных материалов при различных уровнях температурного старения. Отмечена возможность исследования с помощью метода акустической эмиссии влияния режимов температурного старения на смену механизмов накопления повреждений.

На диссертацию и автореферат поступило 10 отзывов, все отзывы положительные: от **Баженова Валентина Георгиевича**, д-ра физ.-мат. наук, проф., главного научного сотрудника лаборатории математического моделирования и идентификации свойств материалов Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского; **Берестовой Светланы Александровны**, д-ра физ.-мат. наук, доц., заведующего кафедрой теоретической механики Института фундаментального образования Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; **Лурье Сергея Альбертовича**, д-ра техн. наук, проф., главного научного сотрудника лаборатории неклассических моделей механики композитных материалов и конструкций Института прикладной механики Российской академии наук; **Радченко Владимира Павловича**, д-ра физ.-мат. наук, проф., заведующего кафедрой «Прикладная математика и информатика» Самарского государственного технического университета; **Сапожникова Сергея Борисовича**, д-ра техн. наук, проф., главного научного сотрудника кафедры «Техническая механика» Политехнического института Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета); **Скрипняка Владимира Альбертовича**, д-ра физ.-мат. наук, проф., заведующего кафедрой механики деформируемого твердого тела Национального исследовательского Томского государственного университета; **Федоренко Алексея Николаевича**, канд. техн. наук, старшего научного сотрудника Центра проектирования, производственных технологий и материалов автономной некоммерческой образовательной организации высшего профессионального образования «Сколковский институт науки и технологий»; **Федулова Бориса Никитовича**, д-ра физ.-мат. наук, профессора кафедры теории пластичности механико-математического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова; **Халиуллина Валентина Илдаровича**, д-ра техн. наук, проф., заведующего кафедрой производства

летательных аппаратов Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н.Туполева - КАИ; **Шляпникова Валерия Николаевича**, д-ра техн. наук, проф., руководителя научного направления «Энергетика» и **Захарова Александра Павловича**, канд. физ.-мат. наук, заведующего лабораторией прочности Федерального исследовательского центра «Казанского научного центра Российской академии наук».

В отзывах отмечено, что диссертация нацелена на решение важной научной и практической задачи развития перспективных диагностирующих систем, в частности, системы регистрации сигналов акустической эмиссии, с целью получения и анализа новых экспериментальных данных о закономерностях накопления повреждений в условиях квазистатического деформирования углеродных композиционных материалов и теплозащитных керамических покрытий композитных изделий.

В отзывах содержатся следующие пожелания, вопросы и замечания: из автореферата неясно, можно ли исследовать накопление повреждений композиционного материала только методом акустической эмиссии без оптического контроля; достаточно ли данных для выводов о нагрузке, при которой происходит зарождение трещин в слоистых образцах; указаны ученые, чьи работы следовало бы добавить в обзор; изменится ли характер накопления повреждений покрытия, если заменить образец на цилиндрический; наблюдалось ли влияние пространственного армирования на изменение механизмов микроразрушения для слоистых и пространственно-армированных композитов; каковы перспективы применения используемых методов для анализа композитов и оценки остаточного ресурса изделий; отсутствует теоретический анализ связи конкретных механизмов микроповреждения композитов с измеряемыми параметрами сигналов, не раскрыта связь этих параметров с макроскопическими критериями прочности композитов; как был определен параметр Качанова-Работнова в эксперименте; каким образом интерпретируется этот параметр применительно к углеродным композиционным материалам; как автор обосновывает использование параметров механики повреждений сплошной среды по отношению к исследованиям механизмов структурного разрушения пространственно-армированных композитов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим: официальные оппоненты являются ведущими специалистами в области механики деформирования твердого тела, имеют публикации по данному направлению в рецензируемых научных изданиях, входящих в международные базы цитирования, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (г. Екатеринбург), хорошо известна своими достижениями в области механики деформируемого твердого тела и экспериментальной механики композиционных материалов, является организатором ежегодной международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций».

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем

исследований:

разработана методика комплексного анализа процесса накопления повреждений, основанная на совместном использовании испытательных машин и систем регистрации сигналов акустической эмиссии, с целью выявления новых закономерностей процессов деформирования и разрушения углеродных композиционных материалов и керамических покрытий;

предложен комплексный подход к анализу механических характеристик и параметров сигнала акустической эмиссии для различных структур пространственного армирования, способ идентификации сигналов акустической эмиссии, связанных с разрушением керамического покрытия;

доказана возможность использования пиковой амплитуды и частоты спектрального максимума сигнала акустической эмиссии для установления связи с основными механизмами накопления повреждений в волокнистых композитах;

получены новые данные о процессах деформирования и разрушения углеродных композиционных материалов с различными пространственными схемами армирования, новые экспериментальные данные о влиянии дополнительной высокотемпературной обработки тканого наполнителя на процессы деформирования углерод-углеродных композиционных материалов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана эффективность использования метода акустической эмиссии в исследованиях кинетики накопления повреждений при деформировании волокнистых композитов и керамических покрытий.

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов)

использованы экспериментальные методы исследования процессов деформирования, возникновения и развития дефектных структур в углеродных композиционных материалах и керамических покрытиях, в частности, метод регистрации и анализа сигналов акустической эмиссии;

раскрыты закономерности накопления повреждений в углеродных композитах, в частности, проанализированы условия зарождения, стадии и механизмы развития дефектов;

изучена связь схем пространственного армирования углепластиков с особенностями их механического поведения;

изучено влияние дополнительной высокотемпературной обработки тканого каркаса углеродного композита с последующей полимеризацией и карбонизацией на особенности деформирования и разрушения композитов;

проведена модернизация существующих методик экспериментальных исследований процессов деформирования композиционных материалов в части совместного использования испытательной системы и системы регистрации сигналов акустической эмиссии, а также способов выявления и идентификации развивающихся дефектов по параметрам сигналов акустической эмиссии.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны методики комплексного анализа закономерностей накопления повреждений композиционных материалов и керамических теплозащитных покрытий с использованием метода акустической эмиссии, которые **внедрены** на предприятии ПАО «ОДК Сатурн» (г. Рыбинск) 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» (г. Пермь) при анализе возникновения повреждений в композиционных материалах и керамических покрытиях при деформировании. Методики использованы в учебном процесс подготовки магистров кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГАОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет;

определены возможности практического использования полученных экспериментальных данных о механическом поведении при деформировании углеродных композиционных материалов с различными структурами пространственного армирования;

разработан способ идентификации сигналов акустической эмиссии, связанных с разрушением керамического покрытия.

Результаты диссертационного исследования Лунеговой Е.М. могут быть использованы на предприятиях авиационной, космической, нефтехимической, машиностроительной, автомобилестроительной промышленности, при проектировании и создании современных композиционных материалов, например, на предприятиях АО «ОДК-Авиадвигатель», ПАО «ОДК-Сатурн», АО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов», ПАО «НПО Искра», АО «Композит», Сколковский институт науки и технологий.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ использовался комплекс аттестованного оборудования и поверенных средств измерений в условиях аккредитованной испытательной лаборатории Центр экспериментальной механики ПНИПУ (аттестат аккредитации № ИЛ-046 Федерального агентства воздушного транспорта (Росавиация));

идея базируется на анализе и обобщении передового опыта в части проведения экспериментальных исследований процессов неупругого деформирования композитов при квазистатических нагружениях;

использованы высокоточные методы регистрации и обработки экспериментальных данных, проведено сравнение полученных результатов с результатами, представленными в ранее выполненных исследованиях по тематике работы;

установлено, что результаты испытаний качественно согласуются с данным других авторов для частных случаев нагружения.

Личный вклад соискателя состоит в анализе методических вопросов экспериментальных исследований, проведении всех испытаний в части использования системы регистрации сигналов акустической эмиссии, а также математической обработки полученного массива экспериментальных данных с анализом результатов, установлении и описании закономерностей накопления повреждений при деформировании исследуемых композитов, подготовке совместно с научным руководителем и соавторами научных публикаций.

Диссертационный совет пришел к выводу что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842: в ней содержится решение задачи механики деформируемого твердого тела, связанной с изучением закономерностей накопления повреждений при деформировании композитных материалов и покрытий, имеющей значение для развития экспериментальных методов исследования формирования условий разрушения композитов.

На заседании 22 декабря 2021 года диссертационный совет принял решение присудить **Луцеговой Екатерине Михайловне** ученую степень *кандидата технических наук*.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 9 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 17, против присуждения ученой степени – нет, не участвовавших в голосовании – нет»

Заместитель председателя
диссертационного совета 99.0.067.02 (Д 999.211.02),
доктор технических наук, профессор

Труфанова Н.М.

Ученый секретарь
диссертационного совета 99.0.067.02 (Д 999.211.02),
доктор технических наук, профессор

Щербинин А.Г.

«24» декабря 2021 г.

