

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., профессора Полилова Александра Николаевича на диссертацию Лунеговой Екатерины Михайловны

«Анализ закономерностей накопления повреждений при деформировании углеродных композитов и керамических покрытий на основе регистрации сигналов акустической эмиссии»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы исследований. Во многих развитых странах и в Российской Федерации происходит постоянное расширение областей применения сравнительно новых волокнистых композитов со слоистой и пространственной структурой армирования, которые используются, в частности, при создании несущих элементов конструкций, работающих в аэрокосмической отрасли при нормальных, криогенных и высоких температурах. Однако комплексных исследований роста поврежденности в таких материалах при различных внешних воздействиях всё ещё явно недостаточно. А для обеспечения требуемого уровня техногенной безопасности, ресурса, живучести композитных конструкций необходимо всестороннее изучение их механического поведения с адекватным описанием процессов деформирования и разрушения. Комплексные исследования композитных материалов возможны лишь с использованием комбинированных методов экспериментальной механики, включающих при механических испытаниях применение акустической, ультразвуковой, тепловой эмиссии и других методов диагностики полей повреждений. Рассматриваемое диссертационное исследование направлено на количественную оценку процессов накопления повреждений в углепластиках, углерод-углеродных композитах и в теплозащитных покрытиях, что позволяет получить информацию о стадиях и механизмах микроструктурного разрушения. Анализ теоретической и практической направленности работы позволяет признать её актуальной в области экспериментальной механики деформируемого твердого тела.

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 диссертации - 143 страницы, библиографический список - 195 источников.

Во **Введении** убедительно доказана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, обоснованы новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава посвящена аналитическому обзору работ, выполненных по сходным направлениям другими авторами. Описаны основные закономерности накопления повреждений при деформировании слоисто-волоконистых композитных материалов. Отмечены возможности метода акустической эмиссии для изучения эволюции разрушения композитов и теплозащитных покрытий в процессе механического нагружения. Сформулированы некоторые нерешенные задачи в данной экспериментальной области.

Во **второй главе** кратко описан метод регистрации сигналов акустической эмиссии и приведены основные характеристики данного метода. Обсуждены методические вопросы проведения механических испытаний волоконистых пространственно-армированных и слоистых композитных материалов, а также функциональных покрытий углерод-углеродных композитов. Важные вопросы связаны с необходимой синхронизацией испытательной и диагностической систем, а также с процессами установки и калибровки датчиков. Изложены наиболее распространенные методы математической обработки экспериментальных данных, такие как анализ: временных зависимостей параметров сигнала, частотного спектра. Уделено должное внимание вопросам идентификации механизмов разрушения по регистрируемым сигналам акустической эмиссии.

В **третьей, центральной главе** представлены результаты механических испытаний пространственно-армированных и слоистых углепластиковых образцов: гладких и со сквозным круговым отверстием. Квазистатическое одноосное растяжение сопровождалось регистрацией сигналов акустической эмиссии. Исследованы особенности акустического отклика при механическом нагружении углепластиков в зависимости от схемы пространственного переплетения волокон. Проведен анализ начального этапа накопления повреждений в композитах и определены значения параметров АЭ, соответствующие образованиям первых повреждений в материалах. Изучены временные зависимости параметров сигналов акустической эмиссии и распределения значений максимума частотного спектра. Приведены результаты комплексного, совместного анализа механических характеристик и параметров сигналов АЭ для образцов из композитов с различными схемами пространственного армирования.

Четвертая глава посвящена оригинальной задаче, ранее глубоко не рассматриваемой, а именно, экспериментальному изучению влияния технологической высокотемпературной обработки углеродного, тканого наполнителя на процессы накопления повреждений при одноосном растяжении. Исследована стадийность развития дефектов в образцах из композитов класса

«углерод-углерод» (УУКМ – С-С). Проведено сопоставление изменения кумулятивной энергии, отражающей уровень накопления повреждений, с графиком роста параметра поврежденности Качанова-Работнова. В этом вопросе соискатель пришла к выводу о необходимости дополнительных исследований с использованием преобразователей АЭ в расширенном диапазоне частот.

Пятая глава посвящена оригинальному исследованию сигналов АЭ в процессе квазистатического деформирования (при комнатной температуре) теплозащитного керамического покрытия, нанесенного на подложку из углерод-углеродного композита. Разработана методика идентификации сигналов акустической эмиссии, связанных с разрушением керамического покрытия, путем сравнения с сигналами при нанесении таких же покрытий на акустически инертную металлическую пластину. Видна перспектива данного метода для изучения нарушения целостности покрытий в процессе эксплуатации.

В Заключение сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Научная новизна заключается в разработке оригинальных методик и в получении на их основе новых экспериментальных данных о влиянии типа пространственного армирования на процессы деформирования и разрушения углепластиков. Получены новые результаты по влиянию технологических режимов высокотемпературной обработки тканого углеродного каркаса композита на характер накопления повреждений. Новыми являются экспериментальные данные по образованию и развитию дефектов в теплозащитном керамическом покрытии углерод-углеродного композита. К элементам научной новизны можно отнести разработанные методические рекомендации по совместному использованию испытательных машин и систем регистрации сигналов акустической эмиссии. Признаки новизны содержат попытки связать параметры сигналов АЭ, такие как частота спектрального максимума, пиковая амплитуда, с механизмами накопления повреждений в композитах, с разрывами волокон, с разрушением матрицы или границ раздела.

Теоретическая и практическая значимость результатов состоит в существенном развитии подходов к изучению процессов накопления повреждений в волокнистых углеродных композитах с различными пространственными схемами армирования. Интересны попытки исследования с помощью АЭ влияния технологических режимов термообработки углеродных тканей на механизмы накопления повреждений в композитах. Можно считать оригинальной и полезной разработанную методику оценки методами акустической эмиссии процессов разрушения керамических теплозащитных покрытий. Важными, в первую очередь, для практического использования, являются полученные результаты комплексного анализа механических

характеристик и параметров сигналов акустической эмиссии для различных структур пространственного армирования. Практическую значимость работы подтверждает использование результатов на предприятии «ОДК Сатурн» для оценки свойств полимерных композитов и в АО «Уральский НИИ композиционных материалов» при анализе возникновения повреждений в композитных материалах и керамических покрытиях. Из представленных документов следует, что материалы диссертации используются в учебном процессе кафедры ФГАОУ ВО «ПНИПУ» в рамках программы подготовки магистров.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций определяется использованием аттестованного оборудования и средств измерений, имеющихся в аккредитованном Центре экспериментальной механики ПНИПУ. Достоверность полученных результатов подтверждается качественным согласованием с данными других авторов для исследованных видов нагружения.

Апробация работы и полнота опубликованных результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях, в частности, - подробно, 17 ноября 2021 г. - на Московском ежемесячном семинаре молодых ученых и студентов (МЕСМУС-139) по проблемам машиноведения имени акад. Ю.Н.Работнова.

Публикации по работе. Содержание и основные результаты диссертации отражены в восьми статьях в журналах, рекомендованных ВАК, включая 8 статей, опубликованных в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

Оформление диссертации. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК, предъявляемыми к кандидатским диссертациям (ГОСТ Р 7.0.11-2011). Материал в целом изложен последовательно, грамотным и понятным научным языком. Автореферат в достаточной мере отражает содержание диссертации.

Замечания по содержанию и оформлению работы. При положительной в целом оценке диссертации необходимо высказать некоторые замечания и пожелания.

1. Ценность с позиций механики твердого тела представляла бы попытка количественно связать данные по интенсивности сигналов акустической эмиссии с параметрами определяющих уравнений и моделей накопления повреждений.
2. Практически все экспериментальные результаты получены при одноосном нагружении. Но в большинстве критически важных элементов конструкций

- возникает сложное напряженное состояние, которое необходимо научиться моделировать при дальнейших исследованиях.
3. Для идентификации регистрируемых сигналов акустической эмиссии целесообразно было провести исследование элементарных актов разрушения компонентов композитов: матрицы, волокон, нитей, тканей, препрегов.
 4. При математической обработке полученных массивов экспериментальных данных не использованы такие перспективные методы, как кластерный анализ, вейвлет-преобразования сигналов акустической эмиссии, которые могут способствовать лучшему пониманию процессов микроразрушения и анализу стадийности накопления повреждений, появлению динамического хаоса в предкритическом состоянии.
 5. При анализе спектра сигналов АЭ для покрытия на металле и на композите следовало пояснить, почему для композитов появляются сигналы из спектра частот, характерных для металла.
 6. В Выводах и во Введении слишком много общих фраз, типа: «создана методика, получены новые данные, выявлены закономерности», но эти утверждения недостаточно конкретизированы. Например, приводится вывод: «Выявлены новые закономерности процессов деформирования и разрушения углеродных композиционных материалов с различными пространственными схемами армирования...», но четкой систематизации таких закономерностей найти не удаётся.
 7. Два пункта из пяти в разделе научной новизны состоят в «получении новых экспериментальных данных», но отнести любые новые данные к научной новизне затруднительно. Вместо большого числа пунктов в Заключение, имеющем вид «отчета о проделанной работе», следовало бы более четко указать, что было ранее неизвестно и что стало понятным после проведения данного исследования.
 8. Имеется также ряд мелких замечаний по оформлению диссертации, но они практически не влияют на положительное восприятие её содержания.

Указанные замечания не затрагивают сути работы, основных выводов и положений, выносимых на защиту, и не отменяют общей положительной оценки диссертации, являясь во многом рекомендациями к дальнейшим исследованиям.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным
«Положением о присуждении ученых степеней».**

Диссертация Лунеговой Екатерины Михайловны «Анализ закономерностей накопления повреждений при деформировании углеродных композитов и

керамических покрытий на основе регистрации сигналов акустической эмиссии», является законченной научно-квалификационной работой и соответствует критериям, установленным в п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. Диссертация соответствует квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК России к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, и ее автор, Лунегова Екатерина Михайловна за разработку акустико-эмиссионных методов изучения разрушения композитных материалов и покрытий заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Доктор технических наук (шифр научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), 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

101000. Москва, Малый Харитоньевский переулок, д.4.
тел.: +7 499 135 34 30; e-mail: polilovan@mail.ru



Полилов Александр Николаевич

Подпись Полилова А.Н. заверяю



*См. приложение по адресу
и см. буфетная*

Я, Полилов Александр Николаевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой Диссертационного совета, и на их дальнейшую обработку.