

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Пантелеева Ивана Алексеевича на диссертационную работу **Лунеговой Екатерины Михайловны «Анализ закономерностей накопления повреждений при деформировании углеродных композиций и керамических покрытий на основе регистрации сигналов акустической эмиссии»**, представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы исследований. На сегодняшний день волокнистые слоистые и пространственно-армированные полимерные композиционные материалы все чаще используются при изготовлении узлов, деталей и ответственных конструкций в аэрокосмической, энергетической и машиностроительной промышленности, эксплуатируемых при нормальных и повышенных температурах. В связи с активным внедрением современных композиционных материалов возникает необходимость разработки новых методов проектирования, совершенствования моделей и алгоритмов прочностных расчетов, а также подходов к аттестации конструкций различного назначения, выполненных из этих материалов. Фундаментом для этого служит изучение механического поведения данного класса материалов, описание процессов их деформирования и разрушения, выявление стадийности накопления повреждений. Комплексное изучение механических и прочностных свойств современных композиционных материалов является необходимым условием для обеспечения безопасности, требуемого ресурса, надежности и живучести. В свою очередь развитие экспериментальных методов и подходов к исследованию механического поведения современных композиционных материалов, в частности метода акустической эмиссии (АЭ), является необходимым условием для успешного расширения границ применения данного класса материалов. Все вышесказанное указывает на **несомненную актуальность выбранной темы диссертационного исследования**, а сама работа вносит дополнительный вклад в развитие методологии акустической эмиссии.

Структура и объем диссертационной 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.

Во введении обоснована актуальность разрабатываемой темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, обоснованы новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость научных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен литературный обзор иностранных и российских публикаций, посвященных исследованию закономерностей накопления повреждений при деформировании волокнистых композиционных материалов и формированию условий их макроразрушения. Отмечена обоснованность использования метода АЭ с целью экспериментального исследования возникновения повреждений в структуре композитов в процессе их механического нагружения. Приведен литературный обзор по работам, направленным на экспериментальное изучение процесса накопления повреждений в функциональных керамических покрытиях методом акустической эмиссии.

Вторая глава посвящена методическим вопросам проведения экспериментальных исследований деформирования волокнистых композиционных материалов при их квазистатическом нагружении с использованием аппаратуры для регистрации акустической эмиссии. Приведено краткое описание метода АЭ, описан процесс регистрации сигналов. Приведены различные методы математической обработки экспериментальных данных, основанные на анализе параметров сигнала во временной и частотной области. Представлены современные экспериментальные данные, подтверждающие связь параметров сигнала АЭ с основными механизмами накопления повреждений в композиционных материалах.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования закономерностей накопления повреждений в пространственно-армированных и слоистых полимерных композиционных материалах на основе углеволокна с использованием метода акустической эмиссии. Необходимо отметить, что представленные в работе типы каркасов углепластиков предложены для использования в реальных конструкциях. Приведены результаты исследования механических свойств полимерных волокнистых композиционных материалов при одноосном квазистатическом растяжении образцов различных структур армирования. Рассмотрены два типа образцов: плоские образцы полоски и образцы с концентратором в виде сквозного отверстия (open hole). Описаны результаты комплексного анализа ряда параметров сигнала АЭ и механических характеристик, полученных для образцов с различными схемами пространственного армирования.

В четвертой главе с помощью метода АЭ проведен анализ влияния технологических режимов производства углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) на процессы деформирования при квазистатическом нагружении. В частности, рассмотрена дополнительная технологическая высокотемпературная обработка тканого каркаса композита. Следует отметить, что испытания были проведены на различных этапах технологического передела

УУКМ: полимеризации и карбонизации. Проанализированы процессы накопления повреждений и разрушения. Представлены результаты исследования стадийности накопления повреждений в образцах УУКМ. Проанализированы кривые распределения кумулятивной энергии (отражающей степень накопления дефектов в структуре материала) интегрально и для различных частотных интервалов, которые соискатель в своей работе связывает с основными видами структурных разрушений. Проведено сопоставление полученных кривых с распределением параметра поврежденности Качанова-Работнова.

Пятая глава посвящена исследованию деформирования теплозащитного керамического покрытия, нанесенного на подложку из углерод-углеродного композита, в процессе квазистатических испытаний при нормальных температурах. Предложена методика идентификации сигналов акустической эмиссии, связанных с разрушением керамического покрытия, которая может служить основой для разработки критерия нарушения его целостности.

Научная новизна результатов работы заключается в получении новых экспериментальных данных о влиянии различных видов пространственного армирования на закономерности процессов деформирования при квазистатическом одноосном деформировании углепластиков. Новыми являются также результаты о влиянии различных технологических режимов и высокотемпературной обработки тканого наполнителя углеродного каркаса композита на характер накопления повреждений. Получены новые экспериментальные данные, описывающие образование и развитие дефектов в теплозащитном керамическом покрытии, нанесенном на подложку из углерод-углеродного композита. Кроме того, к элементам научной новизны можно отнести экспериментальное подтверждение возможности использования параметров сигнала, таких как частота спектрального максимума и пиковая амплитуда, для связи с основными механизмами накопления повреждений в композитах. Важными, в первую очередь для практического использования, являются впервые полученные результаты комплексного анализа механических характеристик и параметров сигнала акустической эмиссии для различных структур пространственного армирования композиционных материалов.

Теоретическая и практическая значимость результатов состоит в развитии подходов к изучению процессов накопления повреждений в волокнистых углеродных композиционных материалах с различными пространственными схемами армирования и изготовленных с использованием различных технологических режимов, а также в исследовании процесса разрушения керамических теплозащитных покрытий с использованием метода акустической эмиссии. В пользу практической значимости работы свидетельствует, что результаты использованы на предприятиях ПАО «ОДК

Сатурн» при оценке свойств полимерных композиционных материалов и АО «Уральский научно-исследовательский институт композиционных материалов» при анализе возникновения повреждений в композиционных материалах и керамических покрытиях (акты использования включены в состав диссертационной работы). Кроме того, материалы диссертации используются в учебном процессе кафедры ФГАОУ ВО «ПНИПУ» в рамках образовательной программы подготовки магистров, что подтверждено актом внедрения.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций основывается на использовании аттестованного оборудования и поверенных средств измерений в условиях аккредитованной испытательной лаборатории Центр экспериментальной механики ПНИПУ, подтверждается качественным соответствием полученных результатов данным других авторов для частных случаев нагружения.

Замечания. По содержанию диссертации могут быть сделаны следующие замечания:

1. Первым положением, выносимым на защиту, являются методические рекомендации по совместному использованию испытательных систем и системы регистрации сигналов акустической эмиссии при механических испытаниях композиционных материалов. При этом в главе 2, посвященной этой теме, рекомендации «размазаны» по тексту, а не сформулированы отдельно в выводах.

2. В параграфе 2.1 (основные понятия, аппаратура и метод акустической эмиссии) приведен список широко используемых параметров сигнала АЭ и их определений, который не соответствует ГОСТ 27655-88 Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения. Там же определение энергии приведено неверно, площадь под огибающей сигнала – это мощность сигнала. Необходимо отметить, что в дальнейшем в тексте диссертации энергетический параметр введен корректно и имеет верную размерность. Там же определение центра тяжести частотного спектра дано весьма неточно. В приведенном определении не понятно, что такое «одинаковость областей частотного спектра выше и ниже центра тяжести».

3. На стр. 36 указано, что недостатком метода b-value является то, что он работает с пиковой амплитудой сигналов АЭ. Это утверждение ошибочно, так как, например, в работах В.Н. Сычева, Л.М. Богомолова, F. Sagasta, M.E. Zitto, M.V.M.S. Rao b-value оценивается для энергий импульсов АЭ. Другое дело, что значение b-value зависит от используемого временного окна, поэтому для экспериментов малой длительности необходимо доказывать достоверность результатов b-value анализа.

4. В параграфе 2.3 (анализ механизмов структурного разрушения) вводится энергетический параметр, являющийся энергией i -го зарегистрированного

импульса АЭ. При этом на рисунке 2.10 и далее в тексте диссертации под этим параметром понимается энергия импульсов АЭ, зарегистрированных в единицу времени (по аналогии с активностью АЭ). Интегрирование этого параметра по времени дает значение кумулятивной энергии АЭ на заданный момент времени. Аналогичная ситуация на рисунке 2.10 с количеством сигналов АЭ.

5. В параграфе 3.1 (исследования механических свойств полимерных волокнистых композиционных материалов при квазистатических испытаниях) приведены оценки модуля Юнга и коэффициента Пуассона для групп образцов из углепластиков с различной схемой армирования на основе анализа полученных экспериментальных данных. Выбранное обозначение модулей указывает на то, что априори образцы с различными схемами армирования считаются изотропным или квазиизотропным материалом. Обоснование принятой гипотезы в тексте диссертации отсутствует.

6. Во всех упомянутых в диссертации экспериментальных исследованиях при регистрации акустической эмиссии использовался цифровой полосовой фильтр 25-850 кГц, при этом в ряде экспериментов для регистрации АЭ применялся широкополосный датчик АЕ105А с частотным диапазоном 450-1150 кГц. Не совсем ясно для чего было игнорировать высокочастотную составляющую сигналов АЭ, тем более что один из интервалов, связанных с механизмом микроразрушения, расположен в диапазоне 750-900 кГц (см., например, рис. 3.12). Необходимо отметить также, что на рисунке 2.3 приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) датчика АЕ105А, ограниченная 500 кГц.

7. Широко известным является влияние на АЧХ импульсов АЭ АЧХ используемых преобразователей акустической эмиссии. Ряд зарубежных команд работают над алгоритмами нивелирования влияния характеристик преобразователей. Закономерно было бы сопоставить выделенные при анализе экспериментальных данных интервалы частот спектрального максимума и локальные максимумы АЧХ используемых в экспериментах преобразователей.

8. Полученные диаграммы зависимости кумулятивной энергии от времени для различных схем армирования (рис. 3.9) помимо выделенных диссертантом особенностей выявили еще один фундаментальный результат, отражающий зависимость характера накопления повреждений в углепластиках от их структуры. Все схемы переплетения можно разделить на два типа: для первого типа характерен линейный рост энергии АЭ с ростом приложенной нагрузки (схемы А, В, С, D), для второго типа – двухстадийный рост (схемы Е, F, G, H) со сменой угла наклона. Этот результат требует внимания при дальнейшем развитии работы, в частности, актуальным вопросом является установление физических причин выявленных различий и определение критической нагрузки для второго типа переплетений, соответствующей точке перегиба.

9. В параграфе 3.2.1 (испытания на одноосное квазистатическое растяжение образцов полосок) вводится оригинальный параметр «нагрузка инициации дефекта», позволяющий оценить момент начала роста поврежденности. Возникает вопрос, не зависит ли величина этого параметра от величины порога дискриминации? В тексте диссертации этот момент никак не освещен.

10. В выводах параграфа 4.2 (исследование стадийности накопления повреждений в углеродных композиционных материалах) указано, что наблюдается несоответствие между кумулятивными кривыми энергии от времени для различных механизмов микроразрушения и зависимостью параметра поврежденности от времени. При этом в качестве основной причины указан недостаточно широкий диапазон использованных преобразователей акустической эмиссии. Этот тезис является дискуссионным и требует дополнительных комментариев, так как диссертант для разделения импульсов АЭ по типу источника использовал единственный частотный параметр. Почему многопараметрический кластерный анализ не является логичным развитием использованного подхода?

11. В параграфе 5.2 (изучение акустико-эмиссионного поведения керамического покрытия при растяжении) указано, что был использован непрерывный (беспороговый) способ регистрации акустической эмиссии. При этом ничего не сказано какой длины делались записи волновых форм акустической эмиссии и для какого временного окна проводилось быстрое преобразование Фурье для оценки частоты спектрального максимума.

12. На рисунке 5.6б в интервале с 40 по 50 секунду наблюдается «затишье» акустической эмиссии. Комментарии на этот счет в тексте отсутствуют.

Представленные замечания не являются принципиальными, а скорее носят дискуссионный характер. Диссертационная работа Лунеговой Е.М. является завершенной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком уровне. Автором диссертационной работы получены результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение задачи, имеющей большое значение в области экспериментальной механики.

Апробация работы и полнота опубликованных результатов. Анализ диссертационной работы показывает, что содержание и структура диссертации находятся в логическом единстве и соответствуют поставленной цели исследования. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК, предъявляемыми к кандидатским диссертациям (ГОСТ Р 7.0.11-2011). Текст автореферата диссертации соответствует ее содержанию. **Выдвигаемые соискателем положения, а также сформулированные выводы достоверны.**

Полученные **результаты апробированы** на научных конференциях Всероссийского и Международного уровня. **Основные положения** и результаты диссертации **полностью отражены** в 8 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК, включая 8 статей, опубликованных в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science. -

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней».

Диссертационная работа **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 п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. Диссертация соответствует квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК России к диссертациям на соискание степени кандидата наук, а ее автор, **Лунегова Екатерина Михайловна**, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Дата 06.12.2021 г.

Официальный оппонент, 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, кандидат физико-математических наук (шифр научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела).

Пантелеев Иван Алексеевич

Подпись Пантелеева И.А.
Ученый секретарь ИМС
к.ф.-м.н.

Юрлова Наталья Алексеевна

