

## УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Института  
машиноведения Уральского отделения  
Российской академии наук  
(ИМАШ УрО РАН),

доктор технических наук, профессор

 Швейкин В.П.

12 2021 г.

## О Т З Ы В

ведущей организации ИМАШ УрО РАН

на диссертационную работу 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

### 1. Актуальность темы выполненного исследования.

Актуальность работы определяется активным внедрением современных углеродных волокнистых композитов при создании ответственных конструкций авиационной отрасли, а также использованием керамических теплозащитных покрытий для улучшения термомеханических свойств элементов конструкций, эксплуатируемых при высоких температурах. В частности, экспериментальное изучение процесса деформирования и разрушения новых композиционных материалов, планируемых к практическому использованию, является одним из необходимых направлений исследований при проектировании конструкций. Использование метода акустической эмиссии (АЭ) при контроле возникновения повреждений позволяет получить дополнительную важную информацию,

необходимую для анализа прочности и оценки условий макроразрушения композитов для контроля опасных состояний конструкций, что является необходимым для обеспечения безопасности, требуемого ресурса, надежности и живучести.

## 2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Сформулированные в диссертационной работе Лунеговой Е. М. положения выводы и рекомендации подтверждаются обширным анализом научной литературы по тематике диссертационной работы на русском и английском языке, большим объемом экспериментальных исследований, проведенных в аккредитованной лаборатории Центр экспериментальной механики ПНИПУ на поверенном средствах измерения и аттестованном оборудовании, отсутствием логических противоречий в содержании исследований и выводами по диссертации, которые соответствуют положениям механики деформируемого твердого тела.

## 3. Научная новизна исследования и полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Важные новые экспериментальные данные о связи параметров сигнала АЭ с основными механизмами накопления повреждений в композиционных материалах получены во второй главе. Экспериментальные исследования поставлены таким образом, чтобы удалось разделить механизмы повреждений в волокнистых композитах. В результате получено подтверждение возможности использования частотных и амплитудных характеристик сигнала АЭ для описания типов повреждений.

Представляют научный интерес результаты исследований процессов образования и развития дефектов в структуре слоистых и пространственно-армированных полимерных композиционных материалов на основе углеволокна, планируемых к практическому применению. Уделено большое внимание комплексному изучению деформирования данного класса композитов. Стоит отметить, что отдельно автором рассмотрен начальный этап нагружения

образцов и получены значения нагрузки, при которых образуются первые дефекты в структуре материала. Представлены результаты анализа процесса накопления повреждений углепластиковых сплошных образцов и образцов с отверстием, в результате чего получены новые экспериментальные данные, иллюстрирующие влияние концентраторов напряжений при деформировании образцов с рассматриваемыми структурами. Показана связь частотных характеристик сигналов АЭ и основных механизмов накопления повреждений в углепластиковых образцах.

Важные новые научные результаты представлены в главе 4 при экспериментальном исследовании процесса накопления повреждений при деформировании волокнистого углеродного композита. Стоит отметить, что исследования проводились на различных технологических этапах изготовления углерод-углеродного композиционного материала. При этом рассматривался и альтернативный технологический этап производства композита в виде дополнительной высокотемпературной обработки тканого наполнителя. В результате было показано влияние термообработки на процессы накопления повреждений и разрушение углеродных композитов. Описана стадийность накопления повреждений по параметрам сигнала АЭ. Построен и проанализирован график поврежденности Качанова-Работнова. Проведено сопоставление полученного графика с распределениями кумулятивной энергии в различных частотных диапазонах.

Заслуживают интерес результаты, представленные в 5 главе, посвященной изучению нарушения целостности функционального керамического покрытия, нанесенного на углерод-углеродный композиционный материал. Автором работы для определения сигналов АЭ, связанных с нарушением целостности функционального керамического покрытия был самостоятельно разработан и реализован новый способ.

#### 4. Значимость результатов для науки.

Значимость полученных научных результатов состоит в развитии экспериментальных подходов к исследованию процессов деформирования и разрушения композитов и керамических теплозащитных покрытий с использованием метода АЭ. Обстоятельно изучены закономерности механического поведения композиционных материалов, с различными пространственными схемами армирования. Подтверждена возможность применения экспериментального метода регистрации сигналов АЭ для определения связи технологических параметров производства композиционных изделий и характера накопления повреждений при деформировании. Разработан и реализован способ с помощью которого удалось идентифицировать сигналы АЭ, возникающие вследствие образования повреждений при деформировании керамического покрытия, нанесенного на подложку из композита.

#### 5. Практическая значимость, полученных автором диссертации результатов.

Получены новые важные результаты, представляющие интерес с точки зрения практического использования, о характере механического поведения перспективных углеродных композиционных материалов авиационного назначения и функциональных керамических покрытий.

Результаты исследований использованы 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».

6. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и заключений.

Используемые в диссертации Лунеговой Е.М. на тему «Анализ закономерностей накопления повреждений при деформировании углеродных композитов и керамических покрытий на основе регистрации сигналов акустической эмиссии» подходы, сформулированные научные положения, выводы и заключения являются обоснованными, не содержат противоречий, соответствуют основным положениям и принципам механики деформируемого твердого тела. Достоверность научных положений 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)), подтверждается качественным соответствием полученных результатов данным других авторов для частных случаев нагружения.

7. Оценка содержания диссертации и автореферата.

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. Материал раскрыт в соответствии с поставленными целями и задачами. Автореферат диссертации правильно и полно отражает ее содержание. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в научной и технической литературе. Публикации в достаточной мере отражают основные научные результаты соискателя.

## 8. Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.1.8. (01.02.04 Механика деформируемого твердого тела): п.1 – законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых; п.4 – механика композиционных и интеллектуальных материалов и конструкций; п.9 – экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях.

## 9. Замечания по содержанию и оформлению работы

1. Задачи диссертационного исследования сформулированы во введении, хотя логично это было сделать по результатам аналитического обзора современных достижений и нерешенных проблем в предметной области проекта, представленной в главе 1.

2. Раздел 2.1, в котором описаны основные понятия, принципы метода акустической эмиссии и аппаратура для его реализации, которая применяется в исследованиях в России и за рубежом, целесообразно было бы поместить в обзорную главу 1.

3. В разделе 5.3 анонсированы исследования разрушения керамического покрытия методом АЭ при растяжении и сжатии, однако фактически приведены данные только результаты исследований, полученных при растяжении. По испытаниям на сжатие данных АЭ не представлено, хотя было бы очень интересно сравнить закономерности изменения характеристик АЭ, виды функции поврежденности по Качанову-Работнову и данные о механизмах разрушения материалов и покрытий в этих случаях.

4. В связи с тем, что связь поврежденности и характеристик АЭ фактически изучалась только при нагружении по схеме одноосного растяжения следовало бы упомянуть это ограничение в научной новизне и выводах по диссертации.

10. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней.

Таким образом, диссертация Лунеговой Екатерины Михайловны на тему: «Анализ закономерностей накопления повреждений при деформировании углеродных композитов и керамических покрытий на основе регистрации сигналов акустической эмиссии» 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, соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой 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.

Отзыв составлен доктором технических наук,  
главным научным сотрудником лаборатории микромеханики материалов  
Смирновым Сергеем Витальевичем

Отзыв рассмотрен и утвержден на научном семинаре отдела физических проблем  
в машиностроении Института машиноведения Уральского отделения  
Российской академии наук

протокол № 250 от «25» ноября 2021 г.

Руководитель семинара

доктор технических наук

117

Смирнов Сергей Витальевич

