

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Струнгарь Елены Михайловны «Неупругое деформирование и разрушение слоисто-волоконистых полимерных композитов в зонах концентрации напряжений»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Актуальность проблемы

В настоящее время слоисто-волоконистые полимерные композиционные материалы широко используются при изготовлении узлов, деталей и конструкций в авиакосмической, энергетической, машиностроительной промышленности. Развитие технологий их изготовления, повышение удельных физико-механических свойств за счет применения новых связующих и армирующих материалов позволяют проектировать из слоистых композиционных материалов ответственные элементы конструкций, в том числе элементы с концентраторами напряжений различной геометрии и высоконагруженные детали. Это в свою очередь приводит к необходимости разработки новых методов проектирования, совершенствования моделей и алгоритмов прочностных расчетов, а также подходов к аттестации конструкций различного назначения, выполненных из композиционных материалов. Развитие современных экспериментальных методов и подходов к определению деформационного поведения композиционных материалов, исследованию пространственно-временных закономерностей эволюции неоднородных деформационных полей в районах концентраторов напряжений и дефектов различного происхождения является необходимым условием для успешного расширения границ применения композиционных материалов. Все вышесказанное указывает на несомненную **актуальность рассматриваемого диссертационного исследования и своевременность его появления.**

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы, содержащего 181 наименование, включая публикации соискателя. Общий объем диссертации составляет 171 страницу, включая 92 рисунка и 19 таблиц.

Во введении обоснована актуальность разрабатываемой темы, сформулирована цель, новизна, научная и практическая значимость работы, апробация работы и основные положения, выносимые на защиту.

В 1-ой главе приведен литературный обзор иностранных и российских публикаций, посвященных результатам изучения закономерностей деформирования и разрушения материалов в условиях наличия неоднородных деформационных полей. Обсуждаются преимущества и недостатки существующих оптических методов механики деформируемого твердого тела, особенности механического поведения композиционных материалов в зонах концентрации напряжений, масштабные эффекты их деформирования.

Вторая глава посвящена описанию методики проведения экспериментов по деформированию образцов из слоисто-волоконистых полимерных композиционных материалов с использованием цифровой оптической системы для трехмерного анализа полей перемещений и деформаций. Приведены математические основы метода корреляции

цифровых изображений, обсуждаются методические вопросы использования метода корреляции цифровых изображений. Приводятся результаты тестовых испытаний образцов полимерных композиционных материалов с использованием цифровой оптической системы, рекомендации по выбору входных параметров метода корреляции цифровых изображений, а также результаты оценки точности измерений деформаций методом корреляции цифровых изображений.

В третьей главе представлены результаты расчетно-экспериментального исследования закономерностей деформирования и разрушения композитных элементов с концентраторами напряжений с использованием программно-вычислительного комплекса и метода корреляции цифровых изображений. Приведены результаты сравнительного анализа диаграмм деформирования, картин полей продольных, поперечных и сдвиговых деформаций, полученных при испытании армированного слоистого стеклопластика СТЭФ. В результате оценки влияния структурных и размерных параметров на характер поведения композитных образцов с концентратором показано, что существует критическое значение структурного параметра неоднородности (отношения диаметра отверстия к размеру характерного структурного элемента). При значениях структурного параметра неоднородности меньше критического (в случае малого диаметра отверстия или крупного плетения) наблюдается масштабный эффект для предельных значений среднего напряжения, при значениях больше критического – масштабный эффект отсутствует. На основе анализа распределений деформаций на поверхности испытываемого образца установлено, что максимум продольной деформации на горизонтальной линии, проходящей через центр отверстия (концентратора), располагается на некотором расстоянии от края отверстия, что вызвано технологическими дефектами, возникшими при его просверливании. Приведены результаты исследования влияния структурных особенностей пространственно-армированных и слоисто-волоконистых углепластиков на характер их неупругого деформирования и разрушения. Определены зависимости предельных прочностных характеристик композитных образцов с отверстиями при одноосном растяжении от типа их армирования. В экспериментах по определению сдвиговых деформационных и прочностных характеристик пространственно-армированных углепластиков показано преимущество использования бесконтактной оптической видеосистемы по сравнению с тензорезисторами, предложены рекомендации по методике использования бесконтактной оптической видеосистемы при испытании образцов композиционных материалов по ASTM D5379.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию влияния дефектов различного типа на остаточную прочность конструкции из композиционных материалов. Приведены результаты квазистатических и усталостных испытаний образца-панели со сквозным дефектом в его центральной части и образца-панели с ремонтной заделкой. Определены условия гарантированного обнаружения начала отслоения ремонтной заплаты на основе анализа локальных полей деформаций и данных инфракрасной термографии. Приведены результаты испытаний образцов композиционных пластин с искусственно внесенными дефектами заданной геометрии и размера на растяжение/сжатие с кручением. Установлено, что использование метода корреляции цифровых изображений позволяет регистрировать не только изменения в полях деформаций на поверхности образцов, но и

оценивать влияние технологических дефектов на интегральные механические и прочностные характеристики пластин с дефектами при сложных траекториях нагружения.

В **пятой главе** рассматриваются основные методические вопросы совместного использования двух независимых измерительных систем неразрушающего контроля – бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D и волоконно-оптических датчиков деформаций на брэгговских решетках. Приводятся результаты сравнительного анализа деформационных данных, полученных обеими системами, и методика нахождения калибровочных коэффициентов для внедрённых в структуру волоконно-оптических датчиков при многократном одноосном растяжении/сжатии композиционных образцов. Приводятся результаты комплексного исследования применимости метода корреляции цифровых изображений для верификации данных, получаемых с помощью волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках при ступенчатом нагружении композиционных материалов с V-образными вырезами и циклических испытаниях композиционных материалов с внутренними дефектами.

Оценка новизны и достоверности

В диссертационной работе установлены новые и подтверждены предсказанные ранее закономерности деформирования и разрушения образцов слоисто-волоконистых композиционных материалов. Впервые показана эффективность использования бесконтактной оптической видеосистемы трехмерного анализа полей перемещений и деформаций, а также метода корреляции цифровых изображений для решения задач волоконно-оптических технологий мониторинга поведения изделий из композиционных материалов. Получены новые экспериментальные данные влияния концентраторов на механическое поведение образцов углепластиков с различными схемами армирования. Получены новые экспериментальные данные о масштабном эффекте прочности слоисто-волоконистых композитов с концентраторами в зависимости от структурных и размерных параметров.

Достоверность полученных результатов диссертационного исследования обеспечивается использованием аттестованного испытательного оборудования, поверенных средств измерений и апробированных методик экспериментальных исследований. Ряд полученных результатов согласуется с данными, опубликованными в российской и зарубежной печати.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в развитии методических основ применения метода корреляции цифровых изображений для определения закономерностей механического поведения композиционных материалов с концентраторами при различных конфигурациях приложенной нагрузки. Отдельную практическую ценность представляют разработанные в рамках диссертации рекомендации по выбору расположения и калибровке внедренных волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках в зависимости от режимов нагружения и геометрии рабочей зоны.

Замечания

По содержанию диссертации могут быть сделаны следующие замечания:

1. Для получения всех без исключения экспериментальных результатов деформационного поведения образцов слоисто-волоконистых полимерных

композитов была использована двухкамерная бесконтактная оптическая видеосистема Vic-3D, позволяющая восстанавливать распределения компонент вектора перемещений и тензора деформаций не только в плоскости, но и компонент, связанных с нормальными к поверхности съемки перемещениями. При этом в диссертационной работе, кроме экспериментов на растяжение с кручением, вместе с распределениями продольных, поперечных и сдвиговых деформаций не приводятся распределения zz , zx и zy компонент тензора деформаций. Хотя именно для композиционных материалов, в отличие от металлов, анализ распределений этих компонент может дать дополнительную информацию о локальных отслоениях и изгибах, вызванных наличием концентраторов напряжений или дефектов различной природы.

2. В работе показано, что при деформировании образца стеклотекстолита СТЭФ с отверстием максимум продольной деформации наблюдается на некотором расстоянии от отверстия, что связывается с влиянием дефектов, образовавшихся в процессе сверления. С другой стороны, при испытании образцов-полосок углепластиков с различными схемами армирования установлено, что смещение максимума продольной деформации наблюдается только для трех типов армирования при определенных уровнях приложенной нагрузки. Причины такого влияния схемы армирования на положение максимума в диссертационной работе не обсуждаются, хотя могут иметь фундаментальный характер в свете нелокальной природы разрушения.
3. Совместное использование встроенных волоконно-оптических датчиков деформации на брэгговских решетках и бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D при многократном растяжении/сжатии образцов композиционных материалов в упругой области показало, что при сжатии удовлетворительное количественное совпадение измеренных деформаций наблюдается до определенного уровня приложенного усилия (Рис. 5.6). Расхождение измеряемых величин, по-видимому, связано с деформацией решетки и нарушением ее геометрии. С точки зрения практического использования волоконно-оптических датчиков уместно было бы в диссертации указать рабочий диапазон сжимающих деформаций, допускающий использование датчиков как независимого измерительного инструмента.

Представленные замечания не являются принципиальными. Диссертационная работа Струнгарь 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 механики деформируемого твердого тела.

Анализ диссертационной работы показывает, что содержание и структура диссертации находятся в логическом единстве и соответствуют поставленной цели исследования. Диссертация хорошо оформлена и легко читается. Текст автореферата

соответствует содержанию диссертации. **Выдвигаемые соискателем положения, а также сформированные выводы достоверны.**

Полученные результаты апробированы на научных конференциях Всероссийского и Международного уровня. **Основные положения** работы полностью **отражены в опубликованных работах**, 10 (десять) из которых опубликованы в журналах, входящих в системы цитирования Web of Science и Scopus.

Заключение

Диссертационная работа **Струнгарь Елены Михайловны** на тему **«Неупругое деформирование и разрушение слоисто-волоконистых полимерных композитов в зонах концентрации напряжений»** является завершенной научной квалификационной работой, и соответствует критериям, установленным 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 степени кандидата наук, а ее автор, **Струнгарь Елена Михайловна**, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Дата: 28.11.2019 г.

Официальный оппонент, старший научный сотрудник лаборатории «Термомеханики твердых тел» Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ИМСС УрО РАН»), кандидат физико-математических наук


Пантелеев Иван Алексеевич

Подпись И.А. Пантелеева заверяю.

Подтверждаю, что И.А. Пантелеев не входит в состав членов диссертационного совета Д 004.036.01, утвержденных приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

Ученый секретарь ИМСС УрО РАН, к.ф.-м.н.  Юрлова Наталья Алексеевна

Я, Пантелеев Иван Алексеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

e-mail: pia@icmm.ru, Тел.: +7-909-727-69-32

Почтовый адрес:

614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1

Лаборатория «Термомеханики твердых тел» ИМСС УрО РАН,

Web-сайт: <http://www.icmm.ru/>