

На правах рукописи



Струнгарь Елена Михайловна

**НЕУПРУГОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ  
СЛОИСТО-ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ  
В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ)

Научный руководитель: **Вильдеман Валерий Эрвинович**, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Панин Сергей Викторович**, доктор технических наук, профессор, ФГБУН "Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук", заведующий лабораторией механики полимерных композиционных материалов (г. Томск)

**Пантелеев Иван Алексеевич**, кандидат физико-математических наук, ФГБУН "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук" (филиал – "Институт механики сплошных сред УрО РАН"), старший научный сотрудник лаборатории термомеханики твердых тел (г. Пермь)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет", г. Самара

Защита состоится **19 декабря 2019 г.** в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: [www.icmm.ru](http://www.icmm.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук, доцент

 / А.Л. Зуев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность и степень разработанности темы исследования**

Благодаря высоким удельным физико-механическим свойствам слоисто-волокнистые полимерные композиционные материалы получили широкое распространение в ответственных конструкциях авиационного назначения. Экспериментальные исследования, позволяющие оценить эволюцию полей перемещений и деформаций в зонах концентрации напряжений, а также особенности поведения композитов в этих областях, необходимы для усовершенствования моделей неупругого поведения, развития методов расчета и проектирования элементов ответственных конструкций. Кроме концентраторов различной геометрии, в частности отверстий, возможными концентраторами могут являться и дефекты в структуре, которые возникают в процессе изготовления или эксплуатации.

К числу перспективных экспериментальных методов анализа полей перемещений и деформаций относится метод корреляции цифровых изображений. Развитие нового метода для решения задач механики деформируемого твердого тела требует проведения комплексных исследований эффективности использования данного «инструмента» экспериментальной механики применительно к анализу механического поведения тел различной геометрии и структуры при реализации сложных режимов внешних воздействий.

Таким образом, работа, направленная на получение новых экспериментальных данных о закономерностях эволюции полей перемещений и деформаций в зонах концентрации напряжений композитных элементов при неупругом поведении методом корреляции цифровых изображений, представляется актуальной как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Проведенный анализ литературных источников, показал, что, не смотря на значительные достижения экспериментальной механики композитов, к числу вопросов, требующих дополнительного изучения, следует отнести комплексное теоретическое и экспериментальное исследование закономерностей процессов накопления повреждений, развития дефектов, структурного и макроразрушения конструкционных полимерных композиционных материалов, работающих в условиях наличия неоднородных деформационных полей в деталях с концентраторами различной геометрии.

Отмечено, что сложность структуры композиционных материалов приводит к необходимости рассмотрения дефектов на различных уровнях и выявления стадий развития повреждений.

**Целью диссертационной работы является** экспериментальное изучение закономерностей неупругого деформирования, процессов накопления повреждений и разрушения конструкционных полимерных композиционных материалов в условиях наличия неоднородных деформационных полей.

Для достижения поставленной цели следует решить следующие задачи

1. Проанализировать методические особенности проведения испытаний с использованием цифровой оптической системы и обосновать выбор эффективных параметров математической обработки данных по методу корреляции цифровых изображений применительно к объектам из композиционных материалов.

2. Получить новые опытные данные о влиянии типов структур полимерных композиционных материалов на характер неупругого деформирования и разрушения в зонах концентрации напряжений.

3. Оценить влияние размера отверстия относительно характерного размера структуры композиционного материала на процессы неупругого деформирования и разрушения.

4. Исследовать процессы деформирования и накопления повреждений в композитных объектах с дефектами технологического и эксплуатационного происхождения.

5. Исследовать применимость метода корреляции цифровых изображений для решения задач волоконно-оптических технологий и отработать методики совместного использования бесконтактной оптической видеосистемы и волоконно-оптических датчиков деформаций.

**Научная новизна результатов работы заключается в следующем:**

— выявлена связь выбранных параметров обработки экспериментальных данных методом корреляции цифровых изображений с масштабными уровнями рассмотрения процессов деформирования композиционных материалов;

— получены новые экспериментальные данные, демонстрирующие наличие масштабного эффекта прочности слоисто-волоконистых композитов с концентраторами в зависимости от структурных и размерных параметров;

— получены результаты экспериментального исследования влияния концентраторов на механическое поведение образцов углепластиков на основе ряда различных пространственных армирующих каркасов;

— получены новые экспериментальные данные о закономерностях и механизмах деформирования и разрушения образцов слоистых композиционных материалов с предварительно заложенными технологическими дефектами;

— впервые показана эффективность использования бесконтактной оптической видеосистемы трехмерного анализа полей перемещений и деформаций, а также математического метода корреляции цифровых изображений для решения задач волоконно-оптических технологий мониторинга изделий из композиционных материалов.

**Достоверность результатов** подтверждается использованием аттестованного оборудования и поверенных средств измерений в условиях аккредитованной испытательной лаборатории и апробированных методик экспериментальных исследований, а также соответствием результатов, полученных для частных случаев, опубликованным данным других авторов.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в развитии методологических основ применения современных бесконтактных средств регистрации деформационных полей для изучения закономерностей механического поведения и анализа условий разрушения тел с концентраторами.

Результаты исследований используются на предприятии ПАО «ОДК-Сатурн» при оценке свойств полимерных композиционных материалов ПКМ в зависимости от типов переплетения при проектировании деталей из 3D-армированного ПКМ, а также в учебном процессе кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению магистерской подготовки 150100.68 «Материаловедение и технологии материалов» по дисциплинам «Экспериментальная механика материалов» и «Экспериментальная механика композитов».

#### **Методология и методы диссертационного исследования**

Экспериментальное изучение при различных условиях и режимах нагружения осуществлялось с использованием современного комплекса испытательного и диагностического оборудования для исследования свойств конструкционных материалов при сложных воздействиях на базе Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Регистрация и анализ эволюции неоднородных полей деформаций и температур на поверхности структурно-неоднородного материала предусматривало совместное использование in-situ оптических методов экспериментальной механики: высокоэффективного метода корреляции цифровых изображений на базе бесконтактной трёхмерной цифровой оптической системы Vic-3D (Correlated Solutions) и метода инфракрасной термографии с применением тепловизионной системы FLIR SC7700M с охлаждаемым КРТ (кадмий-ртуть-теллур) детектором. Анализ поврежденности композиционного материала вследствие развития макротрещин, изучение поверхностей изломов опытных образцов проводился с использованием стереомикроскопа Carl Zeiss SteREO Discoverjy.V12.

Изучение процессов неупругого деформирования, накопления повреждений и развития дефектов в композитных объектах в зависимости от условий и режимов нагружения предусматривало проведение механических испытаний при квазистатическом нагружении на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5882 (100 кН), Instron 5989 (600 кН); а также при циклическом нагружении с различными параметрами цикла на сервогидравлической двухосевой (растяжение-сжатие/кручение) испытательной системе Instron 8850 (100 кН/1000 Нм).

При проведении экспериментальных исследований использовались рекомендации российских и зарубежных стандартов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Совокупность рекомендаций по выбору параметров численной обработки данных с использованием метода корреляции цифровых изображений, основанных на анализе неоднородных полей деформаций композиционных материалов.

2. Совокупность новых экспериментальных результатов, полученных на основе регистрации и анализа деформационных полей и иллюстрирующих влияние размера концентратора напряжений относительно параметров структуры слоисто-волокнутого композиционного материала при изучении процессов неупругого деформирования и разрушения.

3. Совокупность новых опытных данных, демонстрирующих наличие масштабного эффекта прочности слоисто-волокунистых композитов с концентраторами в зависимости от структурных и размерных параметров при квазистатическом нагружении.

4. Результаты экспериментальных исследований анализа процессов деформирования и накопления повреждений в композитных объектах с дефектами технологического и эксплуатационного происхождения.

5. Выводы по эффективности применения метода корреляции цифровых изображений для решения задач волоконно-оптических технологий.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 20 всероссийских и 7 международных научных конференциях: XXII Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» г. Пермь, Россия (2013-2019 гг.); Всероссийская научно-техническая интернет-конференция «Прикладная математика, механика и процессы управления» г. Пермь, Россия (2013 г.); VIII Российская научно-техническая конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» г. Екатеринбург, Россия (2014, 2016, 2018 гг.); 1-ая Международная конференция по корреляции цифровых изображений, г. Дублин, Ирландия (2014 г.); Международная научная конференция Наука будущего, г. Санкт-Петербург, Россия (2014 г.), г. Казань, Россия (2016 г.); XIX Всероссийская конференция Зимняя школа по механике сплошных сред, г. Пермь, Россия (2015, 2017, 2019 гг.); 12-ая Международная конференция по механическому поведению материалов, г. Карлсруэ, Германия (2015 г.); XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Казань, Россия (2015 г.); 17-ая Международная конференция по экспериментальной механике о. Родес, Греция (2016 г.); 10-ая Всероссийская конференция с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи», г. Самара, Россия (2016 г.); X Всероссийская конференция по механике деформируемого твердого тела г. Самара, Россия (2017 г.); LVIII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» г. Пермь, Россия (2017 г.); XVIII Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и

инновации» г. Пермь, Россия (2017, 2018 гг.); III Всероссийская научно-техническая конференция «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения» г. Москва, Россия (2018 г.); Международная научно-техническая молодежная конференция «Перспективные материалы конструкционного и медицинского назначения» г. Томск, Россия (2018 г.); XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Уфа, Россия (2019 г.); 3-я Международная конференция по конструкционной прочности, г. Фуншал, Португалия (2019 г.).

Диссертация полностью докладывалась и обсуждалась на семинарах кафедры математического моделирования систем и процессов ПНИПУ (руководитель – д.ф.-м.н., проф. П.В. Трусков), Института механики сплошных сред УрО РАН (руководитель – академик РАН, д.т.н., проф. В.П. Матвеев), кафедры композиционных материалов и конструкций ПНИПУ (руководитель – д.т.н., проф. А.Н. Аношкин), кафедры экспериментальной механики и конструкционного материаловедения (руководитель – д.ф.-м.н., проф. В.Э. Вильдеман).

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательской работы в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований (№ 13-08-00304, № 13-08-96016, 18-01-00763, 19-41-590005), Российского научного фонда (15-19-00243, 16-19-00069); при выполнении гранта по постановлению Правительства Российской Федерации №220 от 9 апреля 2010 года (договор № 14В.25.310006 от 24 июня 2013 года); в рамках научно-исследовательских работ совместно с ОАО «Авиадвигатель» и ОАО «НПО САТУРН».

**Публикации.** Результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 40 работах, из них – 13 статей в изданиях, рекомендованных ВАК [1-13], включая 10 статей, опубликованных в изданиях, индексируемых в WoS или Scopus [1-4, 6, 7, 9-12], 25 публикаций в изданиях, индексируемых в РИНЦ.

**Личный вклад автора** заключается в следующем:

- анализ текущего состояния исследований по теме работы и постановка задачи (совместно с научным руководителем);
- анализ численных алгоритмов обработки экспериментальных данных при использовании метода корреляции цифровых изображений (лично);
- проведение экспериментальных исследований в части использования трехмерной оптической видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций Vic-3D (лично);
- регистрация температур с помощью инфракрасной тепловизионной системы (лично);
- формулировка основных результатов и написание выводов диссертации (лично);
- написание статей в научные журналы (совместно с соавторами и научным руководителем).

В целом, соискателем самостоятельно осуществлено проведение экспериментов с использованием цифровой оптической системы, обработка и описание результатов. Выбор направлений исследований, составление планов работ и анализ результатов осуществлялся совместно с научным руководителем.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 92 рисунка и 19 таблиц. Общий объем диссертационной работы составляет 171 страницу, библиографический список включает 181 источник.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отмечена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основная цель и задачи исследования, изложены полученные научные результаты, обоснована их достоверность, новизна, теоретическая и практическая ценность. Приведены сведения об апробации работы, представлено краткое содержание всех глав диссертации.

**В первой главе** отражено современное состояние работ, посвященных исследованию закономерностей неупругого деформирования и разрушения материалов при наличии неоднородных деформационных полей. Приведен краткий обзор экспериментальных методов регистрации неоднородных деформационных полей, в частности метода корреляции цифровых изображений. Проведен анализ современного состояния тематики исследования, отмечены особенности механического поведения композиционных материалов в зонах концентрации напряжений, связанные с механизмами структурного разрушения и масштабным эффектом деформирования.

**Во второй главе** рассмотрены методические вопросы проведения эксперимента с использованием цифровой оптической системы для трехмерного анализа полей перемещений и деформаций. С целью оценки влияния параметров корреляционной обработки на неоднородные поля деформаций на поверхности пространственно-армированных углепластиков проведена серия вычислений полей деформаций для одного кадра при различных значениях подобласти в интервале  $X=9\div 89$  пикселей и при фиксированном значении шага  $\Delta X=5$ . Построен график зависимости влияния размера подобласти на результаты вычисления среднего значений доверительного интервала (рис. 1).

Размер подобласти является допустимым, если среднее значение доверительного интервала не превышает  $\sigma \leq 0,01$ . Выбранный размер подобласти  $49 \times 49$  обладает достаточной уникальностью распределения пикселей для возможности осуществления однозначной идентификации локальных областей по изображению. При меньшем размере параметра  $X$  отмечаются недопустимые значения доверительного интервала соответствия. Аналогичный подбор параметров математической обработки проводился для всех экспериментальных данных в диссертационной работе.

По результатам проведенных исследований отмечено, что подбор параметров должен осуществляться с учетом размера структурной неоднородности материала, учитывая это, выбирается масштабный уровень регистрации деформаций. С целью оценки структурных особенностей материала, для изучения процессов возникновения и развития дефектных структур и разрушения, анализа поведения в зонах концентрации напряжений необходимо устанавливать величину шага, сопоставимую с размером структурной неоднородности.

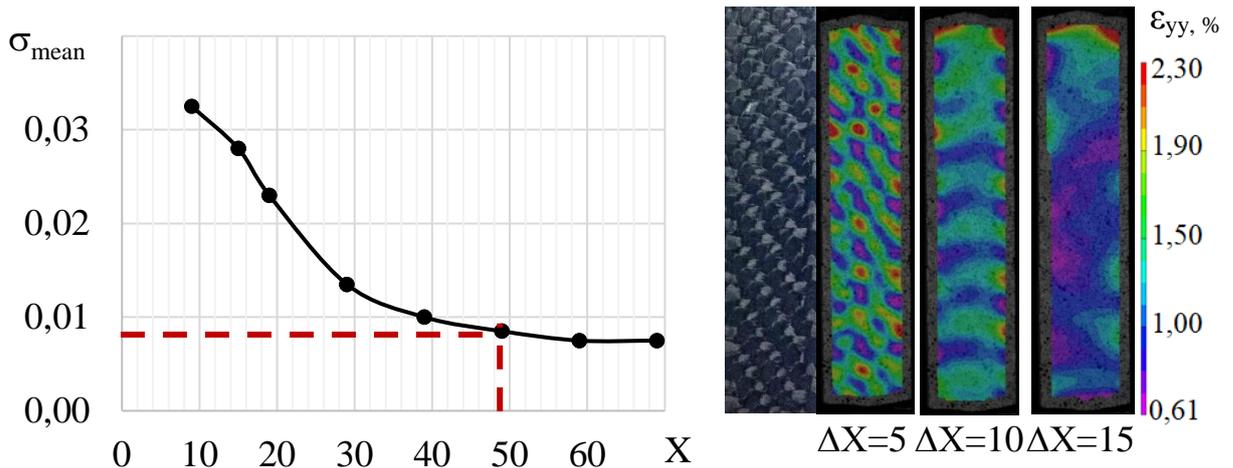


Рис. 1. Влияние размера подобласти на результаты вычисления среднего значения доверительного интервала; неоднородные поля продольных деформаций при фиксированном размере подобласти и различной величине шага

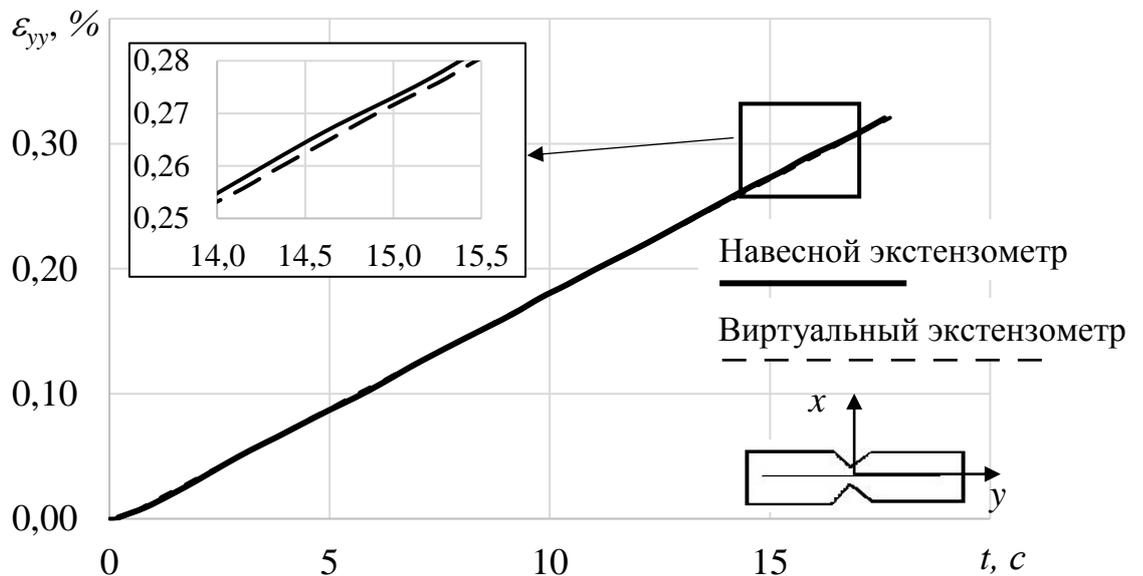


Рис. 2. График зависимости продольной деформации от времени

Для подтверждения точности измерений, получаемых с помощью трехмерной цифровой оптической системы проведен ряд испытаний на одноосное растяжение плоского образца из стеклопластика с использованием

навесного экстензометра Instron 2620-601 и дополнительного модуля программного обеспечения Vic-3D «виртуальный экстензометр» (рис. 2). Характеристики экстензометра Instron 2620-601 следующие: максимальное возможное отклонение от измеряемой величины составляет 0,15 %. Измерительная база навесного экстензометра - 50 мм.

По результатам испытаний сделан вывод, что применение цифровой оптической системы позволяет определять значения деформации на фиксированной базе, с точностью, сопоставимой с данными навесного датчика продольных деформаций.

**В третьей главе** содержатся результаты экспериментального исследования механического поведения слоисто-волокнутого композиционного материала в окрестности концентраторов напряжений. Проведены испытания образцов стеклотекстолита СТЭФ на одноосное растяжение с разной величиной диаметра сквозного отверстия. На рис. 3 представлен сравнительный анализ ниспадающих участков диаграмм для диаметров  $d_1$ - $d_5$ . По мере увеличения диаметра ниспадающие участки удлиняются, увеличивается степень реализации закритической стадии. Угол наклона (модуль спада) кривых также изменяется.

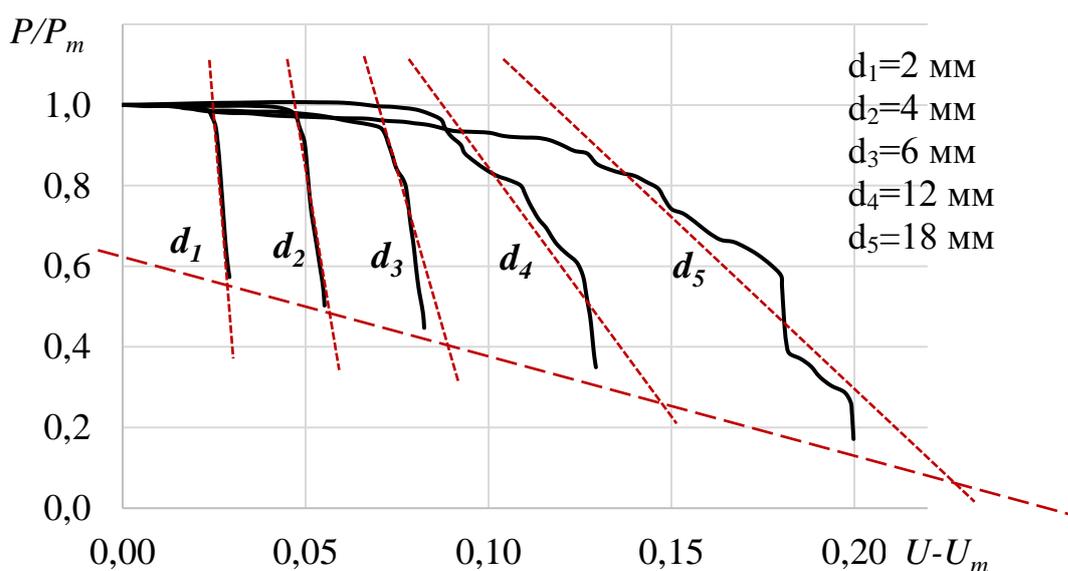


Рис. 3. Сравнительный анализ ниспадающих участков диаграмм, полученных на образцах с отверстиями разного диаметра

Анализ поврежденности композиционного материала вследствие развития макротрещин проводился с использованием стереомикроскопа Carl Zeiss SteREO Discoverjy.V12 на верхних слоях. В области больших деформаций вокруг отверстия с обеих сторон наблюдается разрыв волокон, свидетельство этого приведено на фотографиях поверхности образца (рис. 4).

В соответствии с полученными результатами программа исследований по оценке влияния структурных параметров композитных образцов с концентратором напряжений включала в себя проведение механических

испытаний на одноосное растяжение трех групп образцов-полосок с различным диаметром отверстия 3, 6 и 9 мм.

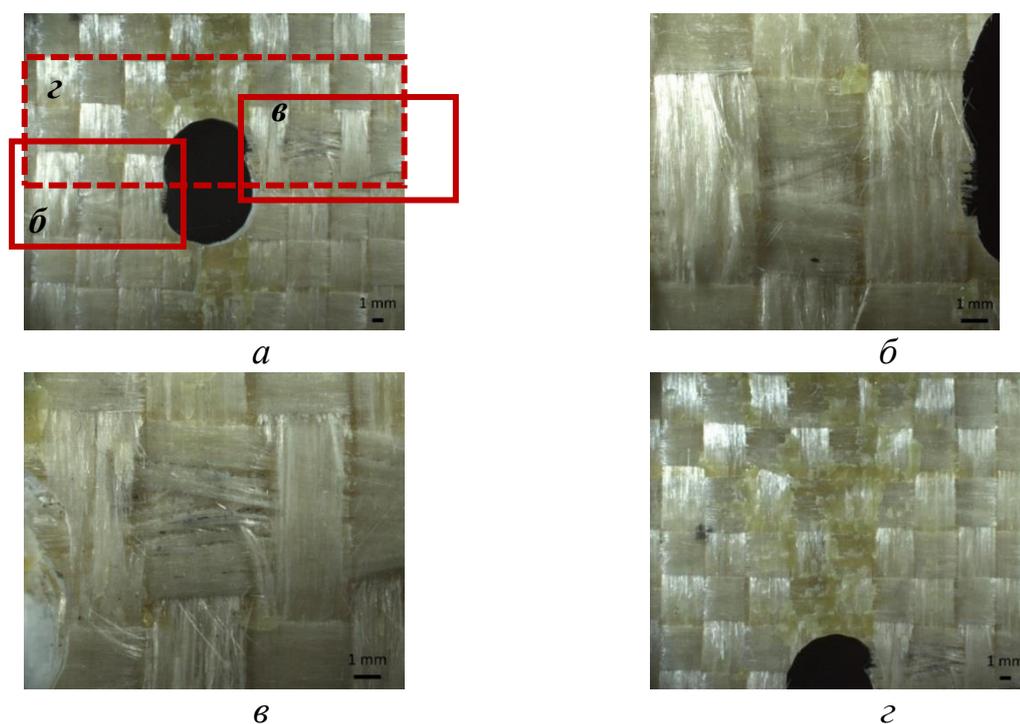


Рис. 4. Фотографии структуры стеклотекстолита СТЭФ после разрушения образца на верхнем слое

При подборе ширины и длины рабочей части образца соблюдалось подобие геометрических размеров: диаметр отверстия  $d$  (мм), ширина рабочей части  $h=6d$  (мм), длина рабочей части  $l=14d$  (мм), скорость перемещения подвижного захвата  $l \cdot 0,01$  (мм/мин) обеспечивала одинаковую скорость деформаций в рабочих зонах всех образцов ( $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ).

Значение среднего напряжения определялось по формуле  $\sigma = P/(5dh)$ . На рис. 5 приведены характерные диаграммы деформирования. По полученным данным было показано, что упругие участки композитных образцов практически совпадают, в то время как предельное значение среднего напряжения при разрушении увеличивается по мере уменьшения диаметра отверстия образца.

Поскольку в работе речь идет о структурно-неоднородных телах и изменение размеров образца и отверстия влияет на несущую способность, то можно предположить, что это связано со структурой материала. В связи с этим была получена диаграмма зависимости предельного значения среднего напряжения от параметра неоднородности для образцов с разным диаметром отверстия (рис. 6).

Параметр неоднородности зависит от диаметра отверстия и от размера структурного элемента, вычисляется по формуле:  $\xi = d/\delta$ . Размер структурного элемента для материала СТЭФ составил  $\delta = 4$  мм (ширина переплетения).

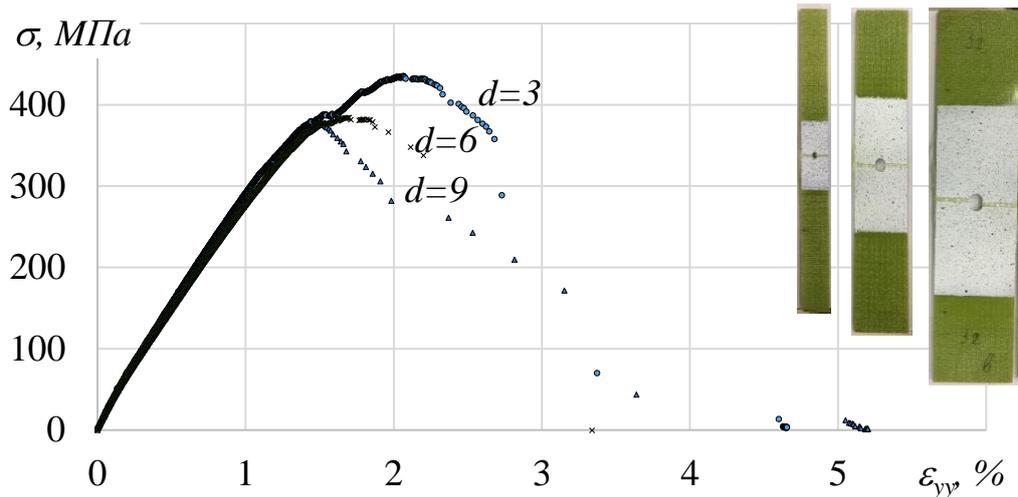


Рис. 5. Диаграмма деформирования образцов при испытании на одноосное растяжение

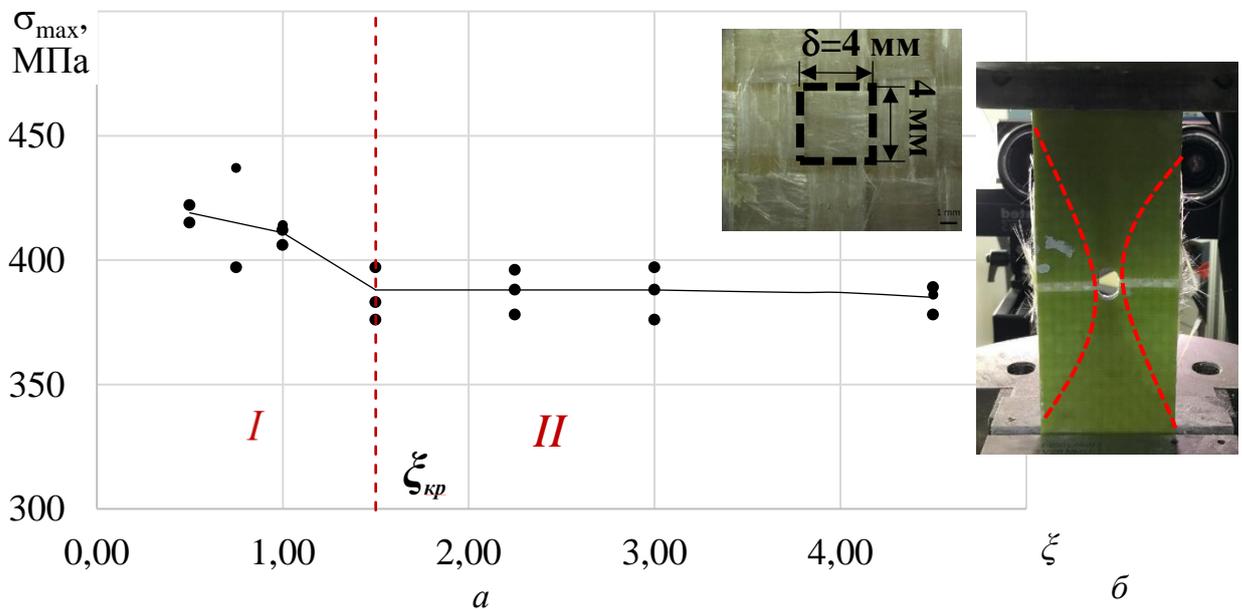


Рис. 6. График зависимости предельного значения среднего напряжения от параметра неоднородности ( $a$ ); фотография разрушенного образца с зонами разрыва волокон и отслоения матрицы ( $b$ )

По полученным результатам видно, что диаметр отверстия  $\xi = 1,5$  является критическим. Условно график на рис. 6 можно разделить на два участка: участок  $I$  ( $\xi \leq \xi_{кр}$ ) и участок  $II$  ( $\xi > \xi_{кр}$ ). При значениях структурного параметра неоднородности меньше критического значения предельные значения среднего напряжения уменьшались (участок  $I$ ), полученные данные свидетельствуют о наличии масштабного эффекта. Когда структурный параметр неоднородности больше критического значения для данного материала изменения предельных значений среднего напряжения практически не наблюдается (участок  $II$ ), при этом масштабный эффект отсутствует.

С помощью инфракрасной тепловизионной системы (пассивный метод контроля) была обнаружена исходная зона повреждения в области сверления отверстия в образце, дополнительно был проведен численный анализ и проанализировано распределение полей деформаций на поверхности композитных образцов с отверстием. Возможные исходные технологические повреждения в области отверстия привели к перерезанию волокон и нарушению целостности матрицы.

Особый интерес представляет анализ механического поведения образцов углепластиков с концентратором, полученным по специальным технологиям, на основе ряда различных пространственных армирующих каркасов (А-Н). Проведена серия механических испытаний на одноосное растяжение композитных образцов с круглыми концентраторами, преформы образцов-полосок изготовлены с помощью технологии 3D-ткачества шестью различными способами переплетения (А–F), а также из слоистых преформ (G) и слоистых преформ, усиленных в поперечном направлении методом прошивки (H). Всего было испытано по 10 образцов в каждой группе. На рис. 7. представлены характерные диаграммы нагружения.



Рис. 7. Диаграмма нагружения образцов углепластика с различными схемами армирования

Введен коэффициент изменения прочности  $K_{\varepsilon}$ , который определяется как отношение средних предельных напряжений, полученных на образце без концентратора и на образце с отверстием. Проведена оценка чувствительности той или иной схемы армирования к наличию отверстия.

Учитывая, что поведение структур композита может отличаться при разных видах испытаний, проведено экспериментальное исследование сдвиговых свойств пространственно-армированных композитов по методу Iosipescu ASTM D5379. Предложены рекомендации по получению и математической обработке экспериментальных данных с использованием бесконтактной оптической видеосистемы. При определении сдвиговых деформаций ASTM D5379 рекомендует использовать тензорезисторы с базой 1,5 мм, которые располагаются под углами  $\pm 45^\circ$  к оси нагружения в рабочей зоне образца (между V-образными вырезами), но программное обеспечение видеосистемы позволяет сымитировать тензорезисторы с помощью дополнительных виртуальных инструментов. В результате испытаний для каждого из 10 образцов были построены поля деформаций в его рабочей зоне

с учетом структурных особенностей. На рис. 8 проанализированы варианты осреднения деформаций в рабочей зоне пространственно-армированных образцов с помощью таких инструментов видеосистемы как «виртуальный экстензометр  $T$ » и «прямоугольная область  $R$ ».

В ходе исследований полей деформаций было выявлено, что распределение сдвиговых деформаций носит неоднородный характер, в зависимости от расположения областей неоднородности значения данных по модулю сдвига могут отличаться более, чем в 1,6 раза, по условной прочности на сдвиг в 1,4 раза, по пределу прочности в 1,1 раз. Видеосистема обладает преимуществом по сравнению с тензорезисторами и более предпочтительна в использовании, так как позволяет увидеть полную картину распределения сдвиговых деформаций на поверхности образца.

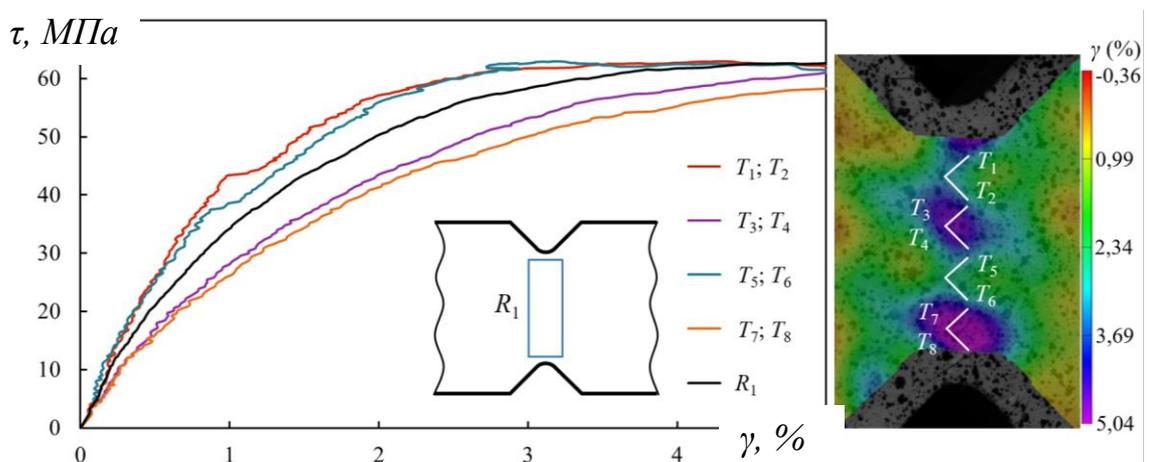


Рис. 8. Диаграммы деформирования образца с использованием инструментов «прямоугольная область  $R$ » и «виртуальный экстензометр  $T$ » для определения деформаций сдвига

**Четвертая глава** посвящена анализу закономерностей механического поведения материалов в зонах технологических и эксплуатационных несовершенств. Процесс производства образцов с заложенными технологическими дефектами типа «расслоение» основан на использовании фторопластовой плёнки, которая укладывается между слоями.

С целью экспериментального исследования процессов деформирования и накопления повреждений в образцах углепластика с внутренними дефектами в условиях сложного напряженного состояния реализованы механические испытания при пропорциональном растяжении/сжатии с кручением при соотношении  $k=0,028$  ( $k=u/\varphi$ ). Для оценки развития внутреннего дефекта проведены испытания с тремя разгрузками и повторными нагружениями. В случае развития внутреннего дефекта в процессе нагружения регистрируется изменение картин полей деформаций (рис. 9).

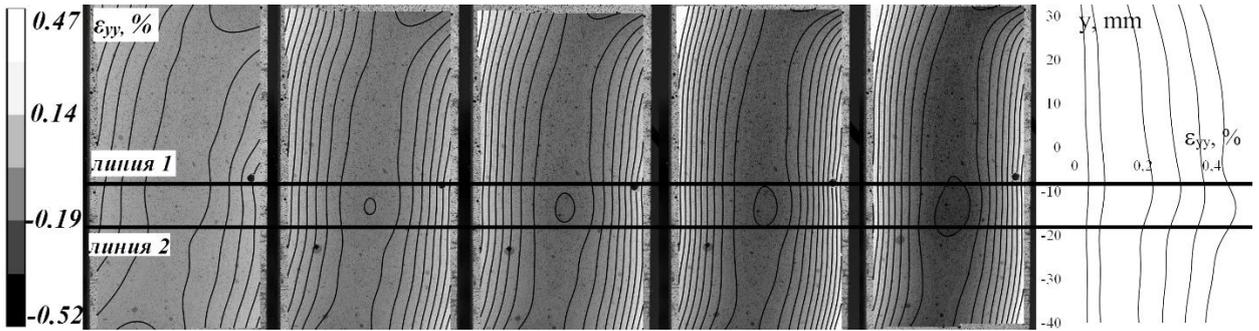


Рис. 9. Неоднородные поля продольных деформаций на поверхности образца с размером дефекта 10 x 10 мм

Отдельное внимание уделено анализу эволюции картин полей деформаций для оценки развития залеченных дефектов типа сквозного пробоа и формировании условий макроразрушения в трехслойных композитных панелях из стеклотекстолита. Предложена методика исследования влияния дефектов на остаточную прочность элементов конструкций из композитов на основе совместного использования систем регистраций полей деформаций и температур. Проведена оценка влияния циклических испытаний на поведение композитов с дефектами со следующими параметрами: коэффициент асимметрии  $R = -0,25$ ; амплитуда цикла  $N_a = 25 \text{ кН}$ ; форма волны в виде синуса; частота –  $0,25 \text{ Гц}$ ; количество циклов  $n=200$ . При этом минимальные значения по нагрузке составляли  $-10 \text{ кН}$ , максимальные –  $40 \text{ кН}$  (рис. 10).

Показано, что несущая способность образца с нанесенным дефектом на 30% ниже, чем образца без дефекта. Циклические нагружения по описанным режимам привели к дополнительному снижению прочности на 10%.

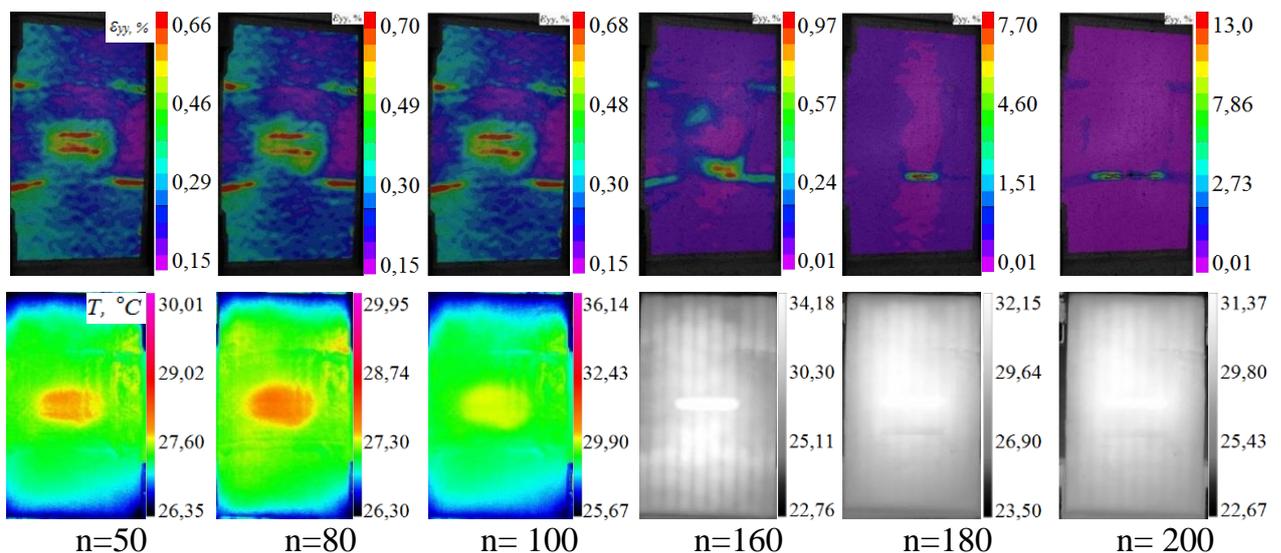


Рис. 10. Эволюция полей продольных деформаций и соответствующие им термограммы в зависимости от числа пройденных циклов нагружения

**В пятой главе** проведено комплексное исследование применимости метода корреляции цифровых изображений для решения задач волоконно-оптических технологий. Показано, что использование видеосистем

трехмерного анализа полей перемещений и деформаций позволяет выработать рекомендации по расположению и калибровке встроенных волоконно-оптических датчиков деформаций ВВОДД (учет коэффициента калибровки позволяет повысить точность регистрируемых деформаций ВВОД на 25%), а также провести оценку чувствительности к режимам нагружения.

В качестве примера на рис. 11. приведены результаты распределения продольной деформации вдоль осевой линии на поверхности образца с концентратором, который нагружался ступенчато с выдержками по перемещениям траверсы, соответствующим нагрузкам 2,5 кН; 4,7 кН; 7,0 кН, не менее 60 секунд. Отличие результатов, полученных с ВОДД и с помощью оптической измерительной системы, не превышает 5 %.

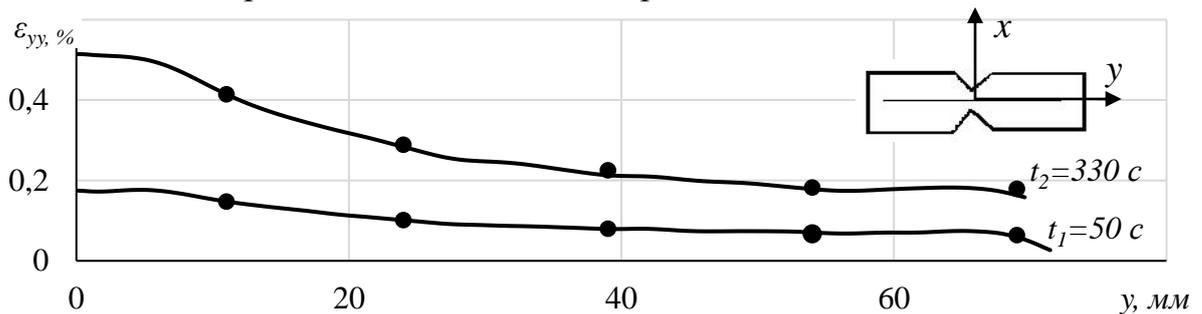


Рис. 11. Распределение продольной деформации вдоль осевой линии образца: точками отмечены данные с ВОДД; кривая – с видеосистемы

Кроме того, изучался вопрос организации режима равновесного роста трещины. С целью анализа полей деформаций и определения мест расположения оптических датчиков для регистрации появления и развития повреждений в полимерном композиционном материале было реализовано многоэтапное циклическое нагружение в соответствии со схемой рис. 12. Переход с одного этапа на другой осуществлялся при снижении значения амплитуды нагрузки  $P_a$  более чем на 5 %. Поля продольных деформаций и соответствующие фотографии, полученные с помощью микроскопа, представлены на рис. 13.

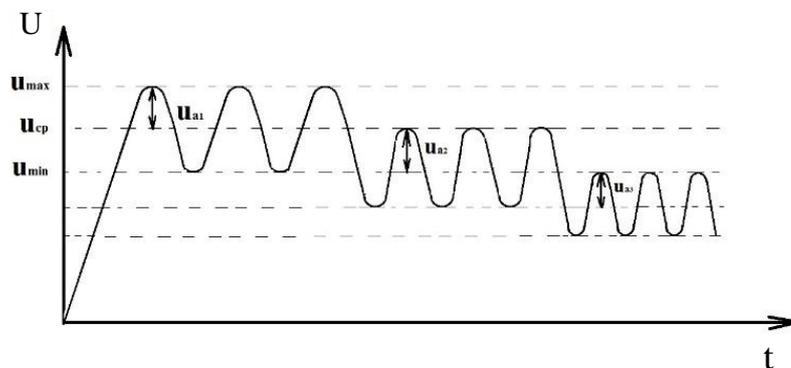


Рис. 12. Режим поэтапного деформирования

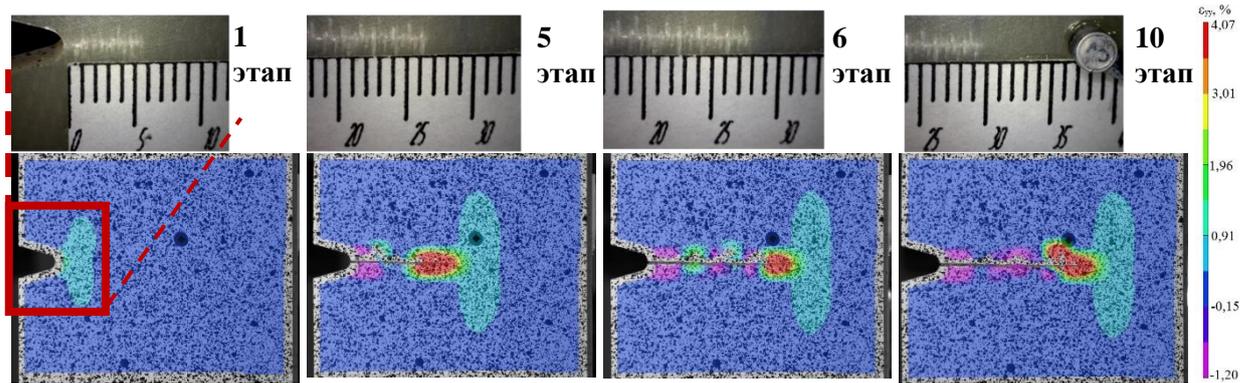


Рис. 13. Эволюция полей продольных деформаций при росте трещины

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы

1. Проведен анализ численных алгоритмов обработки экспериментальных данных при использовании метода корреляции цифровых изображений. Предложены рекомендации по выбору параметров расчета при анализе неоднородных полей перемещений и деформаций в композитных изделиях с учетом структурной неоднородности материалов. Показана связь выбранных параметров корреляционного анализа и масштабного уровня рассмотрения процессов деформирования.

2. Проведены экспериментальные исследования механического поведения слоисто-волоконистых композиционных материалов в окрестности концентраторов напряжений при квазистатическом нагружении. Получены результаты оценки влияния размера отверстия относительно характерного размера структуры композиционного материала на процессы неупругого деформирования и разрушения. Получены данные, подтверждающие наличие масштабного эффекта прочности в определенном диапазоне значений параметра структурной неоднородности материала.

3. Получены результаты экспериментального исследования влияния концентраторов на механическое поведение образцов углепластиков на основе ряда различных пространственных армирующих каркасов. Предложены рекомендации по получению и математической обработке экспериментальных данных для определения механических характеристик композитов при сдвиге с использованием бесконтактной оптической видеосистемы.

4. С целью анализа закономерностей механического поведения материалов в зонах технологических и эксплуатационных несовершенств экспериментально исследованы процессы деформирования и накопления повреждений в слоистых композитных объектах с предварительно заложенными дефектами. Проведен анализ эволюции картин полей деформаций для оценки развития дефектов в композитных образцах. Предложена методика исследования влияния дефектов на остаточную прочность элементов конструкций из композитов на основе совместного использования систем регистраций полей деформаций и температур.

5. Получены опытные данные по оценке влияния дефектов на остаточную прочность конструктивно-подобных элементов конструкций из композитов. Проведена оценка несущей способности крупноячеистых панелей с повреждениями при циклических и квазициклических воздействиях.

6. Проведено комплексное исследование применимости метода корреляции цифровых изображений для решения задач волоконно-оптических технологий. Показано, что использование видеосистем трехмерного анализа полей перемещений и деформаций позволяет выработать рекомендации по расположению и калибровке встроенных волоконно-оптических датчиков, а также провести оценку чувствительности к режимам нагружения.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Третьякова Т. В., **Спаскова (Струнгарь) Е.М.** Экспериментальное исследование напряженно-деформированных состояний квазихрупкого материала с использованием метода корреляции цифровых изображений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2013. — № 2. — С. 186-198. **(ВАК, Scopus)**

2. Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., **Спаскова (Струнгарь) Е.М.**, Чихачев А.И. Экспериментальное исследование влияния дефектов на прочность композитных панелей методами корреляции цифровых изображений и инфракрасной термографии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. — 2015. — № 4. — С. 159–170. **(ВАК, Scopus)**

3. Аношкин А. Н., Воронков А. А., Кошелева Н. А., Матвеев В. П., Сероваев Г. С., **Спаскова (Струнгарь) Е. М.**, Шардаков И. Н., Шипунов Г. С. Измерение неоднородных полей деформаций встроенными в полимерный композиционный материал волоконно-оптическими датчиками // Механика твердого тела — 2016. — № 5. — С. 42—51. **(ВАК)** Переводная версия: Anoshkin A. N., Voronkov A. A., Kosheleva N. A., Matveenko V. P., Serovaev G. S., Spaskova (Strungar) E. M., Shardakov I. N., Shipunov G. S. Measurement of Inhomogeneous Strain Fields by Fiber Optic Sensors Embedded in a Polymer Composite Material // Mechanics of Solids, — V.51, — №5, — pp. 542-549 **(Web of science, Scopus)**

4. Wildemann V.E., **Spaskova (Strungar) E.V.**, Shilova A.I. Research of the damage and failure processes of composite materials based on acoustic emission monitoring and method of digital image correlation problems of deformation and fracture in materials and structures // Solid State Phenomena Vol. 243 (2016) pp 163-170. **(Scopus)**

5. Староверов О.А., **Струнгарь Е.М.**, Третьяков М.П., Третьякова Т.В. Особенности экспериментальных исследований трубчатых образцов композиционных материалов в условиях сложного напряженного состояния // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. — 2017. — № 51, — с. 104-114. **(ВАК)**

6. Matveenko V. P., Shardakov I. N., Voronkov A. A., Kosheleva N.A., Lobanov D.S., Serovaev G.S., **Spaskova (Strungar) E.M.**, Shipunov G.S. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material. *Struct Control Health Monit.* 2017;e2118. <https://doi.org/10.1002/stc.2118> (**Web of science, Scopus**)

7. **Spaskova (Strungar) E. M.**, Wildemann V. E. Analysis of possible registration of inhomogeneous deformation fields in composite plates with technological defects // *International Digital Imaging Correlation Society [Electronic resource]* — 2017. — pp. 133-136. (**Web of science, Scopus**)

8. Вильдеман В.Э., **Струнгарь Е.М.**, Лобанов Д.С., Воронков А.А. Оценка работоспособности внедренных в композитный материал волоконно-оптических датчиков с использованием данных цифровой оптической видеосистемы анализа деформаций // *Дефектоскопия.* — №1. — 2018. — с. 65-71 (**БАК**)

9. Wildemann V. V., Tretyakova T. V., **Strungar E. M.**, Tretyakov M. P. Deformation and failure of carbon fiber composite specimens with embedded defects during tension-torsion test // *Frattura ed Integrità Strutturale.* — Vol. 12. — № 46. — 2018. — pp. 295-305. (**Web of science, Scopus**)

10. Третьякова Т.В., Душко А.Н., **Струнгарь Е.М.**, Зубова 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. (**БАК, Scopus**)

11. Babushkin A.V., Babushkina A.V., **Strungar E. M.**, Staroverov O. A., Lobanov D. S., Temerova M.S., Feklistova E.V. Phenomenological characteristics structural features research obtained at fibrous plastics standard tests // *Procedia Structural Integrity.* — Vol. 17. — 2019. — pp. 658–665. (**Web of science, Scopus**)

12. **Strungar E. M.**, Feklistova E.V., Babushkin A.V., Lobanov D. S. Experimental studies of 3D woven composites interweaving types effect on the mechanical properties of a polymer composite material // *Procedia Structural Integrity.* — Vol. 17. — 2019. — pp. 965–970. (**Web of science, Scopus**)

13. Вильдеман В.Э., **Струнгарь Е.М.**, Лобанов Д.С., Зубова Е.М. Исследование развития технологического дефекта в конструкционном углепластике методами корреляции цифровых изображений и акустической эмиссии в условиях сложнапряженного состояния // *Дефектоскопия.* — №9. — 2019. — с. 3-10. (**БАК**)

Подписано в печать 2019 г.

Формат 60 x 90/16. Набор компьютерный.

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ №.