

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор Вильдеман Валерий Эрвинович

Пермь 2019

Оглавление

Введение	5
1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ	15
1.1. Актуальные вопросы теоретического исследования проблемы концентрации напряжений	15
1.2. Использование оптических методов механики деформируемого твердого тела для исследования неоднородных полей деформаций	18
1.3. Особенности механического поведения композиционных материалов в зонах концентрации напряжений, масштабные эффекты деформирования	24
Основные выводы по главе 1	27
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ЦИФРОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	28
2.1 Основные теоретические положения метода корреляции цифровых изображений	28
2.2 Методические вопросы обработки данных с использованием метода корреляции цифровых изображений	31
2.3 Методика использования бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы при исследовании неоднородных полей деформаций на поверхности композитных объектов	36
2.4 Оценка точности измерений цифровой оптической системы с использованием навесного датчика осевых деформаций	45
Основные выводы по главе 2	47

3. АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТОВ В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАТОРОВ С УЧЕТОМ СТРУКТУРНЫХ И РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ	49
3.1. Анализ закономерностей неупругого деформирования композитных образцов в условиях наличия неоднородных деформационных полей	49
3.2. Оценка влияния структурных и размерных параметров на характер поведения композитных образцов с концентратором	53
3.3 Численное определение напряженно-деформированного состояния композитного образца с концентратором	63
3.4. Влияние структурных особенностей пространственно-армированных и слоисто-волоконистых углепластиков на характер неупругого деформирования и разрушения	66
3.5. Экспериментальное исследование сдвиговых свойств пространственно-армированных композитов с учетом структурных особенностей	82
Основные выводы по главе 3	99
4. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИТНЫХ ОБЪЕКТАХ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО И ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ	101
4.1. Влияние дефектов на остаточную прочность конструктивно-подобных элементов конструкций из композитов	101
4.2. Регистрация неоднородных полей деформаций в области технологических дефектов композиционных пластин	113
Основные выводы по главе 4	130
5. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ	131

5.1 Достоверность регистрации деформаций встроенными в полимерный композиционный материал волоконно-оптическими датчиками при многократном нагружении, нахождение калибровочных коэффициентов	131
5.2 Сравнительная оценка точности регистрации деформированных состояний композитных образцов с концентраторами с использованием видеосистемы анализа деформаций и оптоволоконных датчиков	136
5.3 Разработка методики регистрации появления и развития повреждений в полимерных композиционных материалах при циклических нагружениях	141
Основные выводы по главе 5	148
Заключение	149
Список литературы	152
Приложение	171

Введение

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.

Зачастую влияние концентраторов на поведение композиционных материалов вызывает значительное снижение прочности и срока службы конструкции. 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 об особенностях 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 точки зрения.

В работе проведен литературный обзор иностранных и российских публикаций, в которых отражены актуальные вопросы исследования проблемы концентрации напряжений, представлены особенности механического поведения

композиционных материалов в зонах концентрации. Рассмотрены литературные источники, посвященные анализу напряженно-деформированного состояния материала в области концентраторов напряжений с использованием различных оптических методов механики деформируемого твердого тела, в частности метода корреляции цифровых изображений.

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

Основные задачи исследования

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 масштабного эффекта на поведение слоисто-волоконистых композитов в зонах концентраторов с учетом структурных и размерных параметров.

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 поведения изделий из композиционных материалов.

Достоверность результатов подтверждается использованием аттестованного оборудования и поверенных средств измерений в условиях аккредитованной испытательной лаборатории (Центре экспериментальной механики ПНИПУ) 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.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению подготовки 150100.68 «Материаловедение и технологии материалов» по дисциплинам «Экспериментальная механика материалов» и «Экспериментальная механика композитов».

Методология и методы диссертационного исследования направлены на проведение комплексного теоретического и экспериментального исследования закономерностей неупругого деформирования, процессов накопления повреждений, развития дефектов и разрушения конструкционных полимерных композиционных материалов, обладающих существенной структурной неоднородностью и работающих в условиях наличия неоднородных деформационных полей в деталях с концентраторами различной геометрии.

Экспериментальное изучение при различных условиях и режимах нагружения предусматривает использование 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 предусматривает 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 предусматривает использование 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 предусмотрено проведение механических испытаний при квазистатическом нагружении в диапазоне скоростей деформирования материала 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 экспериментального исследования используются методики, согласующиеся с российскими и международными стандартами.

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-волокнутих 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 и семинарах: XXII Всероссийская школа-конференция молодых ученых и студентов «Математическое моделирование в естественных науках» г. Пермь, Россия (2013-2018 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).

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 «УНИИКМ», ОАО «Авиадвигатель», ОАО «НПО САТУРН» и НОЦ АКТ ПНИПУ.

Публикации. Результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 40 работах, из них – 13 статей в изданиях рекомендованных ВАК [4, 15, 16, 36, 68, 71, 82, 90, 124, 150, 152, 174, 176], включая 10 статей, опубликованных в изданиях, индексируемых в WoS или Scopus [4, 36, 68, 71, 82, 124, 150, 152, 174, 176].

Личный вклад автора

Основные публикации диссертации опубликованы в изданиях рекомендованных ВАК.

В целом во всех публикациях соискателем самостоятельно осуществлена экспериментальная часть работ с использованием трехмерной оптической видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций Vic-3D, проведена обработка результатов методом корреляции цифровых изображений, для

регистрации температур использована инфракрасная тепловизионная система, проведено описание полученных результатов. Постановка задач и анализ результатов экспериментальных исследований осуществлялся совместно с научным руководителем и соавторами.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Работа содержит 92 рисунка и 19 таблиц. Общий объем диссертационной работы составляет 172 страницы, библиографический список включает 181 источник.

Во введении отмечена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основная цель и задачи работы, 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 в условиях наличия неоднородных деформационных полей. Приведен краткий обзор экспериментальных методов регистрации неоднородных деформационных полей. Проведен анализ современного состояния тематики исследования работы, отмечены особенности механического поведения композиционных материалов в зонах концентрации напряжений.

Во второй главе рассмотрены вопросы математической обработки данных с использованием метода корреляции цифровых изображений. Отмечены особенности использования численной обработки экспериментальных данных с использованием метода корреляции цифровых изображений при исследовании неоднородных полей деформаций композиционных материалов с учетом структурных особенностей. Получены результаты верификации подходящих параметров расчета методом корреляции цифровых изображений. Проведена оценка точности измерений цифровой оптической системы с использованием навесного датчика осевых деформаций.

В третьей главе проведены экспериментальные исследования механического поведения композитов в зонах концентраторов с учетом структурных и размерных параметров. Получены результаты оценки влияния размера концентратора напряжений относительно параметров структуры слоисто-волоконистого композиционного материала при изучении процессов неупругого деформирования и разрушения. Получены опытные данные о влиянии масштабного эффекта на процессы инициирования и развития дефектов в области концентраторов напряжений в структурно-неоднородном материале при квазистатическом нагружении. Проведен анализ эволюции неоднородных полей деформаций на поверхности трехмерно-армированных композитных образцов исследуемой структуры. Проанализированы варианты осреднения деформаций в рабочей зоне испытываемых образцов с помощью дополнительных инструментов системы Vic-3D.

В четвертой главе получены экспериментальные данные при растяжении и совместном растяжении с кручением, демонстрирующие наличие неоднородных полей деформаций, а также изменение деформаций в окрестности дефекта. Получены опытные данные о закономерностях развития дефектов и формировании условий макроразрушения в композитных образцах при статических испытаниях. Проведена оценка влияния циклических испытаний на поведение композитов с дефектами.

В пятой главе представлены экспериментальные результаты по измерению деформаций в образцах из полимерного композиционного материала с помощью встроенных волоконно-оптических датчиков деформаций и бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D. Подтверждена достоверность регистрации деформаций встроенными в полимерный композиционный материал встроенными волоконно-оптическими датчиками деформаций при многократном нагружении, определены калибровочные коэффициенты.

В заключении представлены основные результаты по теме диссертационной работы.

Благодарность

Автор выражает благодарность своему руководителю доктору физико-математических наук, профессору Вильдеману Валерию Эрвиновичу за научное руководство исследованиями. Автор выражает особую признательность за ценные советы и рекомендации члену-корреспонденту Российской академии наук Ломакину Евгению Викторовичу, академику Российской академии наук Матвеевко Валерию Павловичу, доктору технических наук профессору Аношкину Александру Николаевичу и кандидату физико-математических наук Третьяковой Татьяне Викторовне, а также сотрудникам Центра экспериментальной механики ПНИПУ за поддержку и помощь при проведении экспериментов.

1. ЗАКОНОМЕРНОСТИ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НАЛИЧИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ

Настоящая глава посвящена литературному обзору иностранных и российских публикаций, в которых отражены вопросы изучения закономерностей деформирования и разрушения материалов в условиях наличия неоднородных деформационных полей. Рассмотрены литературные источники, посвященные анализу напряженно-деформированного состояния материала в области концентраторов напряжений с использованием различных оптических методов. Отдельное внимание уделено литературе, в которой авторы используют метод корреляции цифровых изображений в области экспериментальной механики.

1.1. Актуальные вопросы теоретического исследования проблемы концентрации напряжений

Большое количество экспериментальных исследований, посвященных таким явлениям, как хрупкое и вязкое разрушение, потеря устойчивости, усталость, ползучесть и др. позволили объяснить снижение конструкционной прочности реальных ответственных объектов при эксплуатации. Рост мощности машин и оборудования, увеличение весовых показателей и габаритов конструкций в сочетании с широким использованием сварки, болтовых и клеевых соединений, применением сложных кинематических систем и экстремальные условия эксплуатации привели к возникновению дополнительных негативных факторов, оказывающих особое влияние на уровень конструкционной прочности:

- повышенные и пониженные температуры,
- нестационарные режимы и скорость нагружения,
- повышение объемности напряженного состояния, масштабный фактор,
- запас упругой энергии в конструкции,
- **концентрация напряжений,**

- остаточные напряжения,
- дефектность и т.д [44].

С учетом всех перечисленных выше факторов появляется необходимость учета их и оценки при изготовлении конструкций. Концентрации напряжений являются одним из основных факторов, определяющих прочность конструкции, и поэтому исследование влияния различных типов концентраторов на поведение композитных элементов конструкций и поиск путей снижения концентрации напряжений является одной из актуальных задач современной механики. В соответствии с определением, которое дает Мавлютов Р.В. в книге [40], под концентрацией напряжений понимается значительное местное изменение поля напряжений в деформируемом теле, которое может быть вызвано различными причинами: конструктивными (резкое изменение формы и размеров сечений деталей, нарушение сплошности отверстиями и вырезами, инородные включения с отличными от основного материала механическими свойствами и т.д.); технологическими (резкое различие механических свойств материала в поверхностном слое и в основном объеме в результате той или иной термомеханической обработки, наличие трещин технологического происхождения и т.д.); концентрацией внешних воздействий (силовых, температурных); трещинами, возникшими в связи с начавшимся разрушением в процессе эксплуатации [40].

Изучению проблемы концентрации напряжений посвящено множество работ зарубежных и отечественных ученых, это связано с актуальностью проблемы в научном и практическом отношении. Работы следующих авторов содержат фундаментальные результаты анализа распределения напряжений вокруг концентраторов различной геометрии в рамках аналитических и численных методов. Впервые решение плоской задачи теории упругости о распределении напряжений около кругового отверстия было получено В. Киршем [109]. В широкой пластине около малого эллиптического отверстия при растяжении, решение получено Инглисом [104] в 1913 г. и Г.В. Колосовым, выточки

разнообразных форм исследовались Нейбером [46], метод конформных отображений был развит в трудах Н.И. Мухелишвили [45], Г.Н. Савина [63].

Напряженное состояние в пластине с большим числом круговых отверстий, впервые изучалось Г.Н. Бухариновым [9]. Различные аспекты этой проблемы рассматривались в работах В.Т. Койтера [110], Л.А. Фильштинского [75], Р.Д. Миндлина [128], Ю.А. Устинова [73, 74], А.С. Космодамианского. Концентрация напряжений около отверстий в толстой плите при упругих деформациях изучена И.И. Воровичем и О.С. Малкиной [21].

Исследование напряженного состояния около отверстий в оболочках впервые было выполнено А.И. Лурье [39]. А также ряд работ авторов А.Н. Гузь и Ван ФоФы, в которых предлагаются различные способы исследования концентрации напряжений в сферических оболочках, ослабленных несколькими отверстиями [11, 24].

Изучением проблемы концентрации напряжений занимались многие научные школы, известны работы отечественных и зарубежных исследователей: Аннина Б.Д., Ильичева А.В., Карпова Е.В., Легана М.А., Лехницкого С.Г., Мавлютова Р.Р., Москвичева В.В., Мухелишвили Н.И., Раскутина А.Е., Тимошенко С. Apple F.J., Koerner D.R., Atsumi A., Barrata F.I., Cole A.G., Cowper G.R., Dixon J.R., Durelli A.J., Flynn P.D., Frocht M.M., Hamada M., Hooke C.J., Kikukawa M., Murakami Y., Pilkey W.D., Pilkey D.F., Seng G. Tan и многие другие.

Актуальным и важным направлением научных исследований является оценка циклического ресурса конструкций при многоосном напряженном состоянии и наличии концентраторов напряжений. Исследования данного вопроса отражены в работах современных авторов: Бураго Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С., Шанявский А.А., Macha W., Carpinteri A., McDowell D.L., Dang Van K., Findley W.N., Glinka G., Lagoda T., Papadopoulos I.V., Socie D.F., Wang C.H., Palin-Luc T., Saintier N., Morel F. и другие [8, 33, 38, 91, 111, 134, 144]. Знание основных вопросов надежности механических систем со сложными реологическими свойствами в условиях циклического режимов нагружения отражены в работах Глазунов Л.П., Львович Г.В., Матвеевский В.Р., Радченко В.П., Саушкин М.Н. и др. [60, 61].

Теоретические и экспериментальные исследования, посвященные особенностям механического поведения композиционных материалов в зонах концентрации напряжений представлены в работах следующих исследователей: Вильдеман В.Э., Панин В.Е., Сапожников С.Б., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А., Трусов П.В., а также научные группы в Университете Аризоны, США, проф. Франтзисконис (University of Arizona, USA, George Frantziskonis), Тринити Колледже, Ирландия, проф. Тейлор (Trinity College, Ireland, David Taylor) [98, 99], Sutton M.A., J.-J. Orteu, H. Schreier, Yu Wang, Alberto M. Cuitino, Wang Z.Y., LI H.Q., Tong J.W., Shen M., Aymerich F., Priolo P., Shih-Heng Tung, Chung-Huan Sui, F. Hild, S. Roux, Heinz Neuber и многие другие.

1.2. Использование оптических методов механики деформируемого твердого тела для исследования неоднородных полей деформаций

Детальное изучение напряженного и деформированного состояния в области концентрации напряжений в условиях упругости, пластичности и ползучести является обязательной частью общего прочностного расчета ответственных конструкций и важной предпосылкой для создания целесообразных и надежных конструкций [40]. Определяющее место при исследовании концентрации напряжений занимают экспериментальные методы. Они имеют самостоятельное значение в случае, когда теоретические способы решения поставленной задачи отсутствуют или малоэффективны, и вспомогательное – при необходимости проверки аналитических решений, для развития и создания моделей неупругого поведения [40].

История развития и современное состояние экспериментальных методов исследования свойств материалов отражены в фундаментальных работах Алтури С., Белла Ф. Дж., Дэлли Д., Кобаяси А. Методическими вопросам экспериментальной механики материалов уделено внимание в работах авторов: Беккер Э., Букетин Б.В., Вольмир А.С., Вильдеман В.Э., Горбатовский А.А.,

Дюрелли А., Кестер И., Керштейн И.М., Кисенко И.Д., Ключников В.Д., Ломакин Е.В., Станкевич А.И., Стерн Ф., Фрейер Г., Холл Дж.

После того, как выдвинут критерий прочности или пластичности в виде определенной гипотезы для материалов некоторого класса, он должен быть экспериментально проверен. И чем больше проведено экспериментов по проверке гипотезы, тем она становится более надежной, и тем яснее становятся границы применимости [22].

В классических критериях прочности предполагается что разрушение начинается при достижении максимальным эквивалентным напряжением предельного значения хотя бы в одной точке. Но в условиях концентрации напряжений данное условие не всегда справедливо. Одним из первых исследований по оценке локальной прочности в зоне концентрации напряжений является градиентная модель локального повышения предела выносливости, предложенная в 1933 году С.В. Серенсенем. Значительный вклад в развитии данного направления внесли Афанасьев Н.А., Востров А.М., Давиденков Н.Н., Иванов А.М., Леган М.А., Леонов М.Я., Матвиенко Ю.Г., Морозов Н.Ф., Новожилов В.В., Новопашин М.Д., Петров Ю.В., Полилов А.Н., Русинко К.Н., Сукнев С.В., Татусь Н.А. и многие другие [34, 41, 47, 57, 66].

Основы нелокальных критериев разрушения зарубежных школ были заложены в работах Wleghard К. [173], Neuber Н. [133], Waddoups, Eisenmann и Kaminski [168], Williams и Ewing [177], Lajtai [116]. В дальнейшем эти подходы были развиты в работах [3, 31, 43, 94, 108, 122, 127, 143, 146, 147, 159, 161, 172, 178, 180] и других. Наибольшее распространение получили критерии средних напряжений и напряжений в точке, введенные Whitney и Nuismer [172].

Основным отличием представленных нелокальных от классических критериев является то, что расчет осуществляется с учетом структурного параметра размерности длины. Таким образом, полученная величина эквивалентного напряжения является прочностной характеристикой материала и полагается константой.

Концентрация напряжений описывается макроскопическими параметрами: коэффициентами концентрации напряжений и градиентом изменения напряжений. Коэффициенты концентрации определяются различными методами, включая непосредственные измерения деформаций, применение методов фотоупругости, использование методов теории упругости и проведение расчетов методом конечных элементов.

Исследование напряжений методом фотоупругости было до недавнего времени самым широко распространенным способом изучения распределения напряжений и определения коэффициентов концентрации напряжений около различных геометрических особенностей. Численные значения коэффициентов концентрации для разнообразных геометрических особенностей и различных видов нагружения приведены в работе [54].

Метод конечных элементов является расчетным и самым распространенным методом вычисления коэффициентов концентрации напряжений, среди экспериментальных методов можно выделить применение механических или электрических экстензометров с малой базой, метод хрупких лаковых покрытий, метод дифракции рентгеновских лучей, а также оптические методы [54].

Для анализа напряженно-деформированного состояния деформируемых элементов конструкций широко применяются оптические методы, такие как поляризационно-оптические методы (Албаут Г.Н., Ахметзянов М.Х., Барышников В.Н., Бойко Б.Б., Воронцов В. К., Губкин С.И., Добровольский С.И., Полухин П. И., Хесина Г.Л. и другие [1, 2, 23, 42, 58]), геометрический и интерференционный муар (Иванов А.Н., Сухарев И.П., Ушаков Б.Н.), голографическая и лазерная спекл-интерферометрия (Воронцов В.К., Джоунс Р, Кудрин А.Б., Островский Ю.И., Полухин П.И., Уайкс К., Чиченев Н.А., Щепинов В.П., Яковлев В.В.), теневой оптический метод каустик [6, 20, 58, 62], а также метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) (англ. digital image correlation) [154].

Различные оптические методы в механике деформируемого твердого тела широко используются при изучении механических свойств материалов и анализе напряженно-деформированного состояния деформируемых элементов машин и

конструкций, при проектировании и отработке прочности конструкций, дефектоскопии. Преимущество данных методов заключается в том, что они позволяют получать данные о состоянии материала в режиме реального времени на стадиях упругопластического и неупругого деформирования при накоплении повреждений и разупрочнении [13, 14, 70]. Использование оптических методов представлены в работах следующих авторов: Албаут Г.Н., Александров А.Я., Афанасьев А. М., Ахметзянов М.Х., Барышников В.Н., Вишнецкий З.Д., Вольмир А. С., Григорьевич Ю. П., А. Кобаяси, Марьин В. А., Пангаев В.В., Разумовский И.А., Станкевич А. И., Табанюхова М.В., Харинова Н.В., и другие. [1, 2, 6, 19, 20, 62, 76]. Широкое применение оптических методов в экспериментальной механике в основном обусловлено тем, что данные методы являются неразрушающими и бесконтактными, а также позволяют исследовать напряженно-деформированное состояние материалов на различных стадиях деформирования [13].

В частности, одним из новых и перспективных бесконтактных методов анализа напряженно-деформированного состояния материалов является метод корреляции цифровых изображений (КЦИ). Благодаря своей универсальности, метод КЦИ является одним из наиболее часто используемых методов, и многие современные публикации свидетельствуют об этом [86, 87, 106, 119, 125, 153].

В 1982 году в работе [138] Peters W. H. и Ranson W. F. впервые был упомянут методе КЦИ при измерении перемещений и деформаций в предположении, что существует взаимно-однозначное соответствие между изображениями до и после деформирования.

С использованием бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D, математической аппарат, которой основан на методе КЦИ, становится возможным исследовать напряженно-деформированное состояние материала в области концентратора, в точке возникновения трещины, а также характеризовать состояние, которое предшествует разрушению. Данная система предназначена для бесконтактного трехмерного измерения перемещений и деформаций на поверхности объектов разной геометрии при различных видах испытаний, как статических, так и динамических [13, 70].

Эффективность данного метода при проведении экспериментальных исследований в широком диапазоне скоростей показана в работах следующих авторов: Avril S., Asundi A., Chalal H., Gao J., Goktepe S., Lord J.D., Mendez Dies J., Meraghni F., Miehe C., Orteu J.-J., Pan B., Penn D., Pierron F., Schreier H., Sutton M.A., Xie H., Whitehead P., G. Murasawa, R. Takahashi, T. Morimoto, S. Yoneyama, Бурков М.В., Бяков А.В., Панин С.В., Любутин П.С., Третьякова Т.В. и другие [120, 126, 154].

Для исследования дефектов, трещин, отслоений, возникающих в композиционных материалах, применяется не только метод КЦИ, но и такие методы, как ультразвуковая дефектоскопия, рентген, термография, акустическая эмиссия АЭ, а также и расчетные методы и др. [36, 53, 90, 157]. Перспективным направлением экспериментальной механики является совместное использование представленных методов. В работах авторов показана возможность совместного использования различных систем неразрушающего контроля: Бурков М.В., Бяков А.В., Любутин П.С., Панин С.В., Третьякова Т.В., G. Murasawa, R. Takahashi, T. Morimoto, S. Yoneyama, Syed Yasir Alam, Jacqueline Saliba, Ahmed Loukili и другие [50, 51, 132, 178]. Метод КЦИ является взаимодополняющим к другим системам. С помощью оптического метода КЦИ становится возможным путем визуального контроля идентифицировать типы дефектов, а также оценить их размер, оценить величину деформации в области концентрации. В работе [51] авторы применяли комбинированный способ исследования деформации и разрушения (тензометрия-КЦИ-АЭ) для анализа деформационного поведения нагруженных углеродных образцов.

Кроме того, имеется опыт использования оптической системы для экспериментального изучения полей деформаций в телах с концентраторами и анализ условий разрушения при упругопластическом и закритическом деформировании [18, 68, 151, 163, 164, 167]. В статье [17] использование видеосистемы позволило зарегистрировать не только изменения деформаций в рабочей зоне и на контрольном участке, но и оценить влияние периферийных участков на процесс деформирования.

В последнее время вырос интерес к исследованию проблем концентрации деформаций и напряжений именно с использованием метода КЦИ, о чем свидетельствует большое количество работ зарубежных и отечественных ученых: Sutton M.A., J.-J. Orteu, H. Schreier, Yu Wang, Alberto M. Cuitino, Wang Z.Y., LI H.Q., Tong J.W., Shen M., Aymerich F., Priolo P., Shih-Heng Tung, Chung-Huan Sui, Ya. L. Ivanyts'kyi, L. I. Muravs'kyi, F. Hild, S. Roux, работы Ильичева А.В., Раскутина А.Е., Кибиткин В.В., Напряшкин А.А., Плешанов В.С., Солодушкин А.И. и другие.

С учетом того, что установка Vic-3D является мобильной, то становится возможными испытания готовых конструкций и конструктивно-подобных элементов под нагрузкой при эксплуатации, а также поиск и оценка опасно нагруженных элементов непосредственно в условиях реальной работы конструкции. Ряд работ посвященным методическим особенностям применения программного обеспечения Vic-3D: Запольский Д.В., Зеньков Е.В., Ломов С.В., Рычко Н.П., Третьякова Т.В., Цвик Л.Б., L. Wittevrongel, P. Lava, D. Debruyne, P.L. Reu, W. Sweatt, T. Miller, D. Fleming, и другие [26, 69, 129, 135, 166, 171].

Среди современных и перспективных средств регистрации деформаций большой интерес представляют системы мониторинга конструкций, основанные на внедрении в материал волоконно-оптических датчиков деформаций (ВОДД): Брагин А.А., Варжель С.В., Гуляев И.Н., Гуняев Г.М., Зуев М.А., Ильичев А.В., Кузнецов А.Б., Лукьянов А.В., Матвеев В.П., Махсидов В.В., Плехов О.А., Раскутин А.Е., Сарбаев Б.С., Селезнев В.А., Серьезнов А.Н., Смердов А.А., Таирова Л.П., Федотов М.Ю., Шардаков И.Н., Шиенок А.М., Mohammad Kashfuddoja, R.G.R. Prasath, Hadzic R., Pohoryles D.A., Melo J., Rossetto T., Fabian M., John S., Jensen D., Pascal J., August J. Herszberg I. Papantoniou A., Rigas G., Alexopoulos N. Pereira G., Frias C., Faria H., Yashiro S., Takeda N., Okabe T. [27, 29, 59, 64, 123, 137, 141].

С целью обеспечения надежности системы мониторинга при эксплуатации реальных изделий требуется развитие методов оценки адекватности сигналов, полученных с оптоволоконных датчиков при действии нагрузок сложного вида. Измерение деформации с помощью ВОДД на брэгговских решетках дает

сравнимые результаты с измерениями, полученными с помощью экстензометра, тензодатчика, а также различных оптических методов. Для подтверждения достоверности полученных данных можно использовать и метод корреляции цифровых изображений [129, 141].

1.3. Особенности механического поведения композиционных материалов в зонах концентрации напряжений, масштабные эффекты деформирования

Волокнистые полимерные композиты широко используются во всех областях аэрокосмической, автомобильной, электронной энергетики и машиностроения, что дает ряд преимуществ при использовании по сравнению с металлами. Концентраторы различной геометрии, отверстия круглой или эллиптической формы, обычно появляются в композитных конструктивных элементах для облегчения сборочных операций, из-за структурных дефектов в материале или повреждений, возникающих в конструкции при эксплуатации [89, 145, 149].

Наиболее распространенным подходом, встречаемым в литературе, при изучении поведения композитных объектов является приведение рассматриваемых материалов в общем случае к однородным с некоторыми эффективными характеристиками. С помощью данного подхода удается достаточно точно описать статическое поведение композитных объектов, все геометрические размеры которых существенно превышают характерный размер структурной неоднородности исследуемого композита. Но при решении задач, нацеленных на исследование концентрации напряжений, возникающих вблизи трещин, вырезов, различных геометрических отверстий и технологических дефектов, имеющих размеры, сравнимые с характерным размером структуры, рассматривать композит как однородное тело не представляется возможным [30, 48].

Одна из первых попыток решить проблему процесса разрушения композитов с отверстием на растяжение является работа Chow CL, Xian XJ, Lam J. [88] с использованием муар интерферометрии, где исследуются различные композитные

выкладки для образцов с отверстием и испытания надрезанного образца при испытаниях на растяжение. Более сложные и новые экспериментальные исследования были выполнены в работах Lagattu и Brillaud J, Lafarie-Frenot M.C., Lam T.Q. [114, 115] с использованием метода КЦИ для наблюдения за эволюцией деформаций вблизи отверстия во время испытания.

Испытания на сжатие были выполнены Aljibori и другими соавторами [79] на пластинках из стеклопластика с круглыми вырезами и без них для того, чтобы оценить влияние расположения отверстия, в зависимости от ориентации волокна в материале, на предельную нагрузку. Подобные эксперименты также были проведены Abu и др. [155], чтобы оценить влияние вырезов на многослойной композитной пластине.

Авторами Беспаловым В. А., Гоцелюк Т. Б., Коваленко Н. А., Олегиным И. П. в работе представлен подход, который основан на модели развивающегося повреждения для оценки прочности слоистых углепластиковых образцов с различными концентраторами напряжений методом конечных элементов [7]. В работе предложены рекомендации по использованию того или иного критерия прочности в зависимости от типа концентратора напряжений применительно к исследуемым композитам.

Измерения поля деформаций на поверхности также очень важны для проверки распределения деформаций в нагруженном образце, где присутствует локальный контакт между болтом и отверстием. Lanza Di Scalea F., Hong S.S., Cloud G.L. в своей работе [117] сравнили распределение деформаций, полученное с помощью метода конечных элементов и метода спеклинтерферометрии. Авторами Pierron F., Cerisier F., Gre'diac M. в работе [139] была поставлена аналогичная задача, но выполнялась с помощью метода сеток.

Подразумевается, что с увеличением размеров тела увеличиваются и размеры дефектов, которые могут в нем присутствовать. Когда размеры тела становятся достаточно большими, размеры дефектов могут стабилизироваться, может стабилизироваться и прочность, но во многих случаях этого не происходит и масштабный эффект сохраняется [65, 25, 37].

Чувствительность композиционного материала к отверстиям различной геометрии с точки зрения механических характеристик зависит от многих факторов, например, от размера и толщины композита, размера и геометрии концентратора, качества обработки нанесенного отверстия. Все эти факторы влияют на механические свойства, изменяя степень роста повреждений при нагружении, взаимодействуя друг с другом, усиливают рост дефектов.

Одним из широко исследуемых явлений, встречаемых в литературе, с точки зрения оценки прочности объектов с концентратором, является «эффект размера отверстия», при котором происходит очевидно снижение прочности композита по мере увеличения диаметра отверстия при постоянной концентрации напряжений по всей ширине образца. Данное явление хорошо известно с семидесятых годов [172], ряд экспериментов [100] и аналитические модели [81, 85, 158] выявили противоположные тенденции влияния размера на прочность [100]. Например, при использовании толстослойных блоков, где разрушение вызвано расслаиванием [100], увеличение размеров образцов для испытаний на растяжение с отверстием привело к увеличению прочности. Ранние работы в области масштабирования композитов с концентратором были сосредоточены на разработке полуэмпирических аналитических моделей для прогнозирования прочности, всесторонний обзор приведен в работе [81], авторами Авербух и Мадукар.

В научной литературе отмечается, что сложность структуры композиционных материалов приводит к необходимости рассматривать дефекты на различных уровнях и на разных стадиях изготовления компонентов, материалов и изделий. Данная проблема подробно описана в работах [32, 35, 97, 101, 103, 107, 121, 148], также в приведенных работах выявлено наличие нескольких механизмов разрушения: отслаивание, разрыв волокон, разрушение связующего. Кроме того, авторами было отмечено, что разрушение обычно наблюдается в области, не совпадающей с точкой максимального коэффициента концентрации осредненных напряжений.

Приведенные работы позволяют сделать вывод о теоретической и практической значимости экспериментальных исследований процессов деформирования и разрушения в зонах концентрации напряжений композитных конструкций с учетом структурных особенностей.

Основные выводы по главе 1

На основе анализа публикаций в ведущих отечественных и зарубежных журналах, научных докладов на международных и всероссийских конференциях к числу актуальных направлений в области механики деформируемого твердого тела можно отнести следующие.

1. Развитие методологических основ использования оптических методов регистрации неоднородных деформационных полей в телах сложной геометрии.
2. Получение новых знаний о структурных особенностях, масштабных эффектах деформирования и разрушении композитных объектов.
3. Изучение особенностей механического поведения композиционных материалов в зонах концентрации напряжений.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ЦИФРОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящей главе представлена методика проведения эксперимента с использованием цифровой оптической системы для трехмерного анализа полей перемещений и деформаций, описан её состав и принцип работы. Рассмотрены основные методические вопросы обработки данных с использованием метода корреляции цифровых изображений. Сформулированы математические основы вычислительного аппарата системы, также проведены тестовые испытания с целью отработки методики проведения эксперимента на композитных структурах с использованием цифровой оптической системы.

2.1. Основные теоретические положения метода корреляции цифровых изображений

Метод корреляции цифровых изображений (КЦИ), в англоязычной литературе известный как Digital image correlation (DIC), – это бесконтактный оптический метод регистрации полей перемещений и деформаций на поверхности объекта. Вся информация содержится в структуре (распределении пикселей) на поверхности испытываемого объекта с различной степенью яркости черно-белого изображения. Стоит отметить, что распределение пикселей на поверхности объекта сохраняется при деформировании во время съемки, допускается только перемещение, поворот, удлинение и/или искажение в соответствии с прикладываемой нагрузкой, т.е. предполагается соответствие между фотографиями изображения до и после деформирования [13, 70, 154].

Алгоритм данного метода включает в себя два основных этапа: построение поля векторов перемещений и последующий расчет компонент деформации.

Пусть центральная точка P переместилась из исходного положения u в деформированное v , на рис. 2.1. представлен вектор перемещения элемента поверхности исследуемого объекта [154].

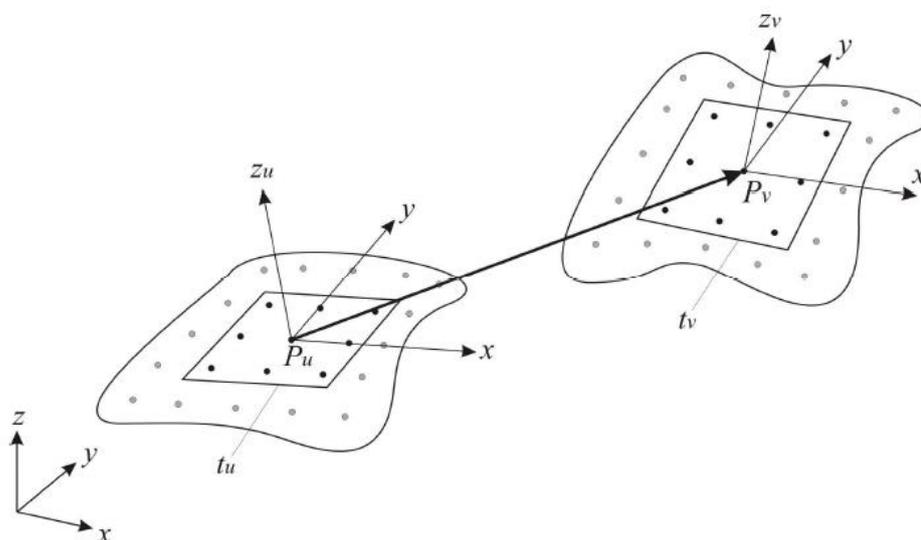


Рис. 2.1. Определение трёхмерного вектора перемещения в процессе деформирования

Для вычисления перемещения точки P на снятом изображении выделяется квадратный участок. Даже при почти идеальных условиях эксперимента будут существовать различия между интенсивностью изображений, записанных в разное время. Эти изменения могут быть вызваны различными причинами, например, изменениями освещения, изменениями отражательной способности образца из-за деформации или изменениями ориентации образца.

Необходимо отметить, что процедура идентификации участков изображений осуществляется путем вычисления коэффициента соответствия изображений (χ) (по заданному критерию) и поиске его минимума [154].

$$\chi_{SSD} = \sum_i (G_i - F_i)^2 \text{ - сумма квадратов разностей;} \quad (2.1)$$

$$\chi_{ZSSD} = \sum ((G_i - \bar{G}) - (F_i - \bar{F}))^2 \text{ - сумма квадратов разностей с нулевым средним;} \quad (2.2)$$

$$\chi_{NSSD} = \sum \left(\frac{\sum F_i G_i}{\sum G_i^2} G_i - F_i \right)^2 - \text{нормированная сумма квадратов} \quad (2.3)$$

разностей;

$$\chi_{ZNSSD} = \sum \left(\left(\frac{\sum \bar{F}_i \bar{G}_i}{\sum \bar{G}_i^2} G_i - \bar{G} \frac{\sum \bar{F}_i \bar{G}_i}{\sum \bar{G}_i^2} \right) - (F_i - \bar{F}) \right)^2 - \text{нормированная} \quad (2.4)$$

сумма квадратов разностей с нулевым средним;

$$\chi_{NCC}^2 = 1 - \frac{\sum_i F_i G_i}{\sqrt{\sum_i F_i^2 \sum_i G_i^2}} - \text{нормированная кросс-корреляция}; \quad (2.5)$$

$$\chi_{SAD} = \sum_i |F_i - G_i| - \text{сумма абсолютных разностей, где} \quad (2.6)$$

χ — коэффициент соответствия изображений,

F_i — значения уровней интенсивности (яркости) пикселей для первого (опорного) изображения,

G_i — значения уровней яркости пикселей для второго (последующего) изображения [70, 154].

В данной работе используется критерий нормированной суммы квадратов разностей с нулевым средним (2.4), так как он наименее чувствителен к изменению освещения в ходе испытания. После того, как найден минимум коэффициента соответствия изображений (χ) можно определить вектор перемещения, который определяется, как разница квадратных участков изображения в исходном (u) и в деформированном (v) положении [70, 136, 160].

При известных векторах перемещений каждой точки поверхности и её начальной геометрии могут быть вычислены деформации. Они могут быть получены непосредственно путем дифференцирования смещения соседних точек поверхности либо путем анализа искажений каждой соседней грани, которые используются для корреляции. В ходе постобработки системой Vic-3D в данной работе осуществлялось вычисление компонент деформаций с помощью тензора конечных деформаций в представлении Лагранжа $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} u_{k,j})$.

2.2. Методические вопросы обработки данных с использованием метода корреляции цифровых изображений

На точность бесконтактной оптической системы влияют технические характеристики объективов и цифровых камер, а именно чувствительность матрицы, разрешающая способность и возможная частота съемки [70, 154]. В таблице 2.1. представлены характеристики камер и объективов, используемых в работе, всего в исследовании применяется три комплекта камер.

Таблица 2.1. Описание технических характеристик камер и объективов

Название	Разрешающая способность	Максимальная частота съемки (при максимальном разрешении)	Цветопередача	Объективы
Скоростные камеры Point Grey Reserch Gazzel	2048 x 2048 4 Мп	150 кадр/с	ч/б	17 мм, 35 мм, 50 мм Schneider
Камера Prosilica GE4900	4872 x 3248 16 Мп	3 кадр/с	ч/б	21 мм f/2,8 35 мм f/2,0 50 мм f/1,4 Zeiss Distagon
Камера Q-400	4 Мп	20 кадр/с	ч/б	28 мм f/2,0 Schneider Kreuznach Xenoplan

На точность получаемых экспериментальных данных также влияет поверхность образца. Перед испытаниями, до нагружения объекта на поверхность необходимо нанести мелкодисперсное покрытие. С помощью которого обеспечивается достоверное определение перемещений и повышается контрастность исследуемой поверхности. В данной работе на поверхность образца наносилась совокупность черных и белых точек с помощью аэрозольной краски.

При установке камер на определенном расстоянии от испытуемого объекта необходимо учитывать фокусное расстояние используемых объективов. У камер с фиксированным фокусным расстоянием при выборе определенного объектива следует отталкиваться от основной поставленной цели при проведении испытания, а также от геометрических размеров испытуемого образца. С объективами, имеющими малое фокусное расстояние, камеры можно установить близко к образцу и тем самым получится отследить развитие трещин в области концентраторов и дефектов на поверхности образца, учитывая структурные особенности. Используя объективы с различным фокусным расстоянием становится возможным изучать процессы разрушения на различных структурных и масштабных уровнях. При этом особая роль в работе отводится структурному уровню регистрации деформаций, при котором учитывается структура материала и изучаются процессы деформирования и нарушения сплошности, на данном уровне удастся выявлять характерные стадии разрушения.

Расстояние между камерой и образцом необходимо обеспечить таким, чтобы образец полностью заполнял поле обзора камеры. Если размер образца превышает поле обзора, то произойдет потеря данных, если образец меньше поля обзора – это скажется на пространственной разрешающей способности. Так как система является трехмерной, в работе съемка осуществляется двумя камерами, то на точность влияет величина угла взаимного расположения камер, которые должны располагаться симметрично относительно образца. В литературе отмечено, что угол между камерами должен составлять $15 \div 45^\circ$.

После установки камер важно осуществить корректную настройку резкости и отрегулировать яркость изображения, для этого необходимо произвести настройку апертуры объектива и установку времени экспозиции камеры. Открытие апертуры приводит к тому, что на сенсор попадает больше света. Использование большей апертуры позволяет получить более яркое изображение. Однако также уменьшается глубина резкости – диапазон, в котором фокусировка является резкой. Время освещения сенсора камеры перед считыванием нового изображения. Большее время экспозиции делает изображение ярче, однако также приводит к

размытию, если в процессе съемки происходят значительные перемещения. Если изменились условия освещения в помещении, где производилась съемка, в отличие от апертуры, время экспозиции можно изменять после калибровки системы [154].

После размещения камер и выполнения проверки точности фокуса и апертуры необходимо произвести калибровку. С этого момента изменение параметров системы камер может нарушить калибровку, поэтому все настройки должны быть тщательно зафиксированы. Правильная калибровка камер оказывает существенное влияние на эффективность работы всей системы.

На точность корреляционной обработки цифровых фотографий, полученных при съемке видеосистемой, существенное влияние может оказать эпиполярная ошибка проецирования p . Она содержит такие свойства, как сдвиг и поворот одного ракурса относительно другого. Отклонения значений эпиполярной ошибки выше среднего указывает на возможные проблемы с калибровкой или синхронизацией камер, размытостью изображения, камеры установлены не жестко на поверхности. Если вычисленное значение эпиполярной ошибки находится не близко к эпиполярной линии, то эти данные из расчета удаляются [69, 154].

Каждой точке x на изображении левой камеры соответствует эпиполярная линия l' на изображении правой камеры. При этом пара для x на изображении правой камеры может лежать только на соответствующей эпиполярной линии. Аналогично, каждой точке x' на правом изображении соответствует эпиполярная линия l на левом. Эпиполярную геометрию используют для поиска стереопар, и для проверки того, что пара точек может быть стереопарой (т.е. проекцией некоторой точки пространства). Пусть имеется пара откалиброванных камер, и пусть x — однородные координаты точки на изображении одной камеры, а x' — на изображении второй. Существует такая матрица F размера 3×3 , что пара точек x , x' является стереопарой тогда и только тогда, когда:

$$x'^T F x = 0 \quad (2.7)$$

Матрица F называется фундаментальной матрицей (fundamental matrix). Ее ранг равен 2, она определена с точностью до ненулевого множителя и зависит только от матриц исходных камер P и P' .

Выбор подходящих параметров постобработки также играет важную роль при исследовании полей перемещений и деформаций на поверхности композитных пластин. В качестве примера на рис. 2.4-2.5 представлены характерные неоднородные поля деформации ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{xy} , полученные при различных параметрах постобработки, а именно, размер подмножества составил $X = 31$ пиксель и шаг $\Delta X = 3 \div 15$ пикселей [176] при испытаниях на одноосное растяжение углепластиковых пластин с постоянной скоростью удлинения $u'_0 = 5$ мм/мин.

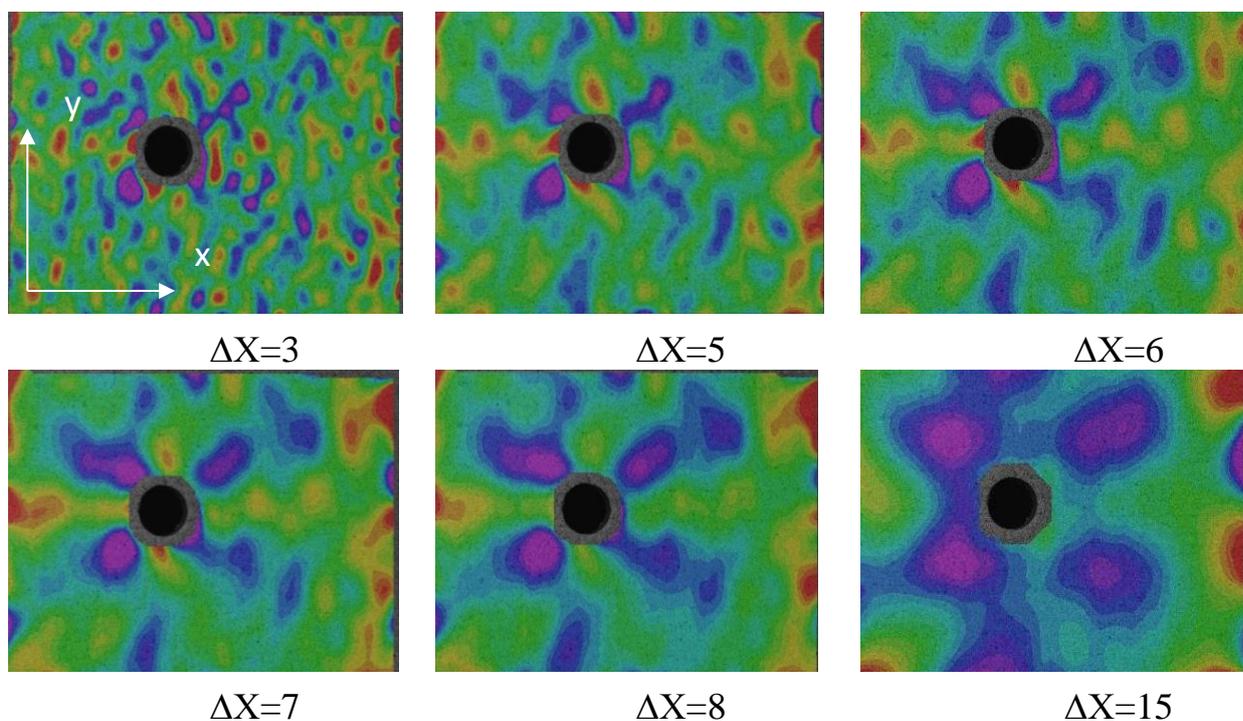


Рис. 2.3. Поля поперечных деформаций ε_{xx} на поверхности пластины при нагрузке равной 105 кН

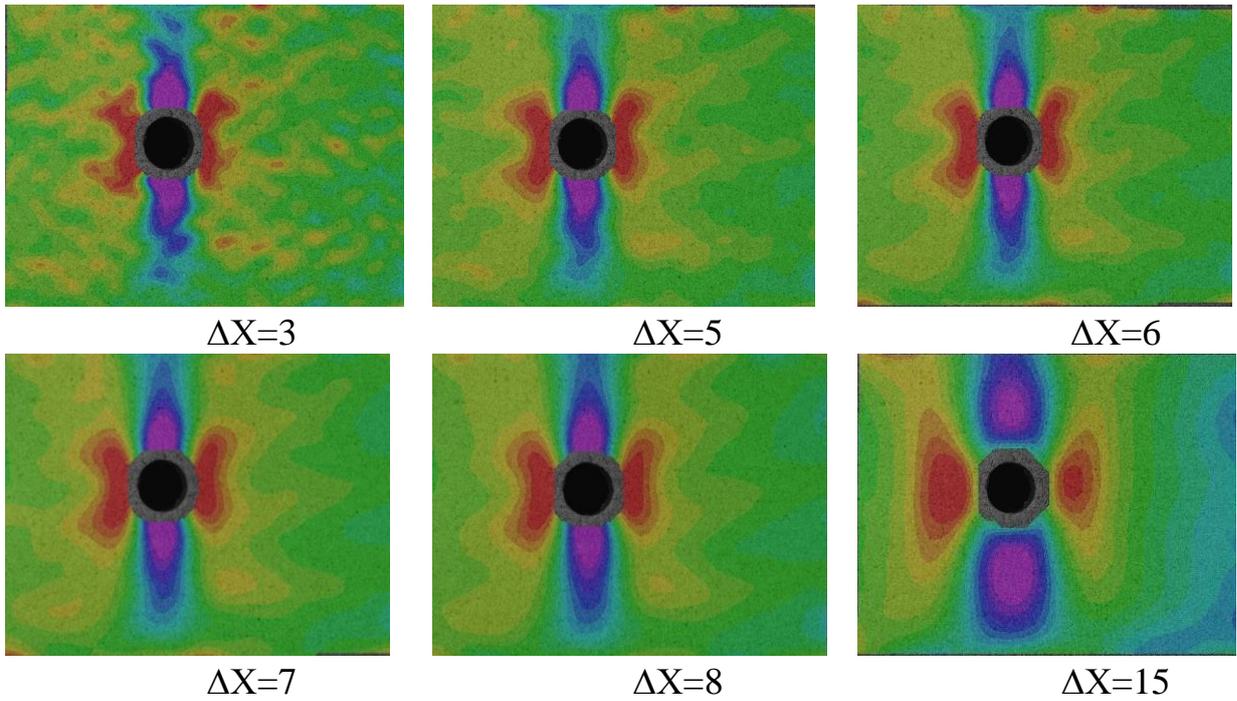


Рис. 2.4. Поля продольных деформаций ϵ_{yy} на поверхности пластины при нагрузке равной 105 кН

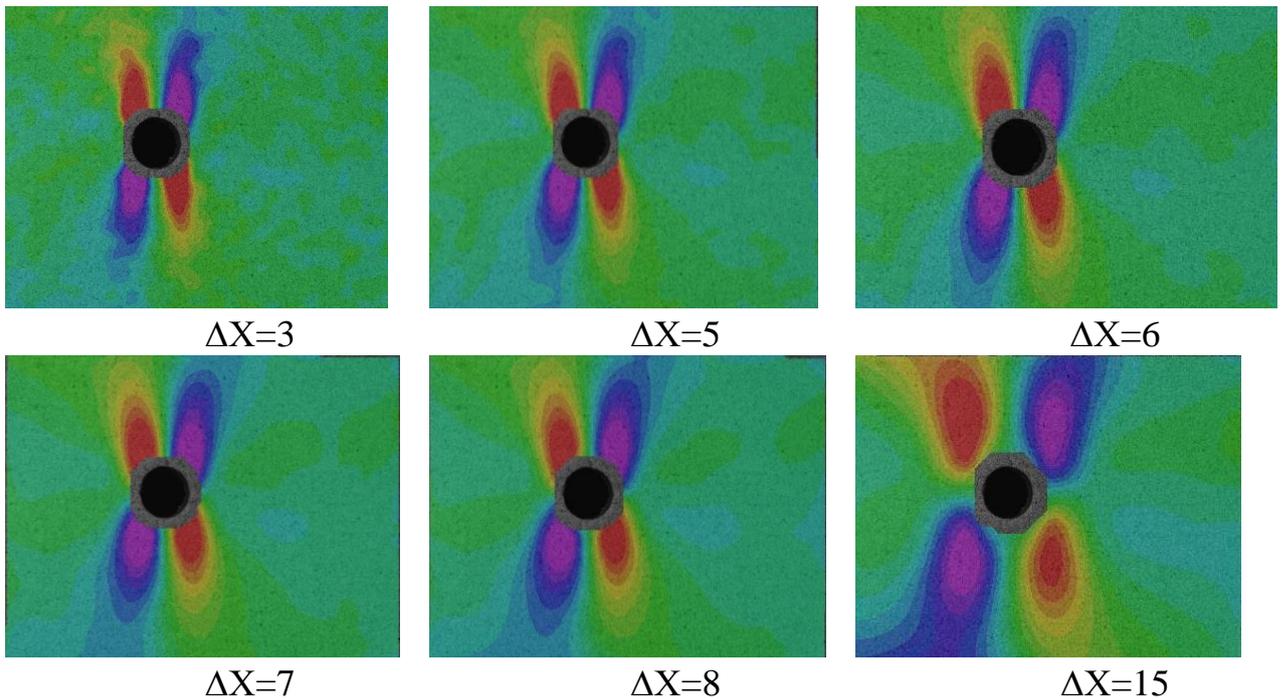


Рис. 2.5. Поля сдвиговых деформаций ϵ_{xy} на поверхности пластины при нагрузке равной 105 кН

Неоднородные поля поперечных, продольных и сдвиговых деформаций чувствительны к изменению параметра ΔX . По мере возрастания параметра ΔX

получается более сглаженная размытая картина. Поэтому подходящими параметрами корреляционной обработки в данном случае являются $X = 31 \times 31$ пикселей, $\Delta X = 7$ пикселей [176]. Для того чтобы правильно подобрать параметры корреляционной обработки необходимо проводить детальный анализ.

2.3. Методика использования бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы при исследовании неоднородных полей деформаций на поверхности композитных объектов

В данном разделе ставилась задача численной оценки влияния параметров корреляционной обработки на неоднородные поля деформаций на поверхности композитных образцов. При обработке цифровых фотографий вычисления векторов смещений производятся не в каждой отдельной точке изображения (в пикселе), а путем дискретизации области исследования на небольшие локальные подобласти, или, другими словами, подмножества (площадки корреляции), размером $X \times X$ пикселей (англ. subset) [69, 70, 154]. Размер подмножества оказывает существенное влияние на точность корреляционного анализа, на степень детализации полей перемещений и деформаций по поверхности исследуемого объекта, а также на размер краевой зоны, возникающей на краю или вблизи концентраторов напряжений (отверстий, включений, трещин, дефектов). Величина шага (англ. step) задает расстояние в пикселях между точками (центральными пикселями подмножества), которые анализируются в процессе математической обработки [154].

Выбор величины подобласти (X) и шага (ΔX) осуществляется в соответствии с условиями произведенной съёмки, с результатами калибровки стереосистемы, а также в зависимости от геометрических параметров объекта исследования и структурных особенностей материала образца. В программном обеспечении при установлении соответствия изображений для каждого подмножества вычисляется статистическая доверительная область — доверительный интервал соответствия

(σ) в данной точке изображения (в пикселях) [70, 154]. В научной литературе отмечается, что размер подобласти является допустимым, если среднее значение доверительного интервала не превышает $\sigma \leq 0,01$ [70, 154].

С целью подбора подходящих параметров корреляционной обработки применительно к композиционным материалам, которые отличаются значительной неоднородностью структуры на поверхности, проведена серия вычислений полей деформаций для одного кадра при значениях подобласти в интервале $X=9 \div 89$ пикселей и при фиксированном значении шага $\Delta X=5$ для образца с попарно межслойным комбинированным армированием. Результаты представлены в таблице 2.2, где приведены максимальные (σ_{max}), средние (σ_{mean}), и минимальные (σ_{min}) значения доверительного интервала, а N — количество точек в области исследования.

Из полученных данных следует, что подобласть размером 49×49 пикселей является подходящей, для которой $\sigma_{mean} = 0,0065$, $\sigma_{max} = 0,0109$ и $\sigma_{min} = 0,0028$. Выбранный размер подобласти 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 [71].

Таблица 2.2. Результаты корреляционной обработки изображения при различных значениях подобласти и фиксированном значении шага $\Delta X=5$

X	N	σ_{mean}	σ_{max}	σ_{min}
9	11463	0,0209	0,0785	0,0049
15	12187	0,0160	0,0789	0,0037
19	13995	0,0130	0,0760	0,0034
29	13403	0,0097	0,0360	0,0028
39	12791	0,0078	0,0208	0,0027
49	12187	0,0065	0,0109	0,0028

X	N	σ_{mean}	σ_{max}	σ_{min}
59	11591	0,0056	0,0099	0,0026
69	11003	0,0049	0,0078	0,0026
79	10423	0,0043	0,0068	0,0025
89	9851	0,0039	0,0058	0,0024

Ниже на рис. 2.6. представлена зависимость среднего значения доверительного интервала σ_{mean} от размера подобласти X:

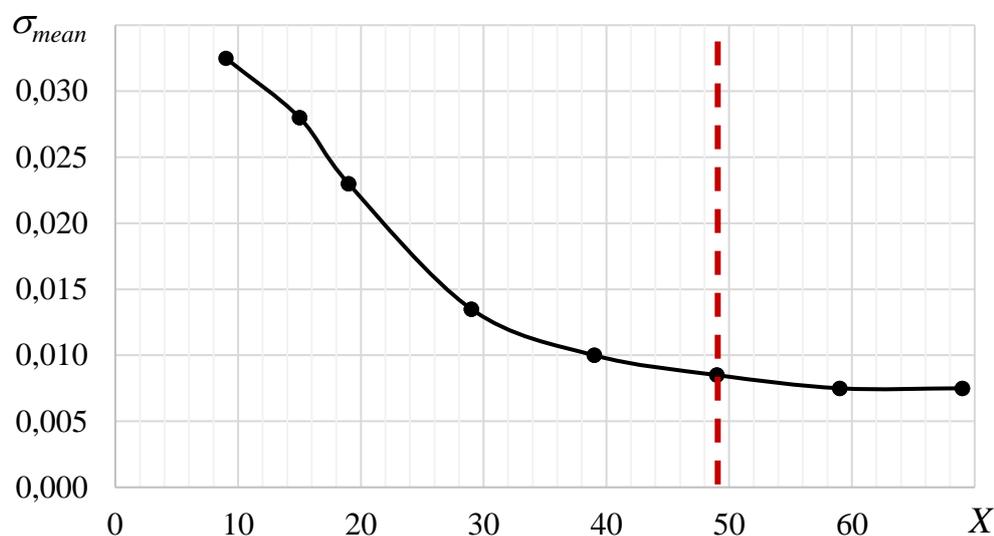


Рис. 2.6. Влияние размера подобласти на результаты вычисления среднего значений доверительного интервала

После того, как осуществили выбор подходящего размера подобласти необходимо подобрать величину шага ΔX , при помощи которого варьируется степень детализации полей перемещений и деформаций [69]. С этой целью проведена корреляционная обработка одного изображения для образца с попарно межслойным комбинированным армированием при значениях шага в интервале $\Delta X=1\div 15$ пикселей и при фиксированном значении подобласти $X=49\times 49$ пикселей (таблица 2.3).

Чем меньше значение шага (ΔX), тем более детализированное получается поле перемещений и деформаций за счёт увеличения количества расчётных точек (N). В то же время большое число N приводит к существенному возрастанию времени корреляционного анализа в программном обеспечении видеосистемы [69]. По мере увеличения параметра ΔX происходит сглаживание неоднородностей, наблюдается осреднение максимальных и минимальных величин, регистрируемых на поверхности образца, размытие структурных особенностей композиционного материала и увеличение краевой области (рис. 2.6.) [71].

Таблица 2.3. Результаты корреляционной обработки изображения при различных значениях шага и фиксированном значении подобласти $X=49$

ΔX	N	σ_{mean}	σ_{max}	σ_{min}
1	304586	0,0065	0,0144	0,0028
3	33828	0,0065	0,0143	0,0028
5	12187	0,0065	0,0139	0,0028
7	6215	0,0065	0,0135	0,0028
9	3741	0,0065	0,0129	0,0028
11	2503	0,0065	0,0124	0,0028
13	1797	0,0065	0,0119	0,0028
15	1350	0,0065	0,0119	0,0030

Как видно из полученных результатов (таблица 2.3.) выбор величины шага на точность полученных данных не влияет. Стоит отметить, что речь идет о средних значениях по всей поверхности образца. Для иллюстрации результатов на рис. 2.6. и рис. 2.7 представлены неоднородные поля продольных деформаций для композитного образца с попарно-межслойным комбинированным армированием (шифр Е) при различной величине шага $\Delta X=1\div 15$ и фиксированном размере подобласти $X=49$ [71].

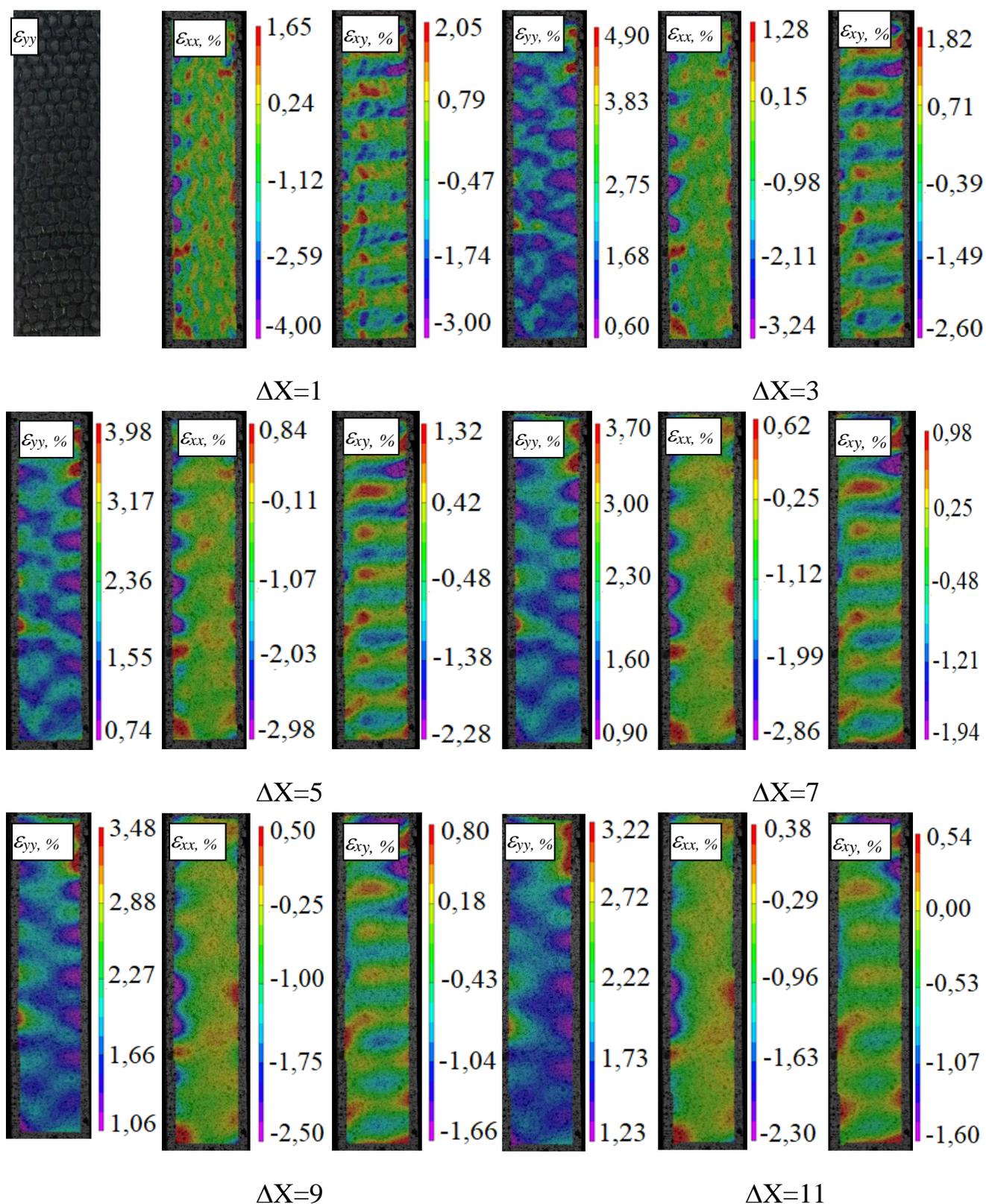


Рис. 2.6. Фотография поверхности образца и неоднородные поля продольных, поперечных и сдвиговых деформаций для образца с попарно-межслойным комбинированным армированием (шифр Е) при различной величине шага $\Delta X=1 \div 11$ и фиксированном размере подобласти $X=49$

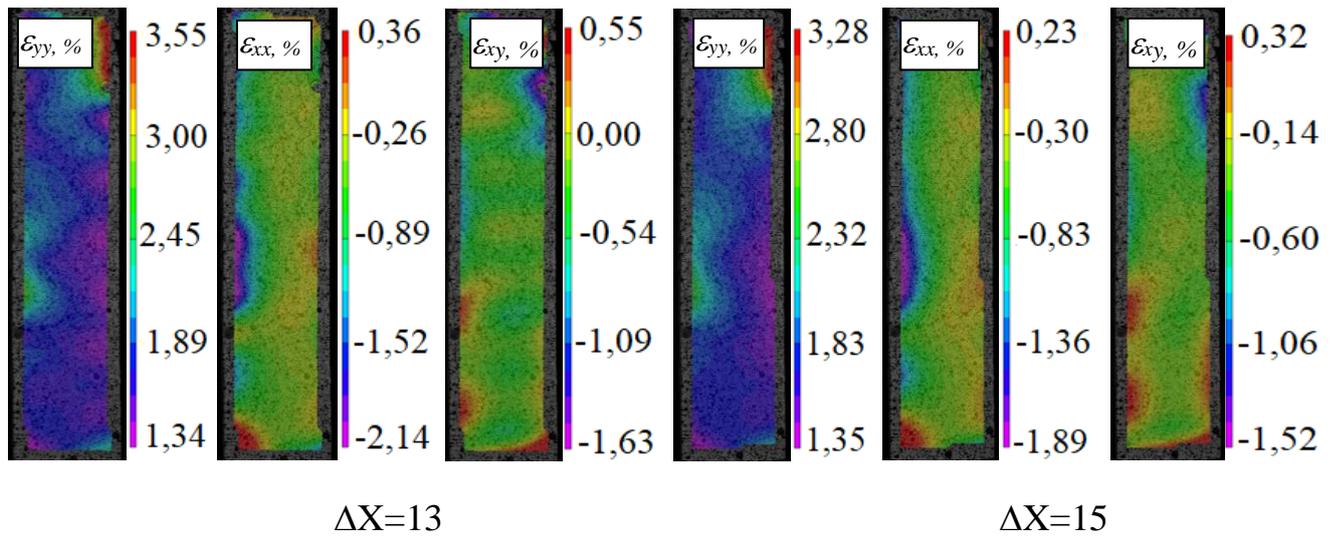


Рис. 2.7. Неоднородные поля продольных, поперечных и сдвиговых деформаций для образца с попарно-межслойным комбинированным армированием (шифр Е) при различной величине шага $\Delta X=13, 15$ и фиксированном размере подобласти $X=49$

Стоит отметить, что в работе учитываются структурные особенности, возникающие на поверхности композиционного материала, и в соответствии с ними осуществляется выбор величины шага ΔX . Значение величины шага ΔX зависит от размеров структурного элемента материала (δ), который определяется по фотографии, полученной с помощью стереомикроскопа Carl Zeiss SteREO Discoverjy.V12 (рис. 2.8).

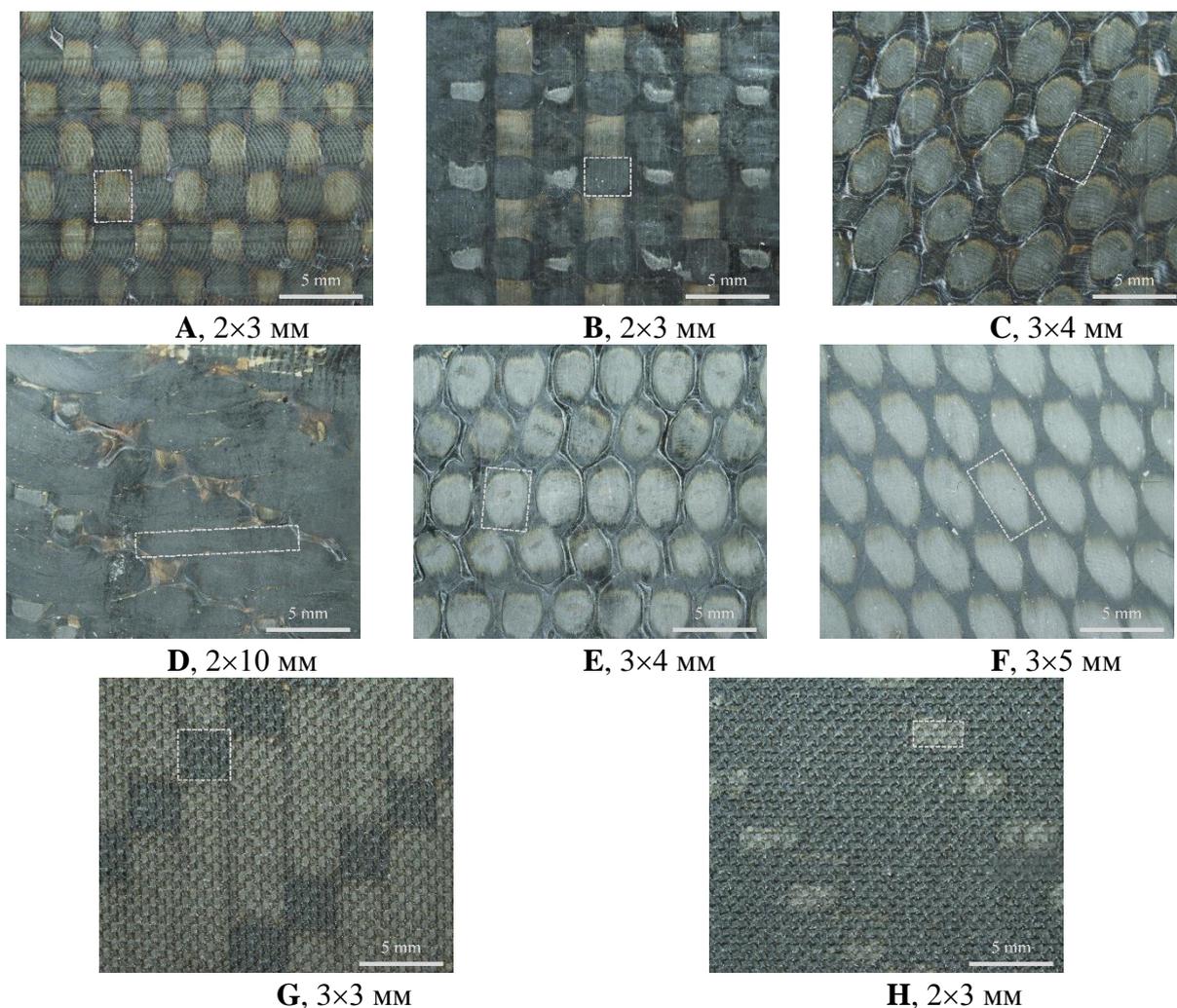


Рис. 2.8. Фотография поверхности образцов трехмерно-армированных композитов различных схем переплетения с выделенным структурным элементом (δ)

Таким образом, для рассмотренной схемы переплетения (шифр E) подходящим размером шага является $\Delta X=5$, так как данный размер позволяет учитывать структурные особенности композиционного материала (см. рис. 2.7) и в значительной степени сокращает время расчета по сравнению с $\Delta X<5$. Аналогичный подбор подходящих параметров корреляционной обработки цифровых изображений выполнен для всех образцов с различной схемой переплетения. В качестве примера на рис. 2.9. представлены неоднородные поля продольных деформаций при фиксированном размере подобласти и различной величине шага для разных структур композиционного материала [71].

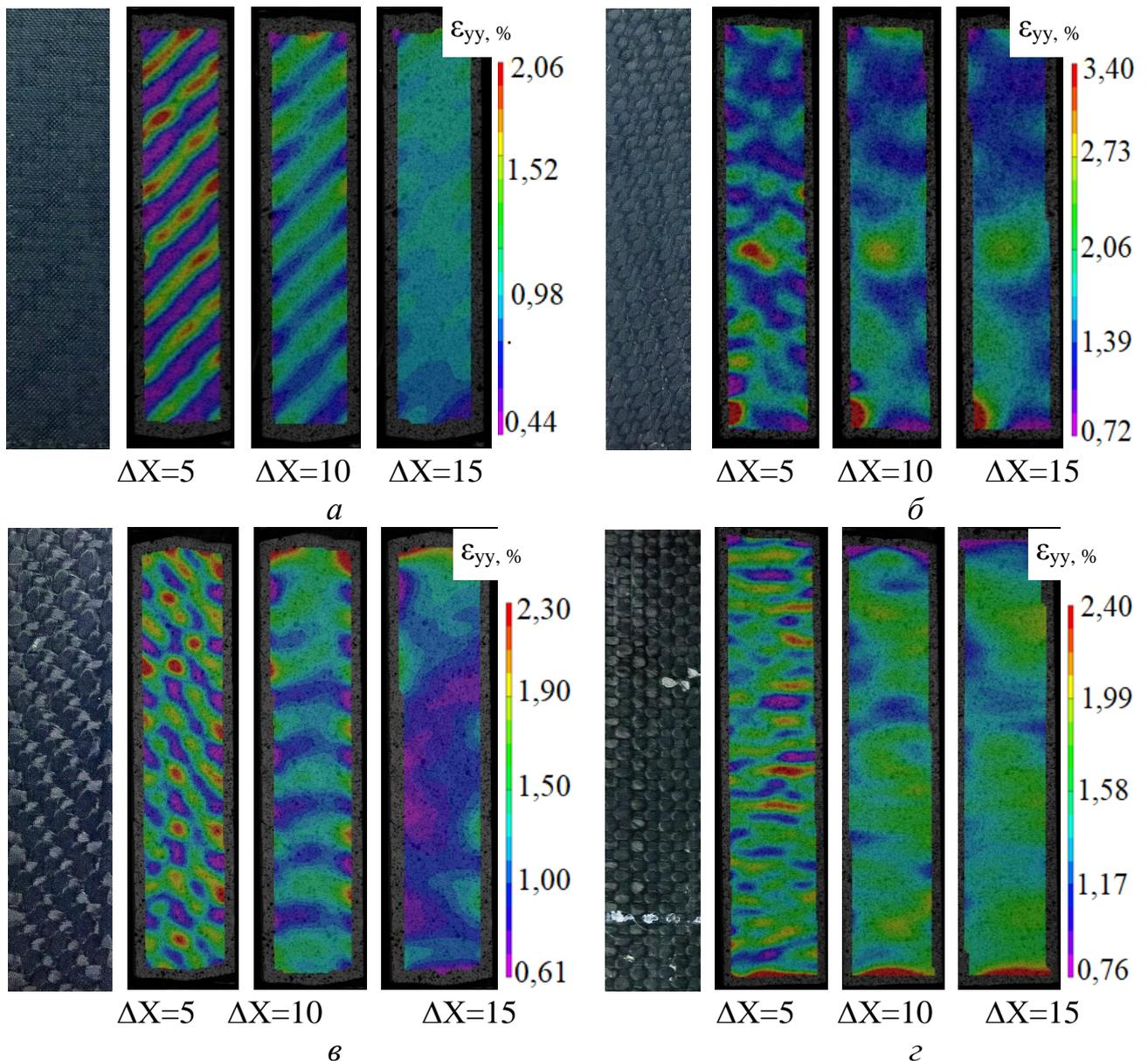


Рис. 2.9. Неоднородные поля продольных деформаций при фиксированном размере подобласти и различной величине шага для разных структур композиционных материалов

В связи с тем, что параметры численной обработки изображений оказывают существенное влияние на результаты построения полей перемещений и деформаций, при представлении результатов, полученных на основе применения метода корреляции цифровых изображений, следует указывать размер подмножества (X), величину шага (ΔX), количество точек (N) для области исследования и размер структурного элемента композиционного материала (δ) [69, 71] (таблица 2.4).

Таблица 2.4. Параметры корреляционного анализа для полимерных композитных образцов с различной схемой армирования

Шифр образца	X, п	ΔX , п	N	δ , мм	l , мм
A	43	3	20383	2×3	0,083
B	47	3	21985	2×3	0,076
C	55	5	13650	3×4	0,076
D	51	5	19529	2×10	0,084
E	49	5	10622	3×4	0,085
F	49	5	12548	3×5	0,077
G	55	3	18500	3×3	0,081
H	51	3	17914	2×3	0,080

Стоит отметить, что подбор параметров корреляционного анализа должен осуществляться с учетом размера структурной неоднородности материала, учитывая это, можно влиять на масштабный уровень регистрации деформаций. С целью измерения структурных деформаций необходимо устанавливать более мелкий шаг, учитывая структуру материала. В соответствии с рис. 2.10.

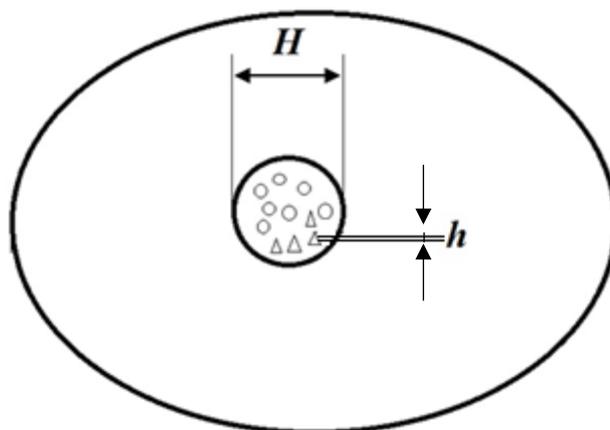


Рис. 2.10. Характерные масштабы

Структурный уровень h – это уровень структурной неоднородности. Его масштаб меньше характерного размера частицы включения или диаметра волокна. При этом регистрируются деформационные изменения на элементе структуры. Задачи о концентрации напряжений, поставленные в данном исследовании, решаются на данном уровне. Следующий уровень макроскопический H , при котором $H > h$, но меньше характерного размера изделия или расстояния, на котором осредненные напряжения и деформации изменяются заметно.

По результатам проведенных исследований выделены следующие рекомендации по выбору подходящих параметров расчета методом КЦИ при анализе неоднородных полей деформаций композиционных материалов.

1. При выборе величины шага (ΔX) стоит учитывать задачу исследования, а именно, при использовании видеосистемы в качестве «виртуального экстензометра», для определения общих характеристик материала, когда нет необходимости учитывать структурные особенности материала, следует выбирать большие значения шага (ΔX). Расчет деформаций осуществляется на макроскопическом уровне (H).

2. 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 (ΔX), сопоставимую с размером структурной неоднородности (δ). Расчет деформаций на структурном уровне (h).

2.4 Оценка точности измерений цифровой оптической системы с использованием навесного датчика осевых деформаций

Для подтверждения точности измерений, полученных с помощью трехмерной цифровой оптической системы Vic-3D, проведен ряд испытаний на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5989 с использованием навесного экстензометра. В качестве исследуемого материала рассматривается полимерный композиционный материал на основе препрега

стеклопластика. Методика определения точности измерений видеосистемы предполагала одновременную регистрацию деформации на композитном образце с одной стороны с помощью системы Vic-3D, а с обратной стороны – навесным экстензометром [72]. Характеристики экстензометра Instron 2620-601 следующие: максимальное возможное отклонение от измеряемой величины 0,15 %. Измерительная база навесного экстензометра составила 50 мм.

Съемка производилась с помощью камер Q-400 с разрешением 4 Мп и со скоростью съемки 15 кадров в секунду. Регистрация продольной деформации осуществлялась с использованием дополнительного модуля программного обеспечения Vic-3D «виртуальный экстензометр (Т)» [68]. Принцип его действия аналогичен принципу действия механического навесного экстензометра и предполагает отслеживание взаимного смещения между двумя точками поверхности образца в соответствии с прикладываемой нагрузкой. Основными достоинствами при использовании «виртуального экстензометра» являются: бесконтактная регистрация деформаций, нет механического воздействия на поверхность образца; и возможность применения нескольких «виртуальных экстензометров (Т)» на одном образце, при чем как в продольном, так и в поперечном направлении, что приводит к повышению точности фиксируемых деформаций [72]. На рис. 2.11. приведен график зависимости продольной деформации (ϵ_{yy}) от времени (t) по данным, полученным с навесного экстензометра и «виртуального экстензометра (Т)».

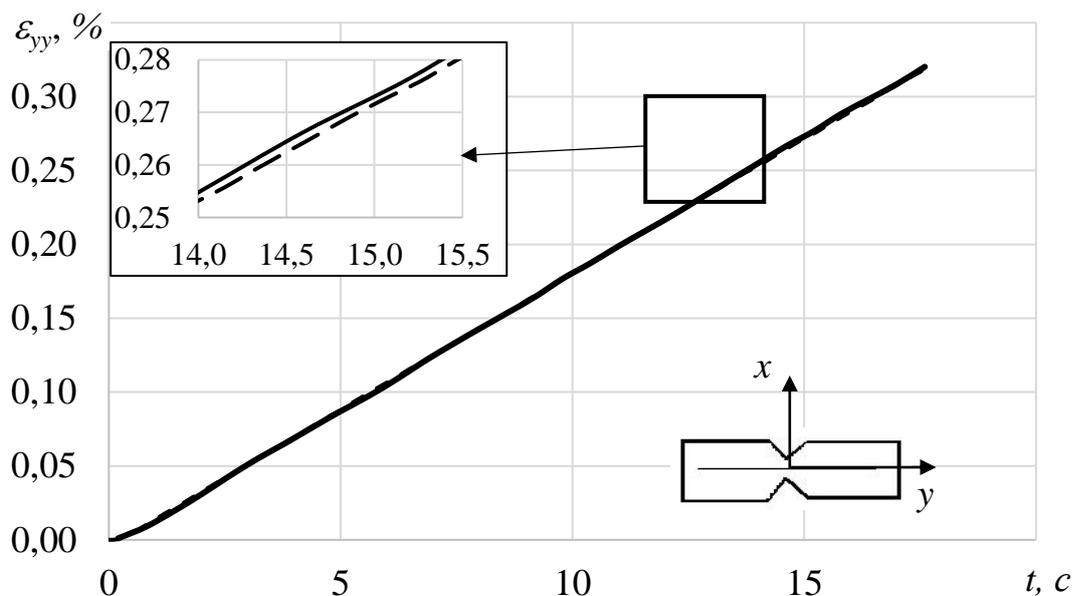


Рис. 2.11. График зависимости продольной деформации (ϵ_{yy}) от времени (t) по данным, полученным с навесного экстензометра (пунктирная линия) и «виртуального экстензометра (Т)» (сплошная линия)

При этом ось Oy направлена вдоль образца (вдоль оси растяжения), ось Ox — перпендикулярно оси нагружения в плоскости образца. Для наглядности полученной зависимости участок от 14 до 15,5 секунд с отклонением по продольным деформациям (ϵ_{yy}) на графике увеличен (рис. 2.11). Максимальное отклонение значений, полученных с навесного экстензометра и значений с «виртуального экстензометра (Т)», составило 1 %. По результатам испытания сделан вывод, что применение цифровой оптической системы Vic-3D позволяет определять значения деформации на фиксированной базе, с точностью, сопоставимой с данными навесного датчика продольных деформаций [15].

Основные выводы по главе 2

1. Проанализированы основные вопросы математической обработки данных с использованием метода корреляции цифровых изображений, влияющие на точность регистрируемых данных.

2. Отмечены особенности использования численной обработки экспериментальных данных с использованием метода корреляции цифровых изображений при исследовании неоднородных полей деформаций композиционных материалов с учетом структурных особенностей.

3. Приведены рекомендации по выбору подходящих параметров расчета (размера подобласти (X) и шага (ΔX)), методом корреляции цифровых изображений при анализе неоднородных полей деформаций композиционных материалов.

4. Проведена оценка точности измерений цифровой оптической системы с использованием навесного датчика осевых деформаций.

3. АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТОВ В ЗОНАХ КОНЦЕНТРАТОРОВ С УЧЕТОМ СТРУКТУРНЫХ И РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ

В данной 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.

3.1. Анализ закономерностей неупругого деформирования композитных образцов в условиях наличия неоднородных деформационных полей

Материалом, использованным в этом исследовании, является стеклотекстолит СТЭФ. Это слоистый армированный стеклопластик, полученный методом горячего прессования стеклотканей, пропитанных термореактивным связующим на основе совмещенных эпоксидной и фенолформальдегидной смол. Стеклотекстолит применяется в системах изоляции крупных механизмов и машин, гидро- и турбогенераторов, деталях электротехнического назначения.

Сверление отверстия в композитной детали приводит к перерезанию нитей и потере прочности при растяжении материала. Центральные отверстия образцов были просверлены с использованием вертикальных сверл различного диаметра. Испытания проводились на электромеханической системе Instron 5989 с использованием камер Prosilica 35 мм и 21 мм. Сплошные образцы были испытаны для определения основных механических свойств со скоростью удлинения $u'_0=2$ мм/мин. Всего было испытано по 4 образца вдоль каждого направления (по утку и по основе).

Полученные средние значения по свойствам (модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν) представлены в таблице 3.1. Продольная и поперечная деформация регистрировалась с использованием дополнительного модуля программного обеспечения видеосистемы «виртуальный экстензометр (Т)» [68].

Таблица 3.1. Механические характеристики стеклотекстолита СТЭФ

Направление	E , МПа	ν
По утку	$2,85 \cdot 10^4$	0,14
По основе	$2,83 \cdot 10^4$	0,10

Для отработки методики и оценки влияния структурного элемента проводились испытания образцов на одноосное растяжение с разной величиной диаметра сквозного отверстия $d=2,4,6,12,18$ мм со скоростью удлинения $u'_0=2$ мм/мин. Как видно из полученных результатов, приведенных на рис. 3.1, прочность композитного образца уменьшается с увеличением диаметра отверстия.

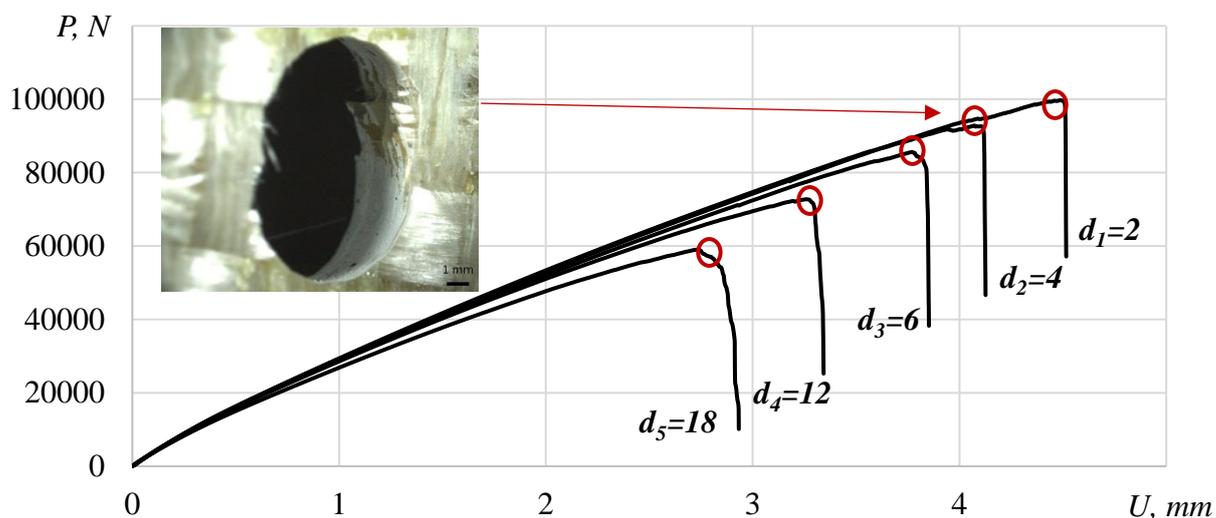


Рис. 3.1. Диаграмма нагружения для образцов с различными диаметрами отверстия при испытаниях на одноосное растяжение

Более подробно на рис. 3.2. представлен сравнительный анализ ниспадающих участков диаграмм для диаметров d_1-d_5 в соответствии с диаграммой нагружения на рис. 3.1. Для каждой кривой в таблице 3.2. записаны значения максимальной нагрузки (P) и соответствующее перемещение (U).

Таблица 3.2. Значения максимальной нагрузки (P) и соответствующее перемещение (U) для образцов различного диаметра d_1 - d_5

Обозначение	d , мм	P, кН	U, мм
d_1	2	99,7	4,49
d_2	4	92,8	4,07
d_3	6	85,6	3,77
d_4	12	72,7	3,26
d_5	18	59,0	2,73

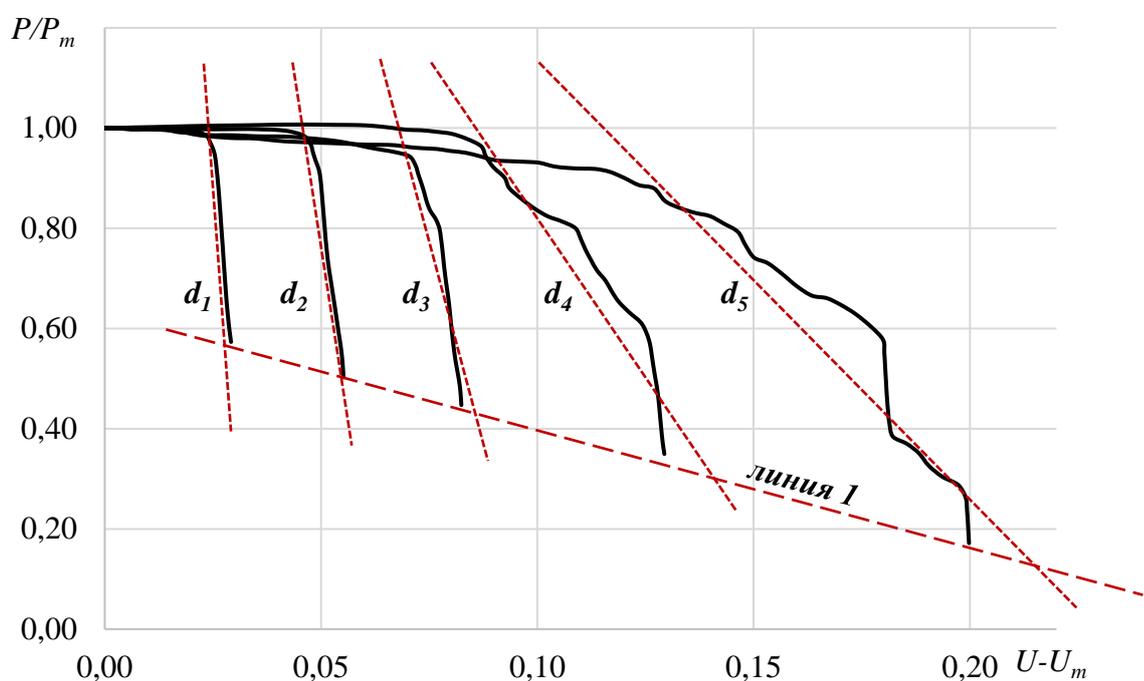


Рис. 3.2. Сравнительный анализ ниспадающих участков диаграмм, полученных на образцах с отверстиями разного диаметра

Из полученных данных видно, что по мере увеличения диаметра ниспадающие участки удлиняются (линия 1), увеличивается степень реализации критической стадии [175]. Угол наклона (модуль спада) кривых также изменяется. Анализ поврежденности композиционного материала вследствие развития макротрещин проводился с использованием стереомикроскопа Carl Zeiss SteREO Discoverjy.V12 на верхних двух слоях. В области больших деформаций

вокруг отверстия с обеих сторон наблюдается разрыв волокон, свидетельство этого приведено на фотографиях поверхности образца (рис. 3.3, *а, б, в*). На рис. 3.3. представлено визуальное сравнение зон разрушения на первом (рис. 3.3, *а, б, в, г*) и на втором слое (рис. 3.4, *д, е, ж, з*) исследуемого материала. Поперечные трещины матрицы инициировались в богатых смолой каналах, где присутствует концентрация деформации, и распространялись по ширине от отверстия к краю образца, поперек приложения нагрузки. Поперечный разрыв вызвал дальнейшее расслоение между жгутами основы и утка и, в конечном итоге, привел к разрыву жгута основы и связующего. Если сравнивать характер разрушения композиционного образца на первом и на втором слое, то повреждения имеют схожую топологию.

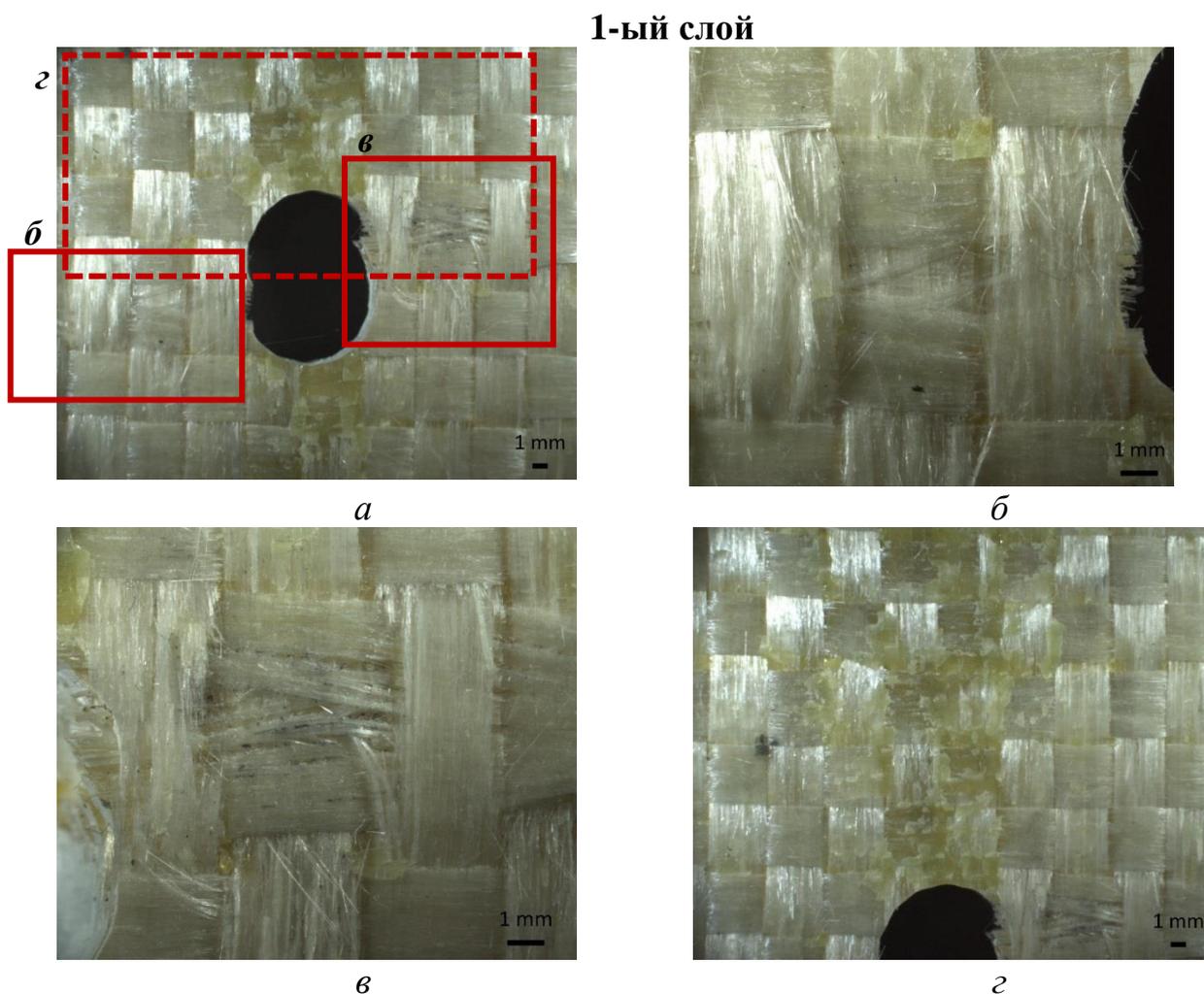


Рис. 3.3. Фотографии структуры стеклотекстолита СТЭФ после разрушения образца на первом слое

2-ой слой

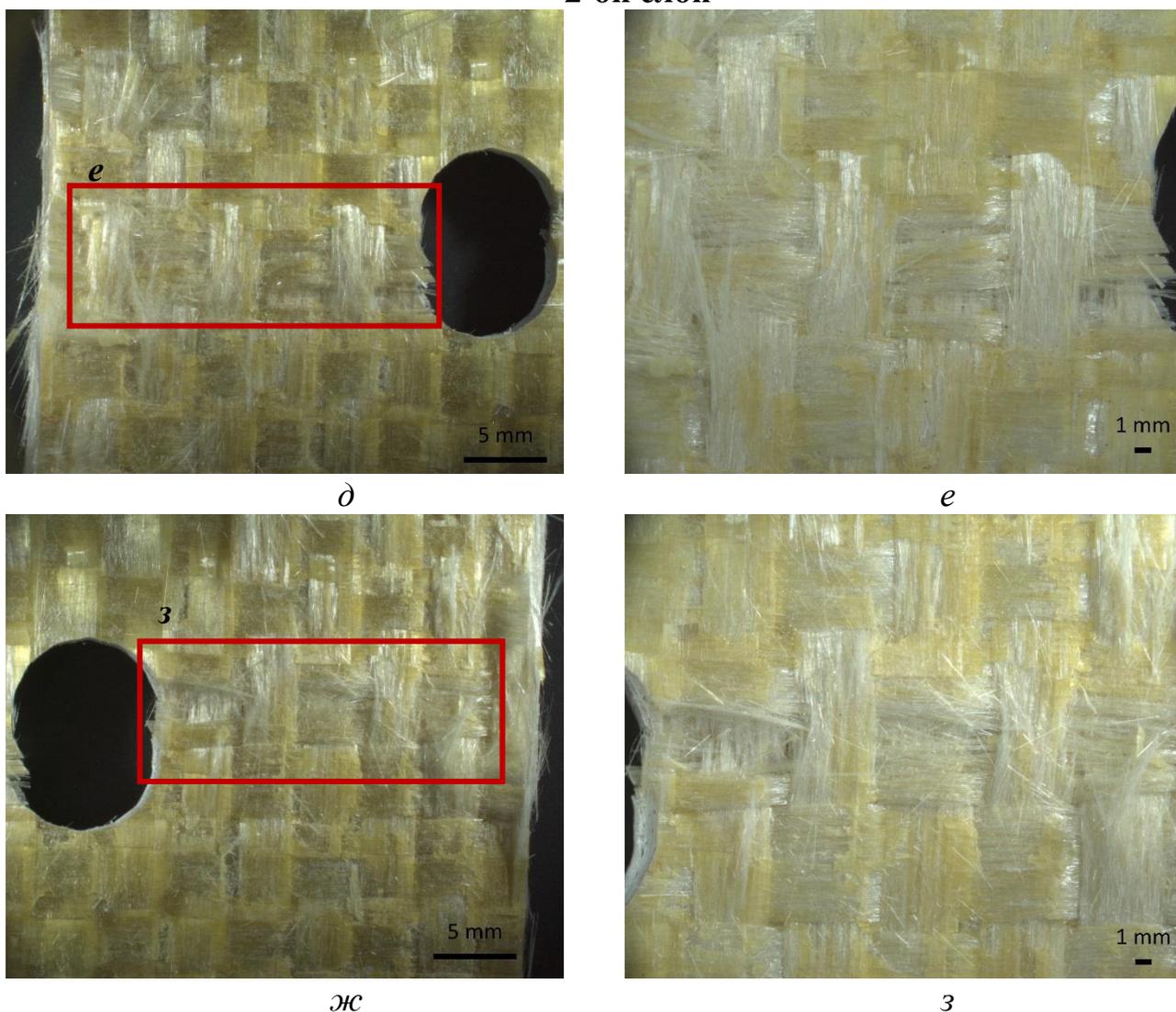


Рис. 3.4. Фотографии структуры стеклотекстолита СТЭФ после разрушения образца на втором слое

3.2. Оценка влияния структурных и размерных параметров на характер поведения композитных образцов с концентратором

Программа исследований по оценке влияния структурных и размерных параметров композитных образцов с концентратором напряжений в форме сквозного кругового отверстия включала в себя проведение механических испытаний на одноосное растяжение трех групп образцов-полосок с различным диаметром отверстия (d) 3, 6 и 9 мм. Следует отметить, что при подборе ширины

(h) и длины (l) рабочей части образца соблюдалось подобие геометрических размеров. В частности, ширина рабочей части равна шести диаметрам отверстия ($h=6d$), длина рабочей части — четырнадцати диаметрам отверстия ($h=14d$), при этом толщина образца была неизменна (таблица 3.3). Кинематическое нагружение реализовано при постоянной скорости перемещения траверсы испытательной системы $u'_0=0,42$ мм/мин (для образцов с $d=3$ мм), $u'_0=0,84$ мм/мин ($d=6$ мм) и $u'_0=1,26$ мм/мин ($d=9$ мм).

Таблица 3.3. Геометрические размеры композитного образца

№ п/п	Диаметр отверстия, мм	Ширина рабочей части, мм	Длина рабочей части, мм	Общая длина, мм	Скорость нагружения, мм/мин
	<i>d</i>	<i>h=6d</i>	<i>l=14d</i>	<i>L</i>	<i>0,01*l</i>
1	3	18	42	150	0,42
2	6	36	84	224	0,84
3	9	54	126	250	1,26

Цифровая оптическая система использовалась для регистрации деформации на структурно-неоднородной поверхности композитного образца. Значение среднего напряжения σ определялось как отношение приложенной силы к толщине образца (h) и 5 диаметрам (d) в соответствии с формулой 3.1.

$$\sigma = \frac{P}{h \cdot 5d} \quad (3.1)$$

На рис. 3.5 приведены характерные диаграммы деформирования для образцов с диаметром отверстия 3, 6 и 9 мм. Начальные участки кривых $\sigma \sim \epsilon$ совпадают, можно предположить, что модуль упругости не зависит от масштабирования образца. Было показано, что упругий участок композитных образцов следует закону подобия, в то время как предельное значение среднего напряжения σ при разрушении увеличивается по мере уменьшения диаметра

образца. Считается, что снижение несущей способности в более крупных композитных образцах связано с повышенным наличием дефектов в напряженных областях структуры. Фотографии геометрически подобных образцов представлены на рис. 3.5.

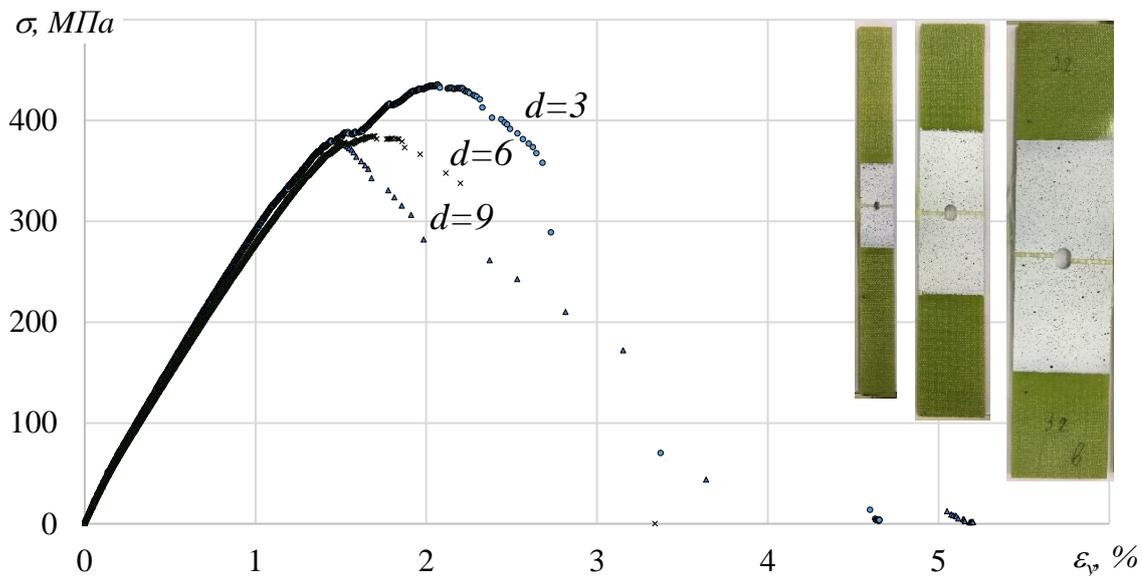


Рис. 3.5. Диаграмма деформирования образцов при испытании на одноосное растяжение

В качестве примера на рис. 3.6 представлена фотография разрушенного образца, разрушение произошло в рабочей части. Как видно из фотографии (рис. 3.6), образец не разделяется на две отдельные части после разрушения, а сохраняет свою целостность за счет непрерывных волокон в области повреждения. Красными линиями отмечены зоны, в которых при деформировании связующее разрушилось за счет множественного растрескивания, что привело к образованию светлых зон в наиболее нагруженных участках.

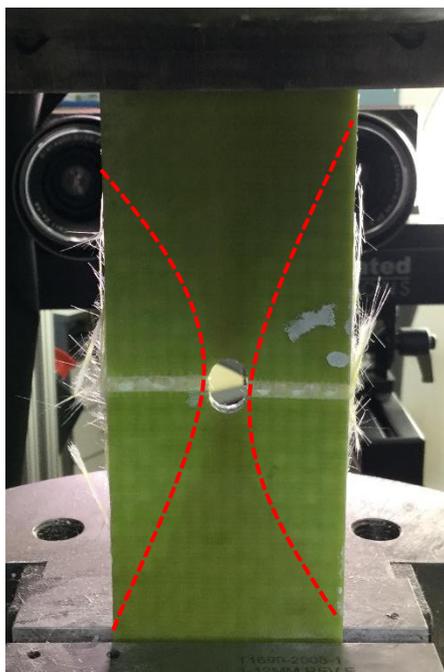


Рис. 3.6. Фотография разрушенного образца стеклотекстолита СТЭФ

Чем больше размеры образца, тем больше в нем может быть всякого рода дефектов – пустот, включений, участков с различными внутренними и внешними повреждениями. Но кроме этого особый интерес представляет установление связи между масштабным эффектом и параметром структурной неоднородности материала. Выделим в композите некоторый характерный размер неоднородности для данного материала (δ). На рис. 3.7. представлена фотография поверхности композитного образца с выделенным структурным элементом (δ), полученная с помощью стереомикроскопа Carl Zeiss SteREO Discoverjy.V12. Размер структурного элемента (δ) для материала СТЭФ составил $\delta=4$ мм (ширина переплетения).

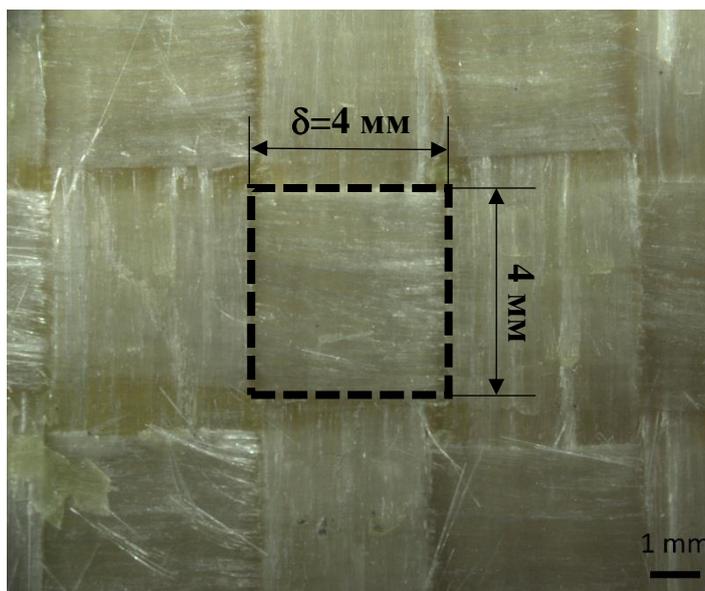


Рис. 3.7. Фотография структуры материала с выделенным структурным элементом (δ)

С этим размером связан масштабный эффект (эффект абсолютного размера, scale effect), учет которого необходим при постановке модельных экспериментов. Считается, если размеры образца существенно превосходят размер неоднородности (δ), то масштабным эффектам можно пренебречь (представительные образцы) [56].

С целью оценки влияния масштабного эффекта была получена диаграмма зависимости предельного значения среднего напряжения (σ_{\max}) от параметра неоднородности (ξ) для образцов с разным диаметром отверстия (d) (рис. 3.8). Параметр неоднородности (ξ) зависит от диаметра отверстия (d) и от размера структурного элемента δ , вычисляется по формуле:

$$\xi = \frac{d}{\delta} \quad (3.2)$$

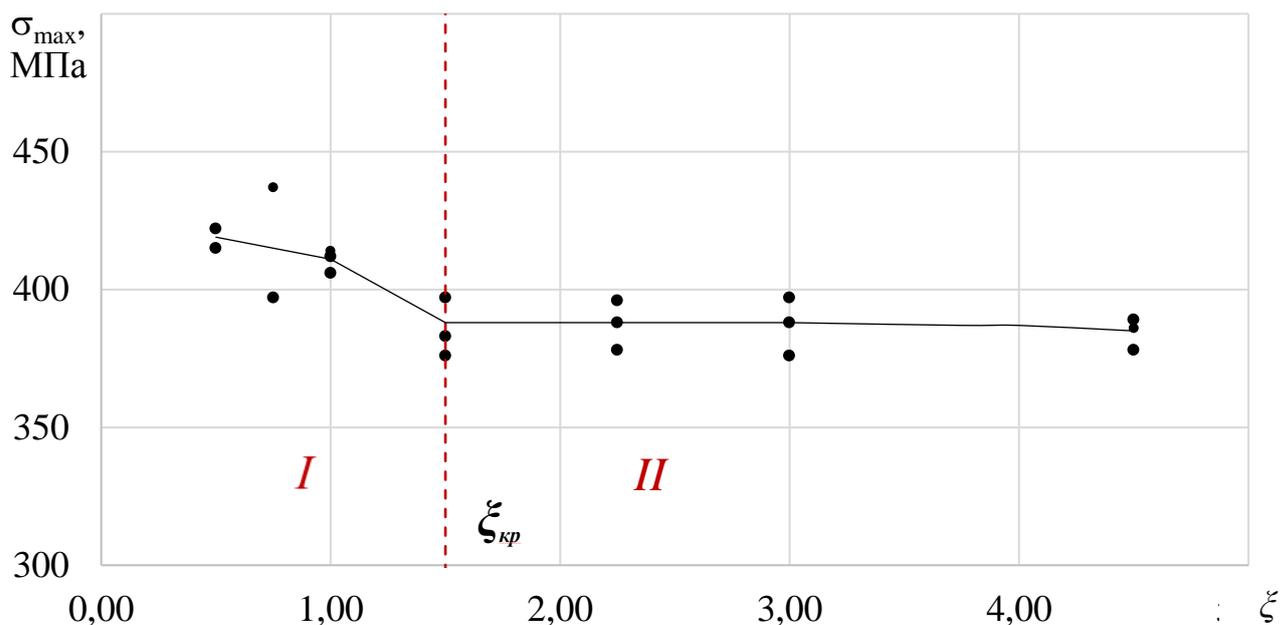


Рис. 3.8. График зависимости параметра ξ от предельного значения среднего напряжения σ_{max}

По полученным результатам видно, что диаметр отверстия $d=6$ мм ($\xi = 1,5$) является критическим. Условно график 3.8. можно разделить на два участка: участок *I* ($\xi \leq \xi_{кр}$) и участок *II* ($\xi > \xi_{кр}$). При значениях структурного параметра неоднородности (ξ) меньше критического значения ($\xi_{кр}$) предельные значения среднего напряжения (σ_{max}) снижались (участок *I*), масштабный эффект присутствует. Когда структурный параметр неоднородности (ξ) больше критического значения ($\xi_{кр}$) для данного материала изменения предельных значений среднего напряжения (σ_{max}) практически не наблюдается (участок *II*), масштабный эффект отсутствует.

Поскольку отверстия разного размера вовлекают в работу различные объемы материала, которые, в свою очередь включают в себя разное количество элементов структуры, процессы деформирования могут вести себя по-разному, особенно, когда размер отверстия сопоставим с величиной структурного элемента. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предельное значение среднего напряжения не является константой материала, а зависит от структурного элемента. Таким образом, получены опытные данные, иллюстрирующие

проявление масштабного эффекта в композиционном материале с относительно небольшими поперечными сечениями и с размером отверстия меньше или сопоставимым с размером структурной неоднородности материала (δ).

Для композитных образцов проведен анализ распределения продольной деформации (ε_{yy}) на поверхности вдоль линии L , проведенной от отверстия к краю пластины. Эпюры деформаций построены при определенных уровнях напряжений (σ) 150, 250, 350 МПа для образцов с диаметром отверстия $d=3, 6, 9$ мм (рис. 3.9).

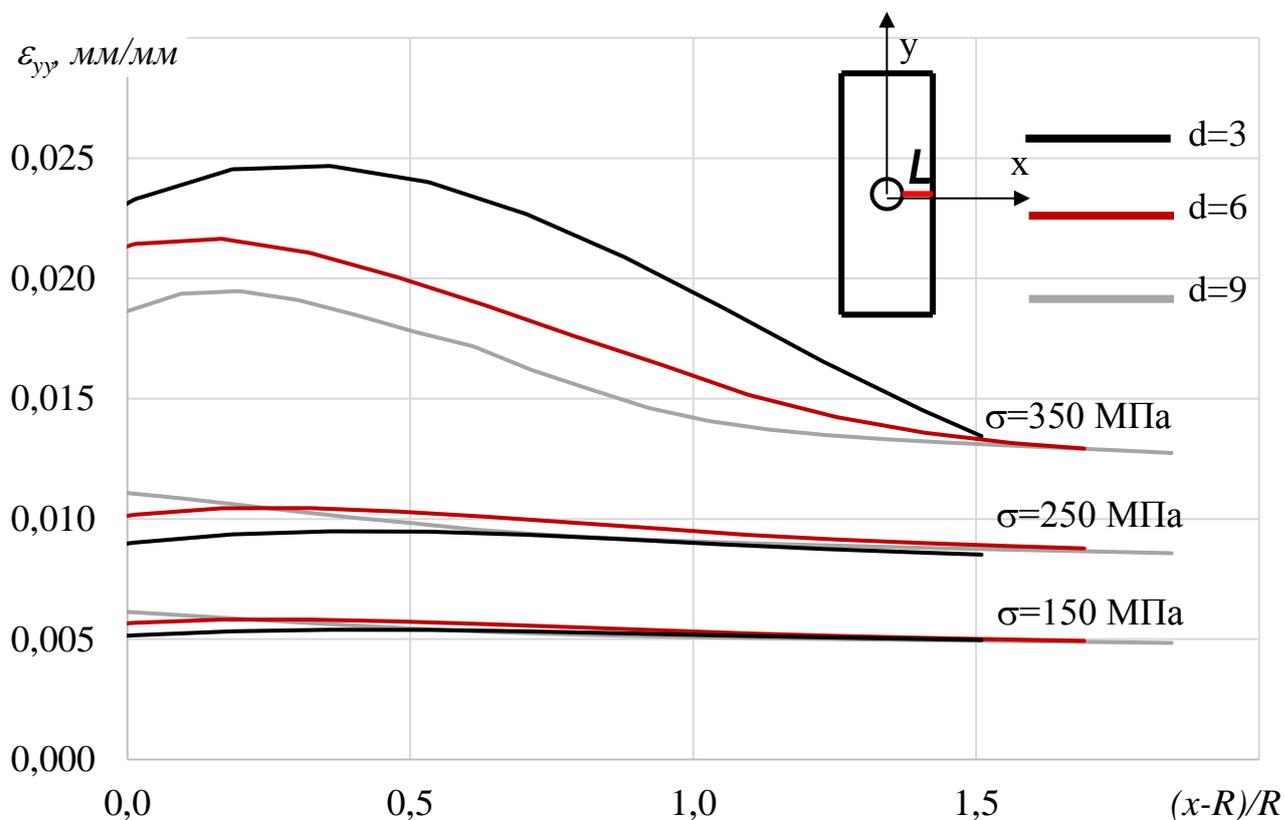


Рис. 3.9. Эпюры продольных деформаций ε_{yy} на поверхности образца с размерами диаметра $d=3,6,9$ мм при различном уровне напряжений $\sigma=150, 250, 350$ МПа

В связи с тем, что представленные эпюры (рис. 3.9) отличаются от эпюр из теории упругости, был проведен более детальный анализ полученных данных. Схожие экспериментальные результаты были получены исследователями в работах [115, 162]. В таблице 3.4. представлено соответствие максимальных продольных

деформаций ($\varepsilon_{yy, \max}$) и расстояния от отверстия l в зависимости от диаметра (d). Для более высоких растягивающих нагрузок пик деформации появляется на расстоянии около 1 мм от отверстия с диаметром 6 мм. Чем выше приложенная нагрузка, тем больше максимальное значение деформации. Максимальное значение продольной деформации $\varepsilon_{yy, \max}=2,5\%$ было измерено для образца с размером диаметра 3 мм. При удалении от отверстия распределение продольной деформаций ($\varepsilon_{yy, \max}$) становится подобным линейно упругому.

Таблица 3.4. Соответствие продольных деформаций и расстояния от отверстия (l) в зависимости от диаметра отверстия (d)

d , мм	$\varepsilon_{yy, \max}$, %	l , мм
3	2,5	1,04
6	2,2	1,00
9	1,9	1,75

Можно предположить, что возможные исходные технологические повреждения в области отверстия привели к перерезанию волокон и нарушению целостности матрицы. С целью выявления наличия внутренних технологических дефектов в области сверления отверстия к образцу в ненагруженном состоянии отверстием был применен пассивный метод контроля с помощью инфракрасной тепловизионной системы [10]. Производился нагрев испытуемого образца с помощью лампы накаливания мощностью $W=150$ Вт, продолжительность нагрева составила $t=30$ с, нагрев осуществлялся на расстоянии $L=0,15$ м. На рис. 3.10. представлена термограмма, на которой выделена зона с отличающимся значением по температуре $\Delta T=5,28$ °С (см. 3.3).

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} \quad (3.3.)$$

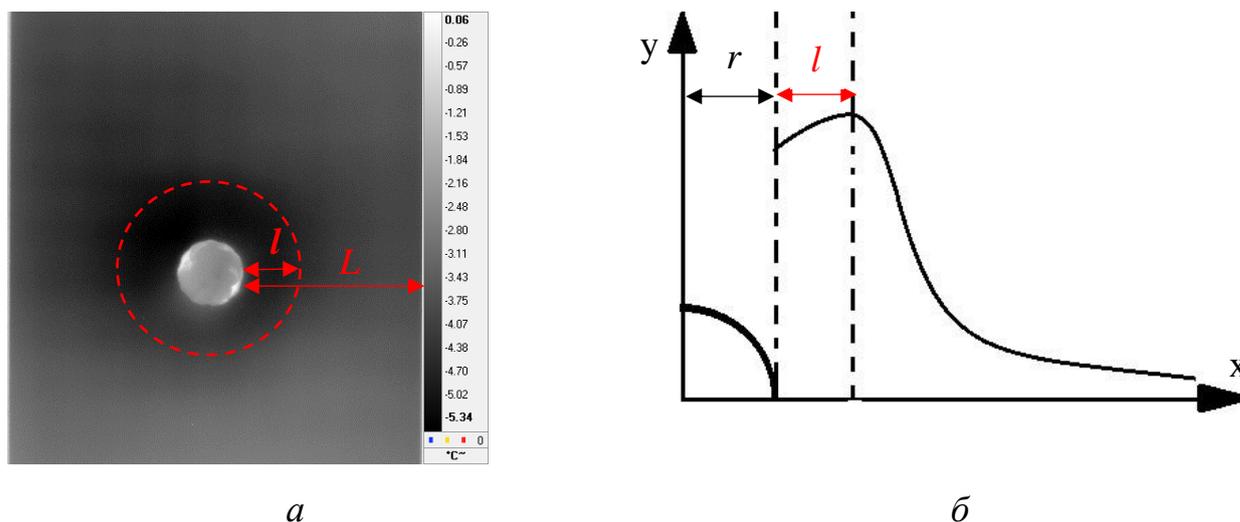


Рис. 3.10. Термограмма ненагруженного образца с диаметром отверстия $d=6$ мм (а), эпюра распределения продольной деформации ε_{yy} от отверстия к краю пластины вдоль линии L (б)

Эти результаты указывают на то, что исходное технологическое повреждение, наблюдаемое на изображении термограммы рис. 3.10, является достаточным для того, чтобы привести к снижению деформаций вблизи отверстия и, следовательно, для смещения максимального значения деформаций на некоторое расстояние от отверстия к краю пластины. В качестве примера на рис. 3.11 представлены фотографии образцов, полученные с помощью стереомикроскопа Carl Zeiss SteREO Discoverjy.V12. На фотографиях показано состояние области вокруг отверстия. После просверливания наблюдалось расслоение (а), сколы (б) и макроповреждения (в) (см. рис. 3.11).

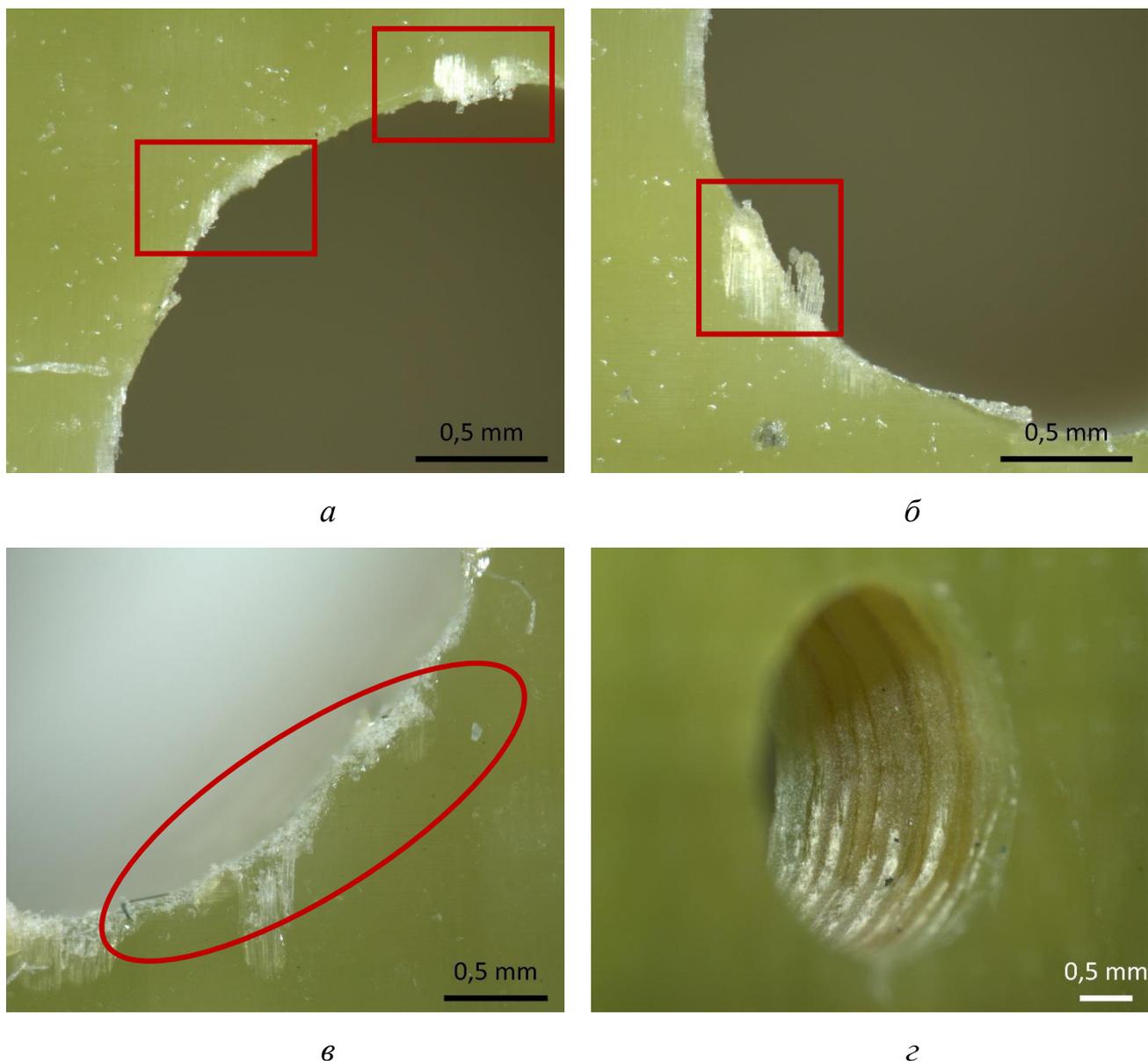


Рис. 3.11. Фотографии поверхности образцов после просверливания отверстия с отмеченными характерными повреждениями

Расслоение является одним из основных дефектов, которое возникает при просверливании отверстий в композитных объектах, и может являться важным ограничивающим фактором при использовании композиционных материалов, поскольку процесс сверления вызывает микротрещины, и эти трещины являются источником высокой концентрации напряжений.

3.3 Численное определение напряженно-деформированного состояния композитного образца с концентратором

С учетом исходного технологического повреждения в области отверстия было проведено моделирование элемента конструкции - пластины с зоной повреждения вокруг центрального отверстия. Конструкция находится под действием внешних сил. Задача решалась в линейной постановке, на основе следующей математической модели:

$$\sigma_{ij,j}=0, i,j=1,2,3 \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(U_{i,j} + U_{j,i}), i,j=1,2,3 \quad (3.5)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijmn} \varepsilon_{mn}, i,j=1,2,3 \quad (3.6)$$

Закон Гука для ортотропного материала в осях ортотропии при плосконапряженном состоянии, принимает следующий вид:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E_1} \sigma_{11} - \frac{\nu_{21}}{E_2} \sigma_{22} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_{22} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} \sigma_{11} + \frac{1}{E_2} \sigma_{22} \quad (3.8)$$

$$\gamma_{12} = \frac{1}{G_{12}} \tau_{12} \quad (3.9)$$

$$\text{Дополнительное уравнение связи: } E_1 \nu_{21} = E_2 \nu_{12} \quad (3.10)$$

Для изотропного материала закон Гука в обобщенном виде выражается:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E} [\sigma_{11} - \nu \sigma_{22}] \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{1}{E} [\sigma_{22} - \nu \sigma_{11}] \quad (3.12)$$

$$\varepsilon_{33} = -\frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (3.13)$$

$$\gamma_{12} = 2G \tau_{12} \quad (3.14)$$

$$\text{Где модуль сдвига определяется через соотношение: } G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.15)$$

Система уравнений дополняется граничными условиями на поверхности тела:

- $u_y \Big|_{\Gamma_1} = 0$
- $u_x \Big|_{\Gamma_2} = 0$
- $u_y \Big|_{\Gamma_3} = u_0$

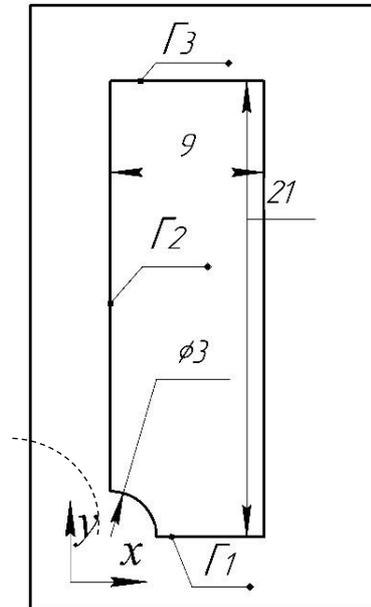


Рис. 3.12. Изображение геометрии и граничных условий на рассматриваемой области

Размер зоны повреждения вокруг центрального отверстия, отмеченный штриховой линией на рис. 3.12 принимается равным половине диаметра центрального отверстия.

На основании вышеизложенной математической постановки и геометрических данных строится численная модель в программном инженерном комплексе Ansys 18.0. Решение задачи проводится для плоского напряженного состояния с использованием четырехузлового конечного элемента Plane 182. Армированный слой композита моделировался в форме ортотропного материала, параметры которого приведены в таблице 3.5. Зона повреждения задавалась как изотропный материал с заниженными упругими свойствами, приведенными в таблице 3.6.

Таблица 3.5. Параметры материала для расчётной области

Материал	E_1 , Па	E_2 , Па	ν_{12}	G_{12} , Па
Армированный слой (ортотропный материал)	$2,85 \cdot 10^{10}$	$2,83 \cdot 10^{10}$	0,15	$1,23 \cdot 10^{10}$

Таблица 3.6. Свойства материала для поврежденного участка

Материал	E , Па	ν
Поврежденный участок (изотропный материал)	$1 \cdot 10^4$	0,49

Исследование сходимости численного решения показало, что при количестве конечных элементов в модели более 4000 максимальные главные напряжения изменяются несущественно при этом, для дальнейшего исследования выбирается модель с количеством конечных элементов 6786.

В результате решения были получены поля распределения продольных деформаций на поверхности образца (рис. 3.13 а) и наибольших главных напряжений (рис. 3.13 б).

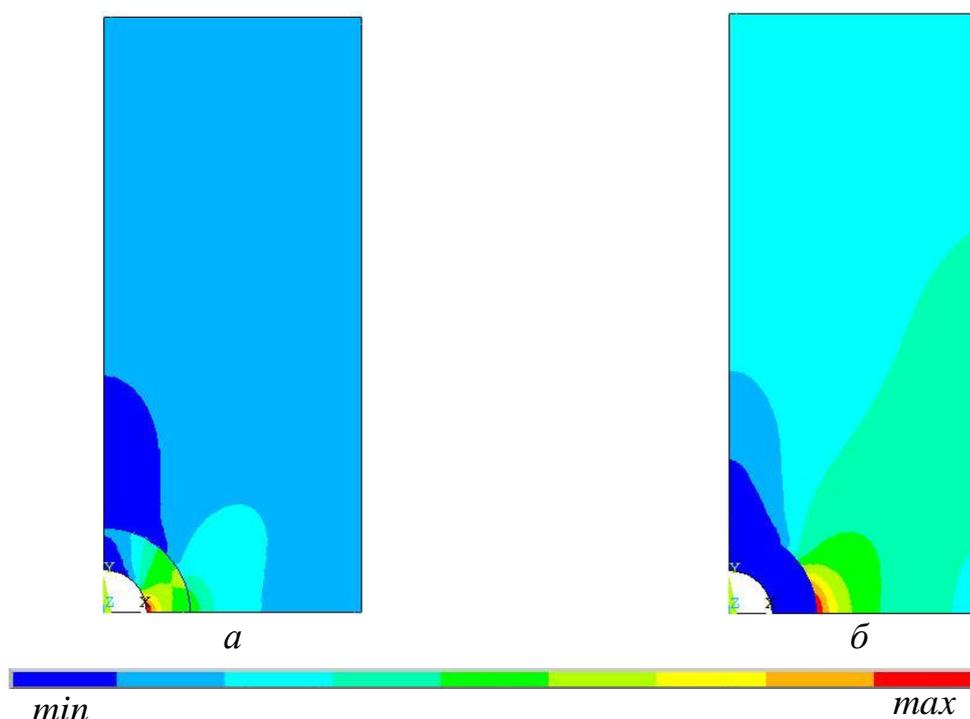


Рис. 3.13. Поля распределения продольных деформаций на поверхности образца (а), наибольших главных напряжений (б)

В результате расчетного анализа были получены эпюры продольных деформаций вдоль линии L , проведенной от отверстия к краю образца (рис. 3.14). На графике отмечаются пики продольных деформаций на некотором расстоянии от отверстия.

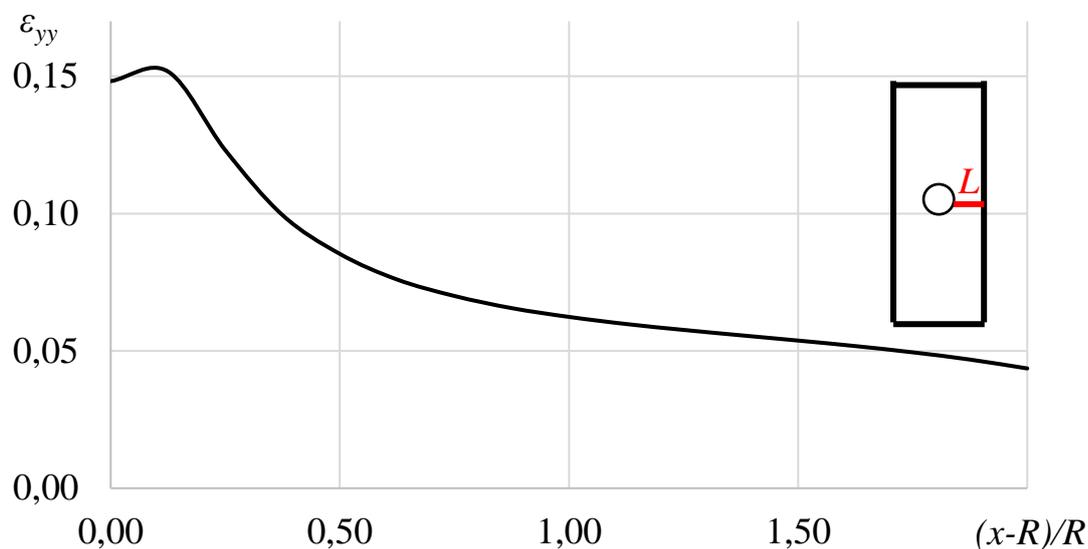


Рис. 3.14. Расчетная эпюра распределения продольной деформации ε_{yy} , построенная вдоль линии L для образца с диаметром отверстия $d=6$ мм

3.4. Влияние структурных особенностей пространственно-армированных и слоисто-волокнистых углепластиков на характер неупругого деформирования и разрушения

Очевидным недостатком традиционных полимерных композиционных материалов в виде текстолитов и ламинатов является их относительно невысокая межслоевая прочность. Для исключения этого недостатка сегодня предлагаются к использованию пространственно-армированные наполнители или 3D ткани. Многослойные углеродные ткани объемного плетения используются в качестве армирующего материала углепластиков, работающих в сложных условиях воздействия высокоскоростных аэродинамических потоков, вибрации и высоких температур [82, 84, 131, 165]. На рис. 3.15 представлена фотография структуры

пространственно-армированного композиционного материала с отмеченными типовыми технологическими дефектами.

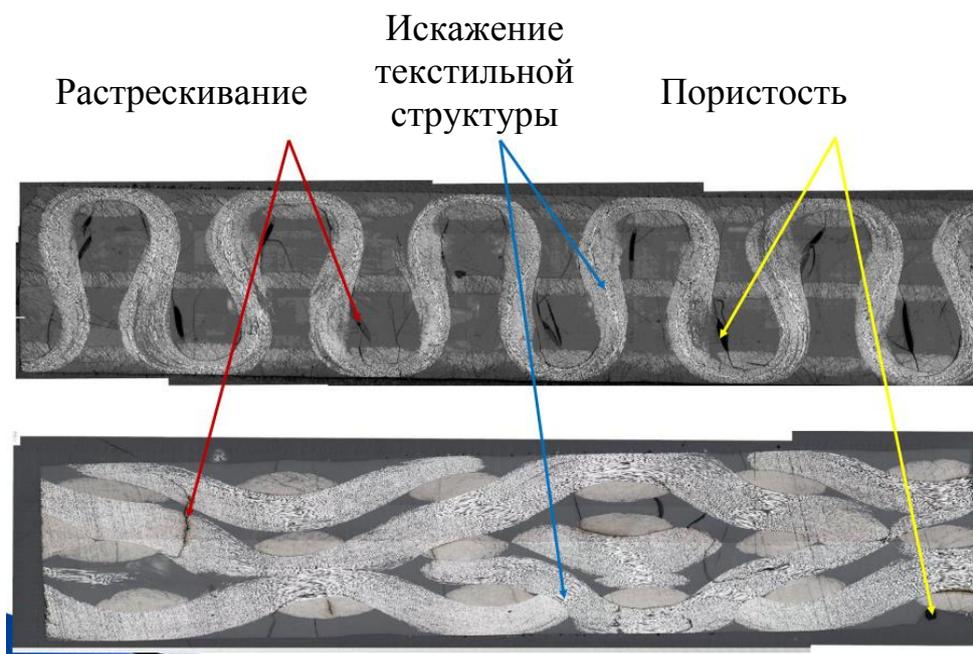


Рис. 3.15. Фотография структуры пространственно-армированного композиционного материала с отмеченными типовыми технологическими дефектами

В качестве материала, исследуемого в данной работе, выбран пространственно-армированный углепластиковый композит, в роли наполнителя эпоксидная смола Т26-производитель ИНУМИТ и углеволокно А-49.

Проведена серия механических испытаний на одноосное растяжение композитных образцах с круглым концентратором, 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) [82]. В качестве примера представлена схема изготовления слоистых образцов усиленных в поперечном направлении методом прошивки (H) на рис. 3.16.

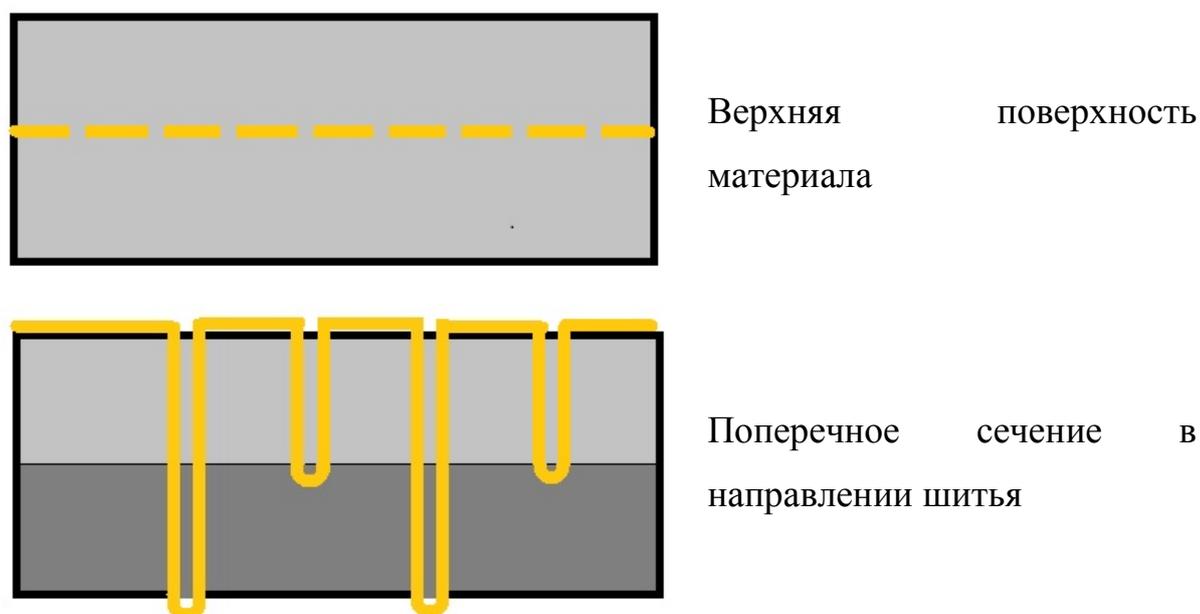


Рис. 3.16. Схема изготовления образцов слоистых преформ, усиленных в поперечном направлении методом прошивки (Н)

Группы композитных образцов-полосок с различной схемой переплетения представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7. Группы композитных образцов-полосок с различной схемой переплетения

Шифр образца	Схема переплетения ПКМ-образцов
А	Ортогональная
В	Ортогональная комбинированная
С	С попарно межслойным армированием
Д	С попарно межслойным армированием и продольным слоем
Е	С попарно межслойным комбинированным армированием
Ф	Со сквозным межслойным армированием
Г	Слоистые образцы
Н	Слоистые образцы, усиленные в поперечном направлении методом прошивки

Нагружение реализовано на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5989 (± 600 кН) по стандарту ASTM D 5766 со скоростью удлинения $u'_0=2$ мм/мин. Регистрация перемещений и деформаций на поверхности образцов осуществлялась с использованием бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D и метода корреляции цифровых изображений (КЦИ). Нагрузка регистрировалась динамометрическим датчиком мощностью до 600 кН. Точность измерения нагрузки составляет 0,5% от измеряемой величины в диапазоне 0,2%-1% номинальной мощности датчика нагрузки.

Схема испытания (а) и эскиз образца (б) с отверстием представлены на рис. 3.17. Геометрические размеры образца приведены в таблице 3.8. Видеофиксация процесса деформирования производилась камерами с объективами Limes 2,0/28/0901. Скорость съёмки составляла 15 кадров в секунду с установленным разрешением камер 4,0 Мп. Всего было испытано по 10 образцов в каждой группе.

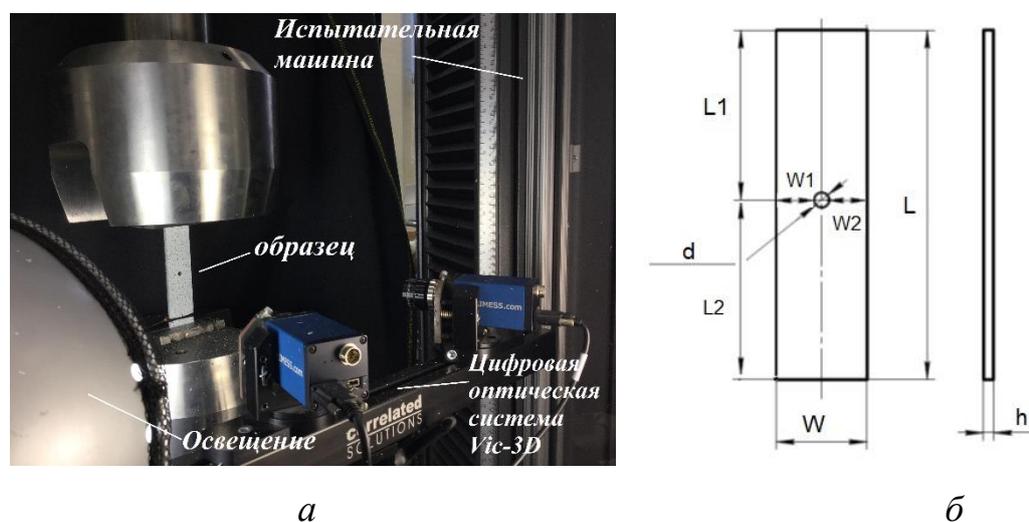


Рис. 3.17. Испытание на одноосное растяжение образца с отверстием (а), эскиз образца с отверстием (б)

Таблица 3.7. Геометрические размеры образца с отверстием

h, мм	W, мм	d, мм	L, мм	L1	L2	W1	W2
4	36	6	300	148	147	15	15

По результатам испытаний для каждой группы образцов были получены механические характеристики, представленные в таблице 3.8, в том числе, средние значения (\bar{x}), среднеквадратичные отклонения (S) и коэффициенты вариации (V). Стоит отметить, что под максимальной нагрузкой P_{\max} понимается наибольшая нагрузка, предшествующая разрушению образца, а под предельным значением среднего напряжения σ'_{BK} - отношение максимальной нагрузки к начальной площади поперечного сечения испытуемого образца (без учета отверстия).

Таблица 3.8. Результаты механических испытаний образцов всех групп

п/№	Маркировка образцов	Макс. нагрузка, P_{\max} , кН	Предельное значение среднего напряжения, σ'_{BK} , МПа	Маркировка образцов	Макс. нагрузка, P_{\max} , кН	Предельное значение среднего напряжения, σ'_{BK} , МПа
1	A 	148,6	1189,9	B 	178,0	1425,4
2		150,3	1198,4		178,8	1414,9
3		149,4	1120,6		162,8	1289,3
4		146,2	1110,0		155,9	1223,5
5		130,6	998,6		180,0	1383,8
6		139,1	1079,7		170,8	1319,8
7		137,5	1039,5		178,9	1362,7
8		142,6	1092,3		177,9	1403,6
9		143,3	1092,4		168,6	1307,7
10		149,4	1162,1		173,8	1360,2
\bar{x}		143,7	1108,4		172,5	1349,1
S		6,1	59,94		8,0	60,47
$V, \%$		4,24	5,41		4,64	4,48
1		61,9	495,7		98,0	784,7
2		61,0	477,1		103,3	811,7

п/№	Маркировка образцов	Макс. нагрузка, P_{max} , кН	Предельное значение среднего напряжения, σ'_{BK} , МПа	Маркировка образцов	Макс. нагрузка, P_{max} , кН	Предельное значение среднего напряжения, σ'_{BK} , МПа		
3	C	67,8	525,2	D 	107,4	849,4		
4		64,2	490,3		104,6	820,0		
5		66,0	527,0		97,9	755,4		
6		65,4	521,0		102,9	790,1		
7		65,9	506,5		99,0	755,0		
8		68,3	534,2		101,4	775,0		
9		61,4	469,3		93,4	694,1		
10		59,3	457,0		100,0	736,7		
x			64,1		500,3		100,8	777,2
S			2,9		25,38		4,0	42,39
V, %			4,53	5,07		3,96	5,45	
1	E 	55,9	447,6	F 	73,8	591,0		
2		55,1	429,8		70,1	543,0		
3		57,0	437,2		69,8	532,9		
4		56,6	430,9		67,6	518,1		
5		56,2	433,6		62,8	490,3		
6		55,5	424,8		67,2	520,8		
7		60,3	459,5		70,5	538,0		
8		53,5	413,3		68,4	516,7		
9		56,9	435,0		71,3	553,7		
0		56,6	438,2		71,8	564,3		
x			56,4		435,0		69,3	536,9
S		1,6	11,81		3,0	26,84		
V, %		2,93	2,71		4,33	4,99		

п/№	Маркировка образцов	Макс. нагрузка, P_{max} , кН	Предельное значение среднего напряжения, σ'_{BK} , МПа	Маркировка образцов	Макс. нагрузка, P_{max} , кН	Предельное значение среднего напряжения, σ'_{BK} , МПа
1	G 	54,7	438,0	H 	56,7	454,0
2		54,6	444,7		60,2	463,6
3		52,6	404,9		40,4	296,1
4		53,9	420,3		56,4	444,6
5		55,3	434,7		56,7	433,8
6		51,5	412,0		49,8	370,0
7		53,8	425,6		57,0	447,3
8		54,5	426,3		57,7	458,2
9		51,9	423,3		57,9	462,0
10		53,6	441,6		56,3	438,8
x		53,6	427,2		57,4	426,86
S		1,2	12,17		5,44	50,56
V, %		2,22	2,85		9,91	11,84

На рис. 3.18. представлены диаграммы нагружения, которые являются характерными для каждой схемы армирования углепластика (А–Н). Полимерные композитные образцы с ортогональной (А) и ортогонально-комбинированной (В) схемой переплетения отличаются высокими значениями предельной нагрузки по сравнению с образцами с межслойным армированием (С–F) и слоистыми образцами (G, H). Для всех образцов углепластика с различными схемами армирования на диаграммах нагружения наблюдаются срывы, связанные со структурным разрушением. На рис. 3.19 и рис. 3.20 представлены фотографии образцов всех схем армирования с характерными повреждениями в области отверстия.

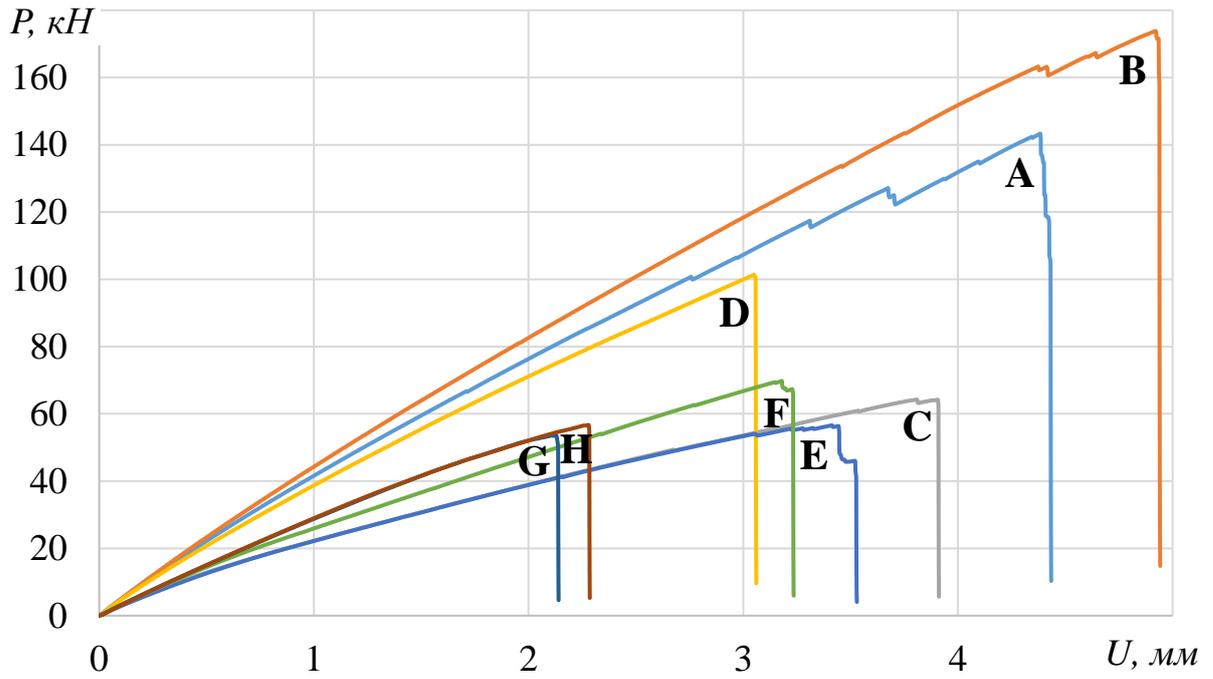


Рис. 3.18. Диаграмма нагружения образцов углепластика с различной схемой армирования

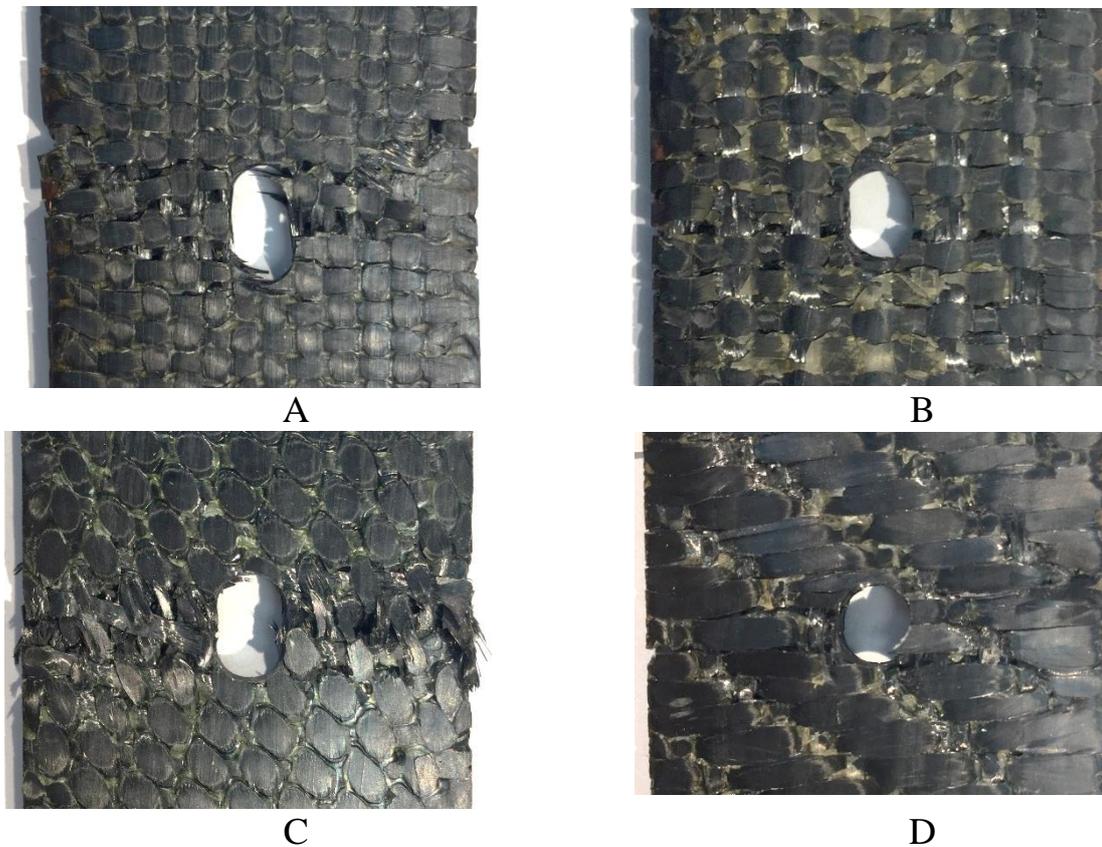


Рис. 3.19. Фотографии разрушенных образцов для схем армирования А, В, С, D

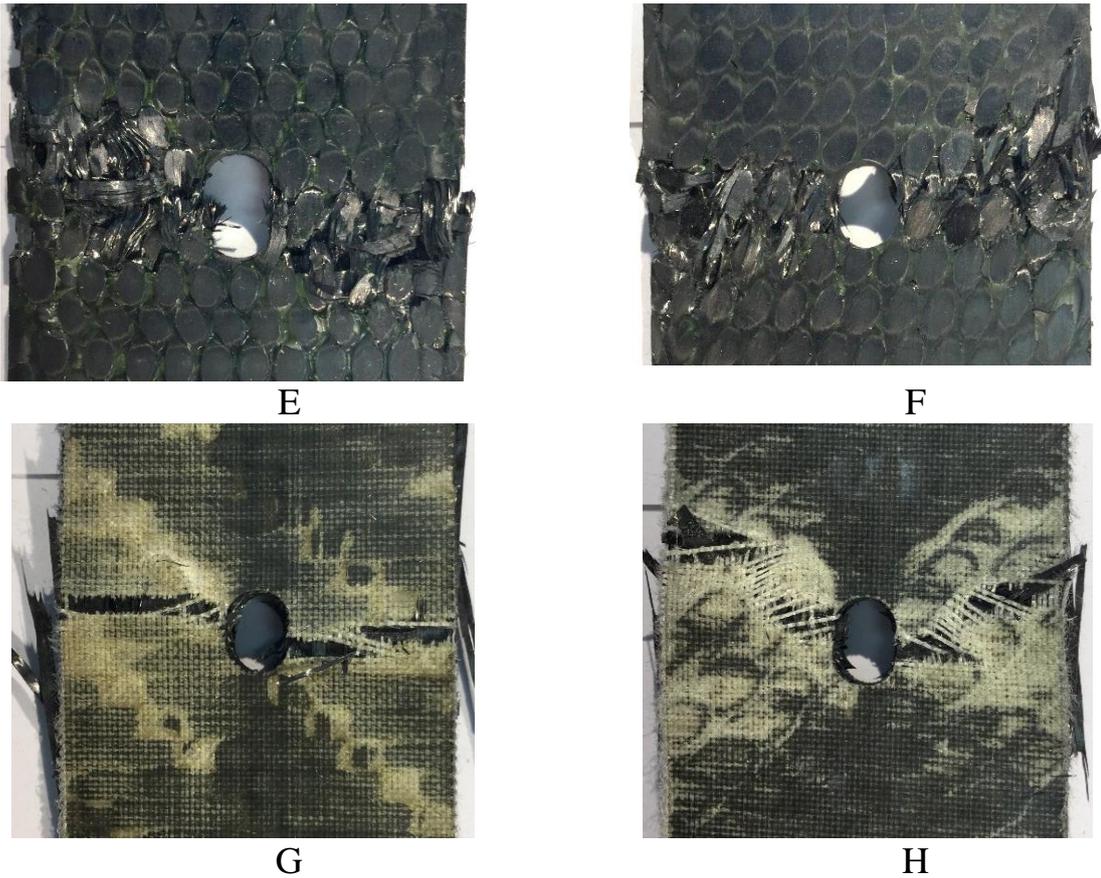


Рис. 3.20. Фотографии разрушенных образцов для схем армирования E, F, G, H

Для оценки неоднородных полей деформаций, полученных с помощью видеосистемы, были рассмотрены образцы типа армирования А и В, обладающие наибольшими значениями предельной нагрузки. При этом ось Oy направлена вдоль образца (вдоль оси растяжения), ось Ox — перпендикулярно оси нагружения в плоскости образца. На рис. 3.21. представлены поля неоднородных деформаций на поверхности образца при разных уровнях нагрузки.

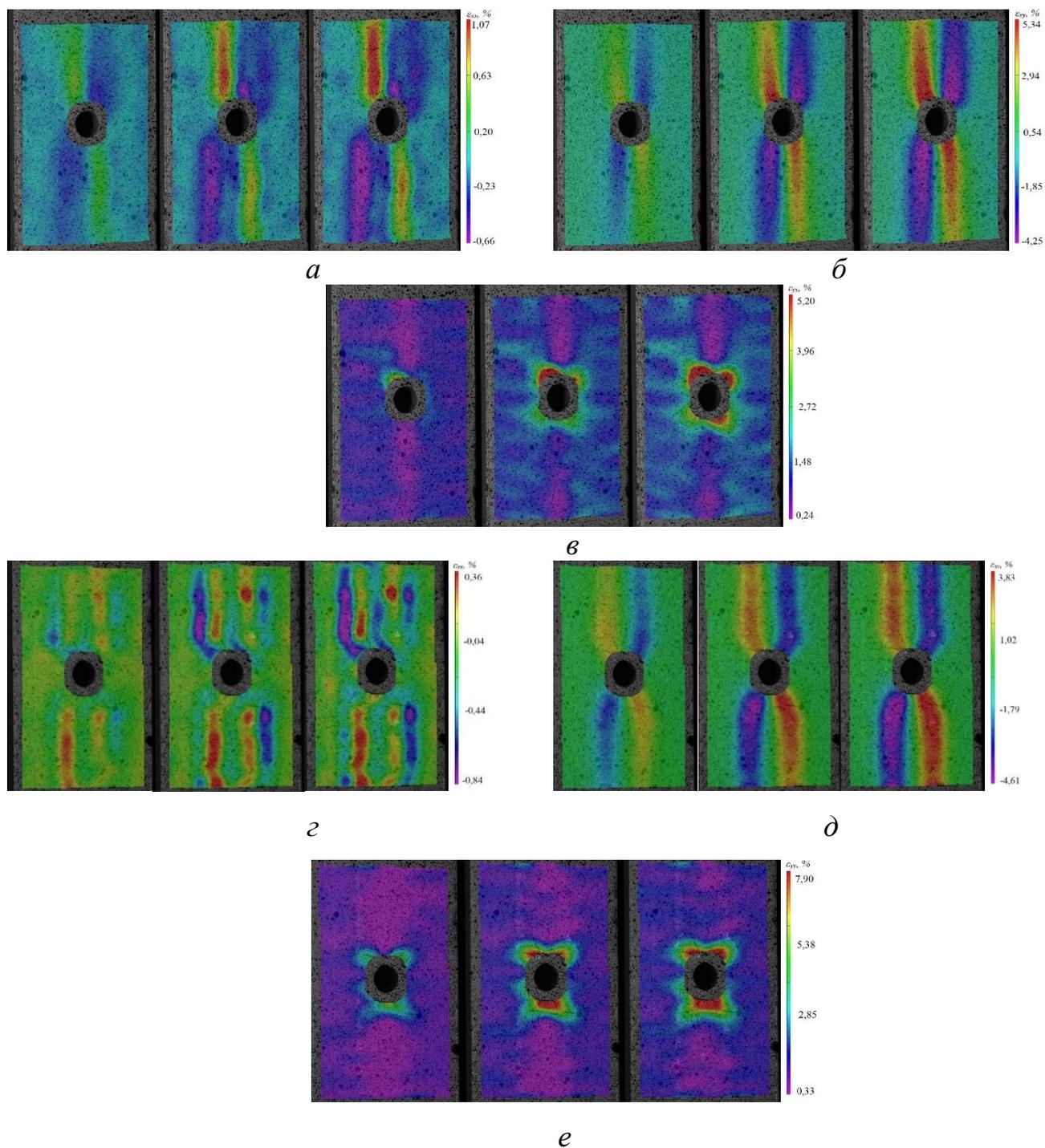


Рис. 3.21. Поля поперечных ε_{xx} (а), сдвиговых ε_{xy} (б) и продольных деформаций ε_{yy} (в) на поверхности образца типа армирования А при нагрузке $P_1=89$ кН, $P_2=114,6$ кН, $P_3=126,8$ кН. Поля поперечных ε_{xx} (г), сдвиговых ε_{xy} (д) и продольных деформаций ε_{yy} (е) на поверхности образца типа армирования В при нагрузке $P_1=109,4$ кН, $P_2=143,3$ кН, $P_3=144,7$ кН

Приведенные поля продольных деформаций при максимальной нагрузке наглядно демонстрируют место локализации дефектов, которые приводят к полному разрушению образца. Процесс деформирования материала является неоднородным, на поверхности образца зафиксированы зоны локализованной деформации в виде продольных полос, которые, в свою очередь отражают структуру материала.

Представленная ниже методика была применена для проверки деформации композиционных материалов при моделировании. Для упрощения численного исследования, а также, из-за наличия в образце двух плоскостей симметрии рассматривалась только четверть образца, геометрия и граничные условия которого приведена на рис. 3.22: на левой грани пластины запрещалось перемещение по оси y , на верхней грани запрет перемещения по оси x . К правой грани прикладывалась растягивающая нагрузка в виде перемещения вдоль оси y [152].

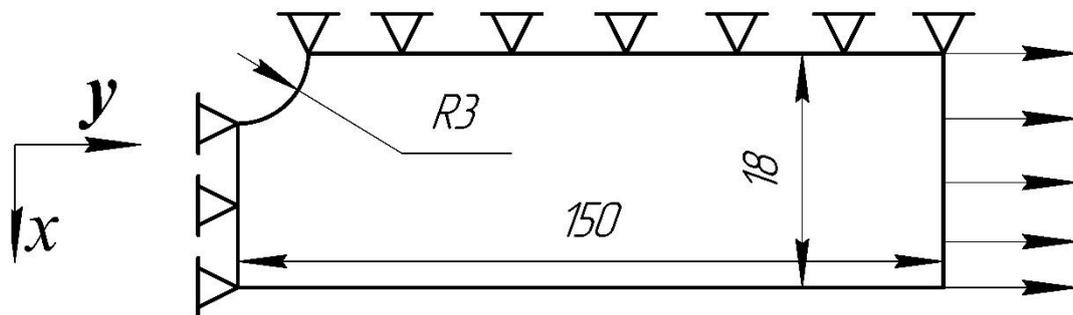


Рис. 3.22. Геометрия и условия закрепления пластины

Решение задачи проводилось в конечно-элементном программном комплексе Ansys 18.0. В модели использовался двухмерный четырехузловой конечный элемент PLANE 182. Из-за наличия концентрации напряжений, вокруг отверстия происходило сгущение сетки.

Так как более мелкая сетка ведет к более точному распределению напряжений вокруг отверстия, сетка с 24 элементами вдоль линии отверстия была принята как оптимальная [152].

На рис. 3.23 *а, б* представлены поля распределения продольных деформаций для образца типа армирования G, полученных при решении численной задачи (*а*), а также экспериментально с использованием метода корреляции цифровых изображений (*б*), при нагрузке 51 кН.

Полученные поля иллюстрируют высокую концентрацию деформаций с левой и правой сторон от отверстия и низкую с верхней и нижней сторон (области разгрузки) в направлении действия приложенной нагрузки. Фотография типа разрушения, представленная на рис. 3.20 (*в*), согласуется с расчетными и экспериментальными полями и соответствует разрушению волокон в поперечном направлении в области концентратора напряжений [152].

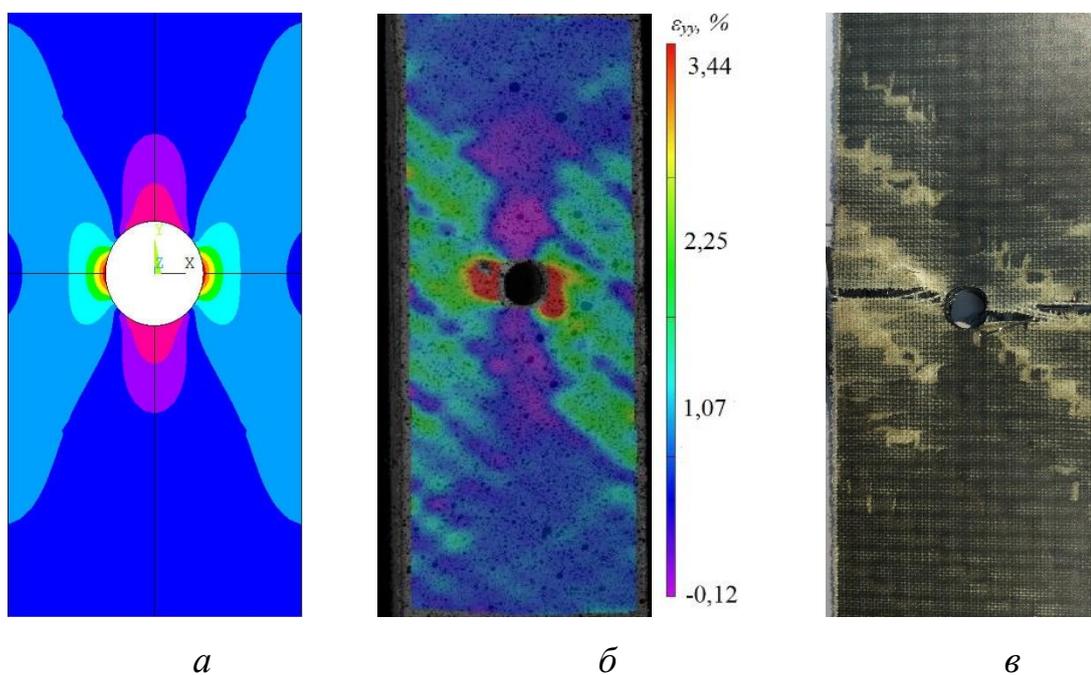


Рис. 3.23. Поля продольных деформаций при нагрузке 51 кН, полученные численно (*а*) с помощью метода корреляции цифровых изображений (*б*); фото разрушенного образца типа армирования G (*в*)

В связи с тем, что снижение несущей способности происходит и у образцов без отверстия был введен коэффициент изменения прочности K_3 . С помощью которого становится возможным оценить чувствительность той или иной схемы армирования к наличию отверстия.

В таблице 3.9 приведены предельные значения среднего напряжения σ_{BK} (расчет в соответствии с формулой 3.16) по каждому из видов образцов и типу армирования, и коэффициент изменения прочности K_3 , который определяется как отношение предела прочности образца без концентратора к предельному значению среднего напряжения образца с концентратором. И определяется по формуле 3.17.

$$\sigma_{BK} = \frac{P_{max}}{hw_{BK}} \quad (3.16)$$

$$K_3 = \frac{\sigma_{BK}}{\sigma_B} \quad (3.17)$$

где P_{max} - наибольшая нагрузка;

h – толщина образца;

w_{BK} – ширина образца с учетом отверстия.

Таблица 3.9. Предельные значения средних напряжений и коэффициент изменения прочности

Тип армирования	Предел прочности, σ_B , МПа (без концентратора)	Предельные значения средних напряжений, σ_{BK} , МПа (с концентратором)	Коэффициент изменения прочности, K_3
A	940	1108	1,18
B	922	1349	1,46
C	599	500	0,83
D	758	777	1,02
E	496	435	0,87
F	461	537	1,16
G	317	427	1,35
H	336	427	1,27

В рамках ASTM D 5766 расчет предельного значения среднего напряжения образца с концентратором σ'_{BK} осуществляется без учета отверстия, в соответствии с формулой 3.18, в предположение, что отверстие диаметром $d=6$ мм не влияет на несущую способность.

В таком случае расчет коэффициента изменения прочности будет осуществляться в соответствии с формулой 3.19.

$$\sigma'_{BK} = \frac{P_{\max}}{hw'_{BK}} \quad (3.18)$$

$$K'_{\sigma} = \frac{\sigma'_{BK}}{\sigma_B} \quad (3.19)$$

где w'_{BK} – ширина образца без учета отверстия

На рис. 3.24 показана зависимость предельных прочностных характеристик от типа армирования композитных образцов.

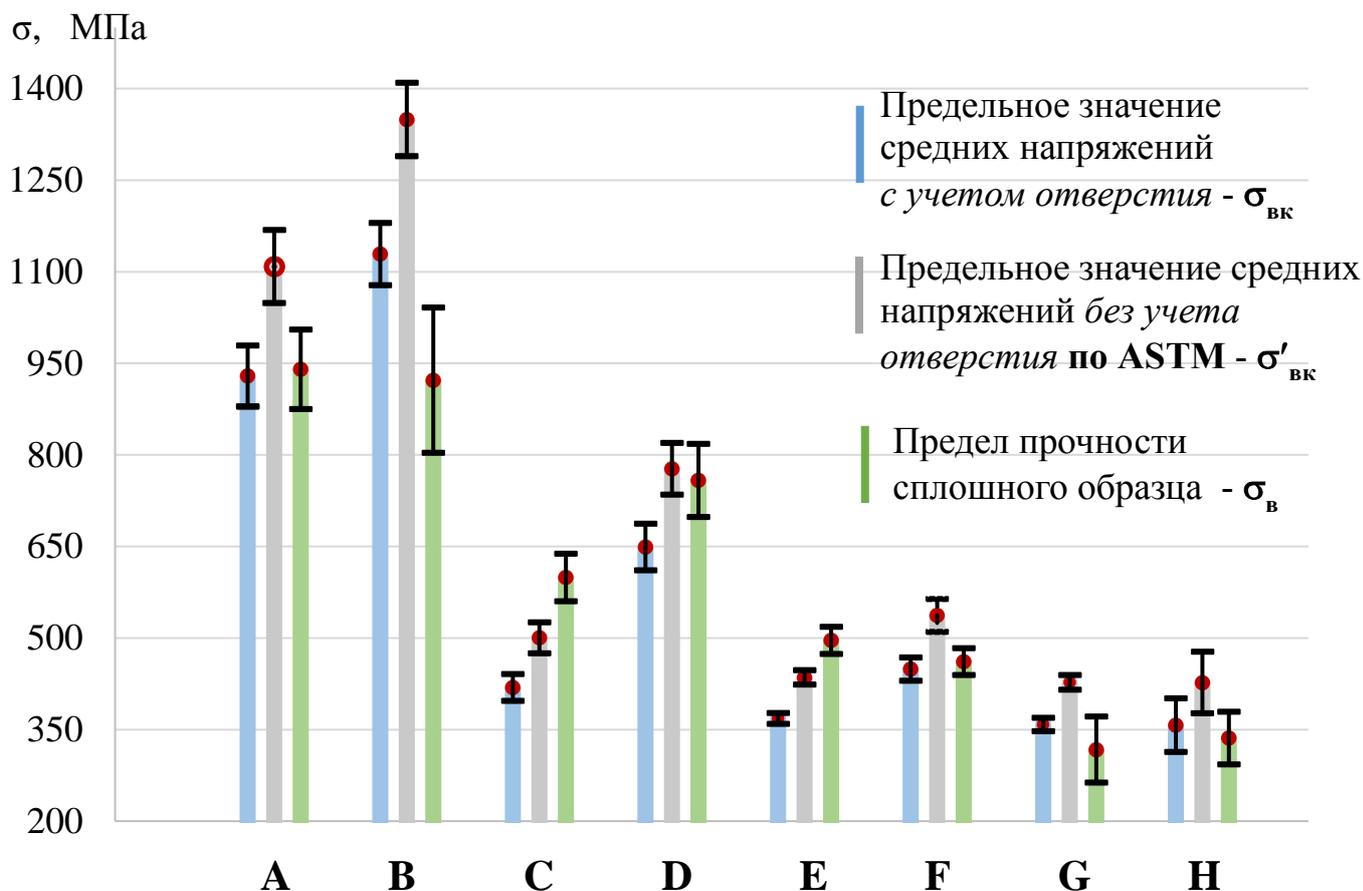


Рис. 3.25. Зависимость предельных прочностных характеристик от типа армирования композитных образцов

Сопоставление коэффициентов изменения концентрации напряжений показывает, что к отверстию наиболее чувствительны типы армирования С и Е. У образцов типов армирования А, В, D, F, G и Н наличие отверстия не привело к существенным изменениям предельного значения среднего напряжения, что

связано со структурой материала и перераспределением напряжений, возникающем в образце.

Также можно отметить, что результаты расчета предельного значения среднего напряжения σ'_{BK} по ASTM существенно отличаются от предельных значений среднего напряжения σ_{BK} .

Для более детального анализа проведена оценка распределения продольной деформации ε_y на поверхности образца (рис. 3.26) вдоль линии L , проведенной от отверстия к краю пластины. Эпюры деформаций построены при определенных уровнях напряжений 10%, 40% и 70% от предельного значения σ_B .

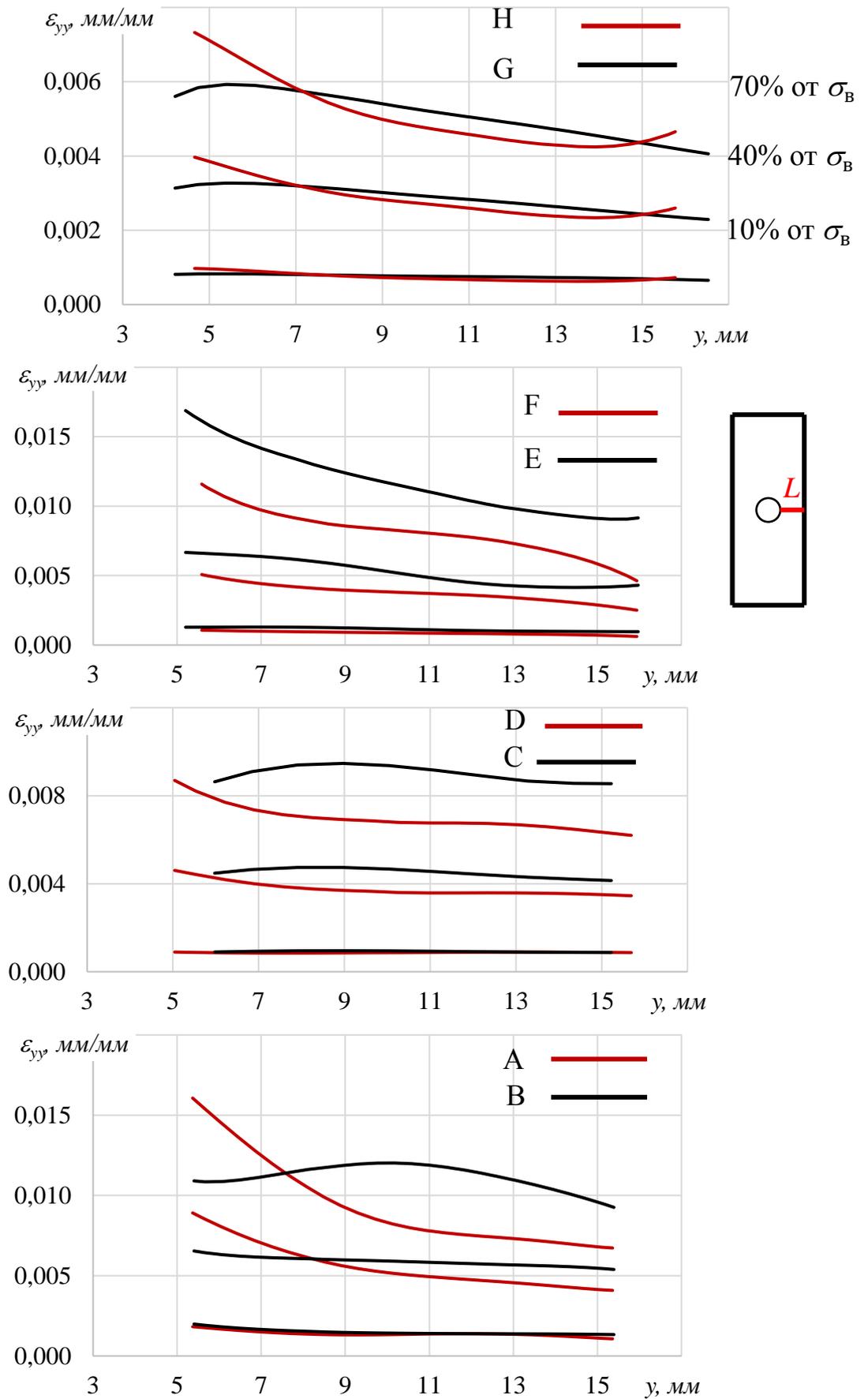


Рис. 3.26. Эпюры (ε_{yy}) на поверхности образца при различном уровне напряжений

Полученные результаты показывают, что поведение образцов с отверстием типов армирования H, E, F, D, A остается линейно-упругим вплоть до разрушения. Для типов армирования B, C, G при более высоких растягивающих нагрузках пик деформации появляется на некотором расстоянии от отверстия. Отмечено, что чем выше приложенная нагрузка, тем больше максимальное значение деформации и разброс по деформациям увеличивается.

3.5. Экспериментальное исследование сдвиговых свойств пространственно-армированных композитов с учетом структурных особенностей

Одна из важнейших характеристик, используемых в расчете конструкции, является сдвиговая прочность и модуль сдвига полимерного композиционного материала. Чувствительность композитов к деформациям сдвига приводит к необходимости обращать особое внимание на определение сдвиговых характеристик. В настоящее время наиболее распространенным методом для определения механических характеристик композиционных материалов при сдвиге является ASTM D5379 (метод Iosipescu) [80]. Хотя первоначально данный способ был предложен для исследования сдвиговых характеристик металлов [105]. В 1980-х годах Walrath и Adams [170, 177] впервые применили V-образный надрез для композитных образцов. Определение механических свойств композиционных материалов так или иначе связано с анализом полей деформаций наружного слоя образцов. При этом на результат оказывает непосредственное влияние структура наружного слоя композита, что приводит к необходимости исследования возникающих неоднородностей.

Испытания на сдвиг проводились на образцах 3D-тканого композита с попарно межслойным армированием. Материал формировался таким образом, чтобы оснастка, используемая для получения композита из 3D преформ, позволила изготавливать заготовки-полоски без дополнительной механической обработки. На рис. 3.27 представлены фотографии поверхностей образца, полученные с помощью

стереомикроскопа. Здесь можно увидеть структуру композита с выделенным структурным элементом δ [56].

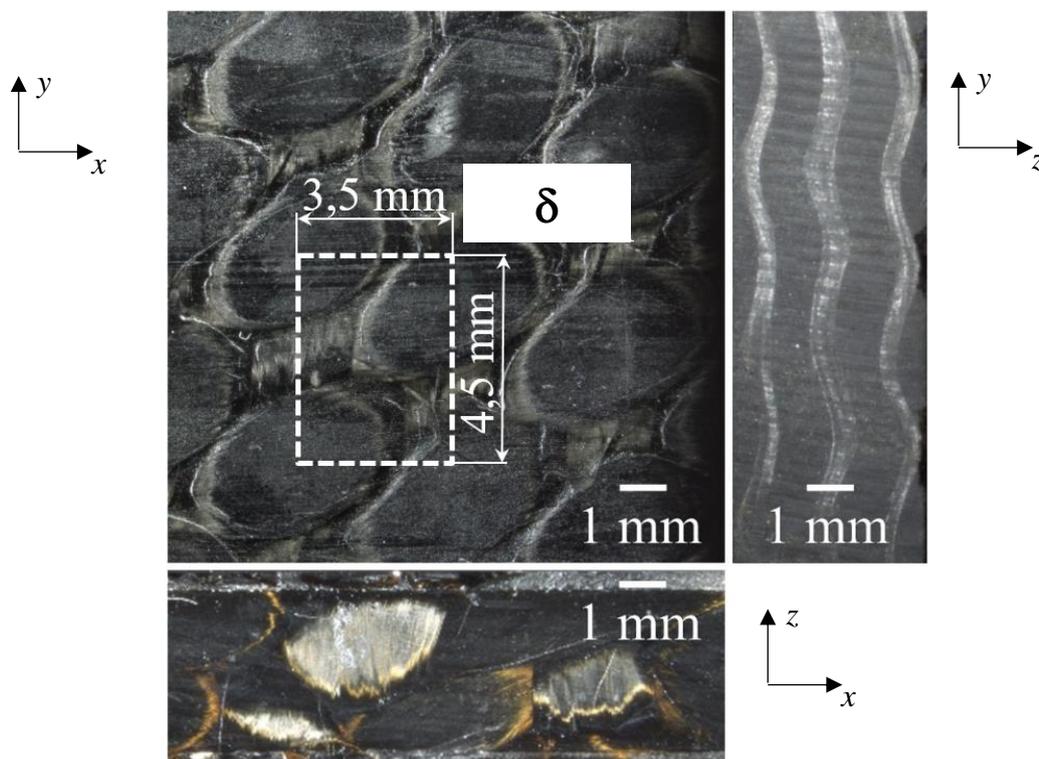


Рис. 3.27. Фото структуры композиционного материала в трех проекциях с выделенным структурным элементом

Испытания на сдвиг проводились на образцах с V-образными вырезами с использованием приспособления Iosipescu в соответствии с ASTM D5379 [80]. Схема проведения испытания представлена на рис. 3.28.

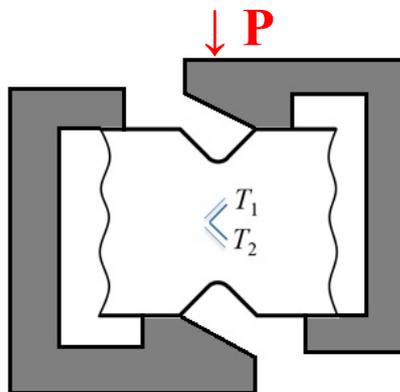


Рис. 3.28. Схема проведения испытания с использованием приспособления Iosipescu

Образцы вырезались по длине из единой полосы, а V-образные вырезы были получены с помощью фрезеровки. Эскиз образца представлен на рис. 3.29.

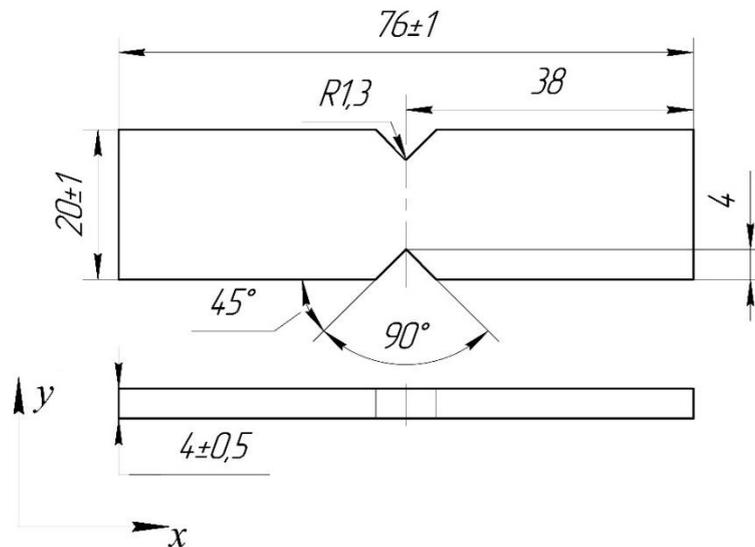


Рис. 3.29. Эскиз образца с V-образными вырезами

Эксперименты проводились на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5882. Регистрация неоднородных полей деформаций на поверхности образца осуществлялась с использованием метода КЦИ. Проведена серия испытаний 10 композитных образцов на сдвиг. Скорость подвижного захвата составляла $u'_0=2$ мм/мин. Нагрузка измерялась динамометрическим датчиком с величиной предельной нагрузки 100кН. Точность измерения нагрузки составляет не менее чем 0,5% от измеряемой величины. Съемка видеосистемой осуществлялась с помощью двух цифровых черно-белые камер Q-400 с разрешением до 4 Мп, скорость съемки составила 15 кадров в секунду.

Из полученных данных при корреляционной обработке было выявлено, что подмножество размером $X=35$ пикселей является подходящим для изображения данной структуры, так как среднее значение доверительного интервала не превышает $\sigma \leq 0,01$ (рис. 3.30). При данном выборе размера подмножества учитываются структурные особенности композиционного материала, а выбранная

область на поверхности образца обладает уникальностью распределения пикселей для возможности осуществления однозначной идентификации локальных областей по изображению. При данной обработке подходящим значением шага является $\Delta X=3$ пикселя.

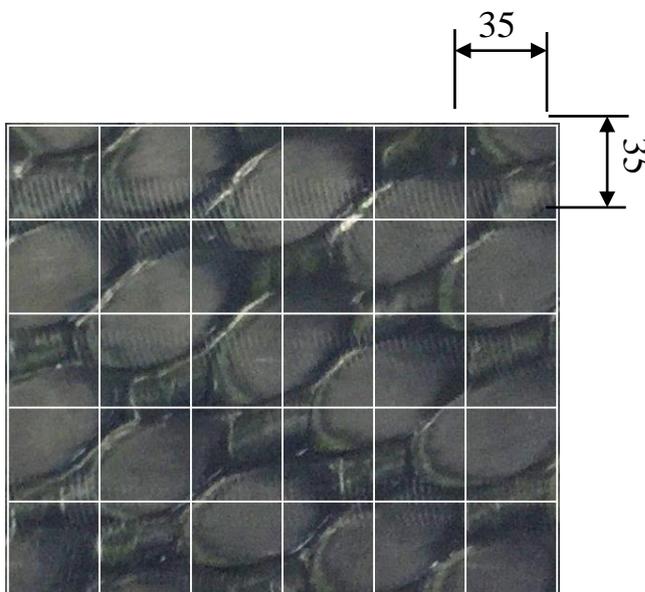


Рис. 3.30. Изображение структуры образца с учетом размера подмножества $X=35$ пикселей

При определении сдвиговых деформаций ASTM D5379 рекомендует использовать тензорезисторы с активной длиной 1,5 мм, которые располагаются под углами $\pm 45^\circ$ к оси нагружения в рабочей зоне образца (между V-образными вырезами) (см. рис. 3.28). Программное обеспечение Vic-3D позволяет симитировать тензорезисторы с помощью инструмента «виртуальный экстензометр (T)». В работе также были использованы дополнительные инструменты видеосистемы: «прямоугольная область (R)» и «линия (L)» для определения средних сдвиговых деформаций соответственно в области и по линии осреднения. Для реализации инструмента «прямоугольная область (R)» в рабочей зоне образца выделялась площадка в виде прямоугольника, охватывающего предполагаемую область однородных деформаций. Область располагалась между V-образными вырезами образца. Для того чтобы полученные на образцах механические характеристики можно было распространить на материал в целом, необходимо чтобы размер рабочей области образца был сопоставим или превышал

представительный объем композита, который в свою очередь должен включать целое число структурных элементов по аналогии с [36, 81].

Таким образом, размеры и особенности структуры поверхности образца позволяют выбрать область высотой 9 мм и шириной 3,5 мм, которая будет включать примерно 2 структурных элемента (рис. 3.27). Инструмент «линия (L)» представляет собой проекцию минимального поперечного сечения на поверхности образца, соединяя между собой V-образные вырезы, вдоль которой и происходит осреднение деформаций.

По ASTM D 5379 из испытаний определяются следующие характеристики: предел прочности при сдвиге F^u (МПа), предельная сдвиговая деформация γ^a (%), модуль сдвига G (ГПа), условная прочность при сдвиге F^o (МПа). Предел прочности при сдвиге определялся следующим образом

$$F^u = \frac{P^u}{A}, \quad (3.20)$$

где A – площадь минимального поперечного сечения рабочей зоны образца ($A = wh$), P^u – нагрузка разрушения или нагрузка при достижении предельной деформации γ^a . Согласно ASTM D 5379 разрушение трактуется как срыв на диаграмме «нагрузка – перемещение». Предельная сдвиговая деформация – деформация при разрушении или 5%. Деформация с помощью инструмента «виртуальный экстензометр (T)» определялась следующим образом

$$\gamma = |\varepsilon_{+45}| + |\varepsilon_{-45}|, \quad (3.21)$$

где ε_{+45} и ε_{-45} – деформации элементов инструмента «виртуальный экстензометр (T)», расположенных под углами $\pm 45^\circ$ к оси нагружения. Деформация с помощью инструмента «прямоугольная область (R)» определялась следующим образом

$$\gamma = 2\bar{\varepsilon}_{xy} \quad (3.22)$$

где $\bar{\varepsilon}_{xy}$ – осредненная деформация в прямоугольной области. Данные при $\gamma > 5\%$ отбрасывались. Модуль сдвига определялся следующим способом

$$G = \Delta\tau / \Delta\gamma, \quad (3.23)$$

где $\Delta\tau$ – значение диапазона напряжений, соответствующее выбранному диапазону деформаций $\Delta\gamma$; $\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1$, $\gamma_1 = 0,15 \div 0,25$ %, γ_2 – такова, чтобы обеспечить $\Delta\gamma = 0,4 \pm 0,02$ %. Условная прочность при сдвиге F° – напряжение, соответствующее точке пересечения диаграммы деформирования и прямой, построенной по точкам $(\gamma_1; \tau_1)$ и $(\gamma_2; \tau_2)$, и смещенной на 0,2% по деформациям (рис. 3.31).

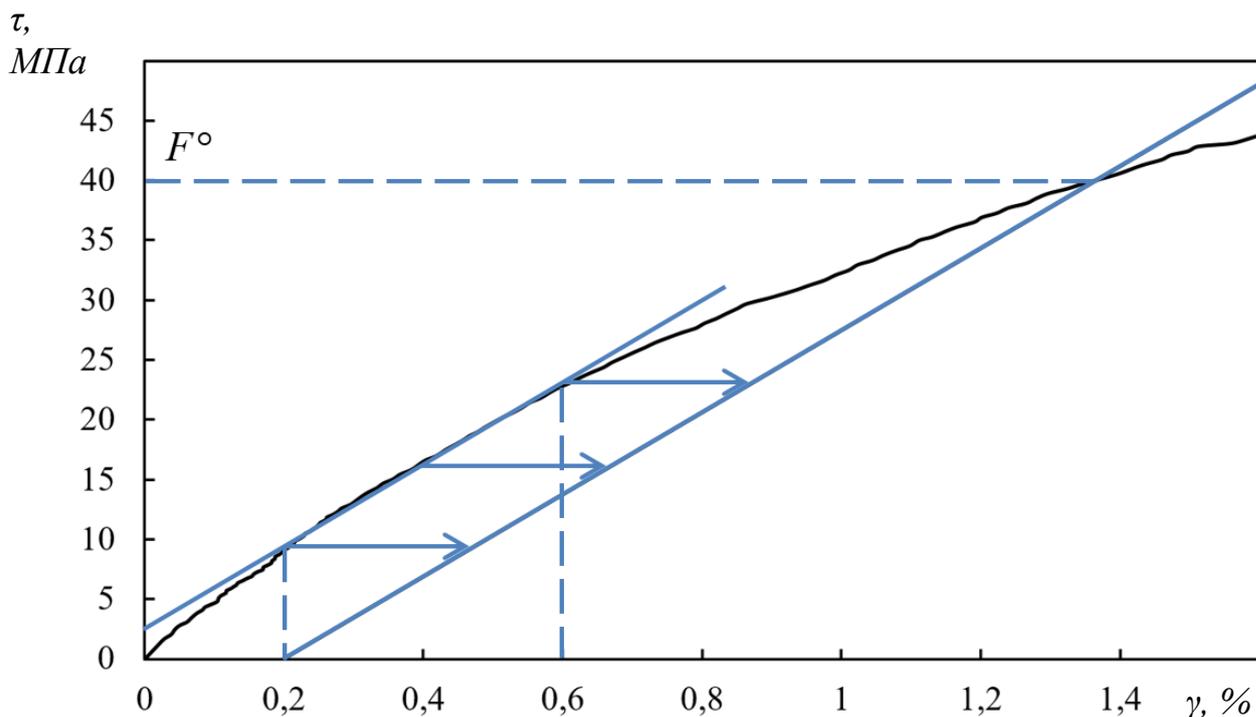


Рис. 3.31. Определение условной прочности F° при сдвиге на примере диаграммы деформирования образца С-6

В результате испытаний для каждого образца были построены поля деформаций в его рабочей зоне (рис. 3.32). В ходе исследований полей деформаций было выявлено, что распределение сдвиговых деформаций носит неоднородный характер, на поверхности образца формируются овальные области. На рис. 3.32 также показано размещение пары виртуальных экстензометров T_1 и T_2 с помощью инструмента «виртуальный экстензометр (T)» в соответствии с рекомендациями ASTM D5379 для образцов С-5 и С-9.

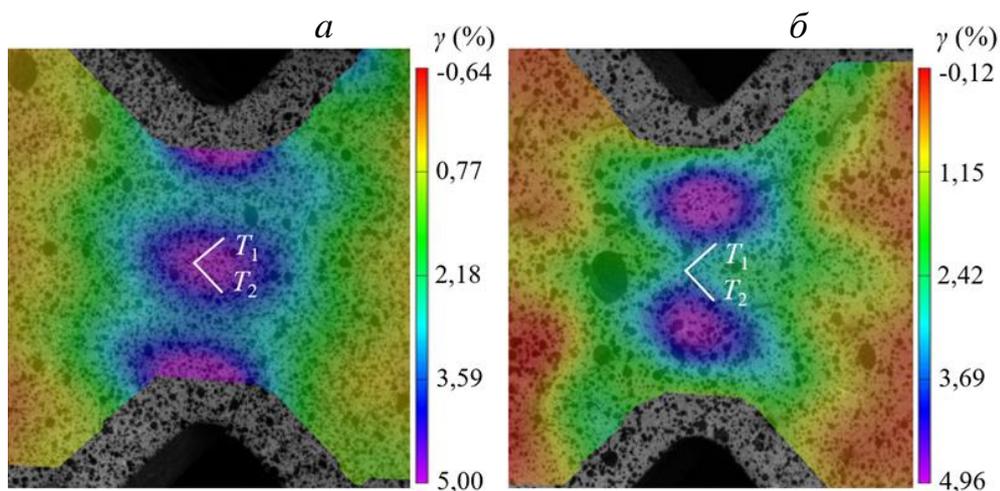


Рис. 3.32. Неоднородные поля сдвиговых деформаций образцов С-5 (а) и С-9 (б)

По результатам испытаний были построены диаграммы деформирования для каждого образца. На рис. 3.33 представлены диаграммы деформирования с использованием инструментов «виртуальный экстензометр (T)», в таблице 3.10 приведены результаты испытаний.

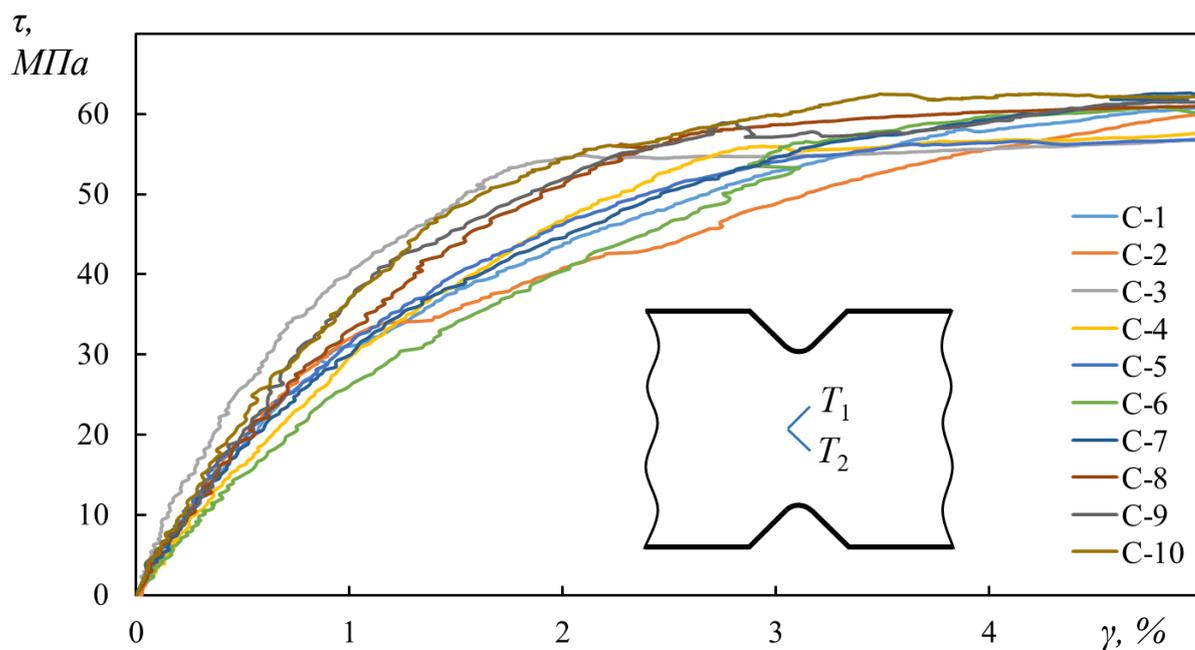


Рис. 3.33. Диаграммы деформирования образцов углепластика с использованием инструментов «виртуальный экстензометр (T)» для определения сдвиговых деформаций

При определении деформаций с помощью инструмента «прямоугольная область (R)» получены результаты, представленные на рис. 3.34, и также в таблице 3.11.

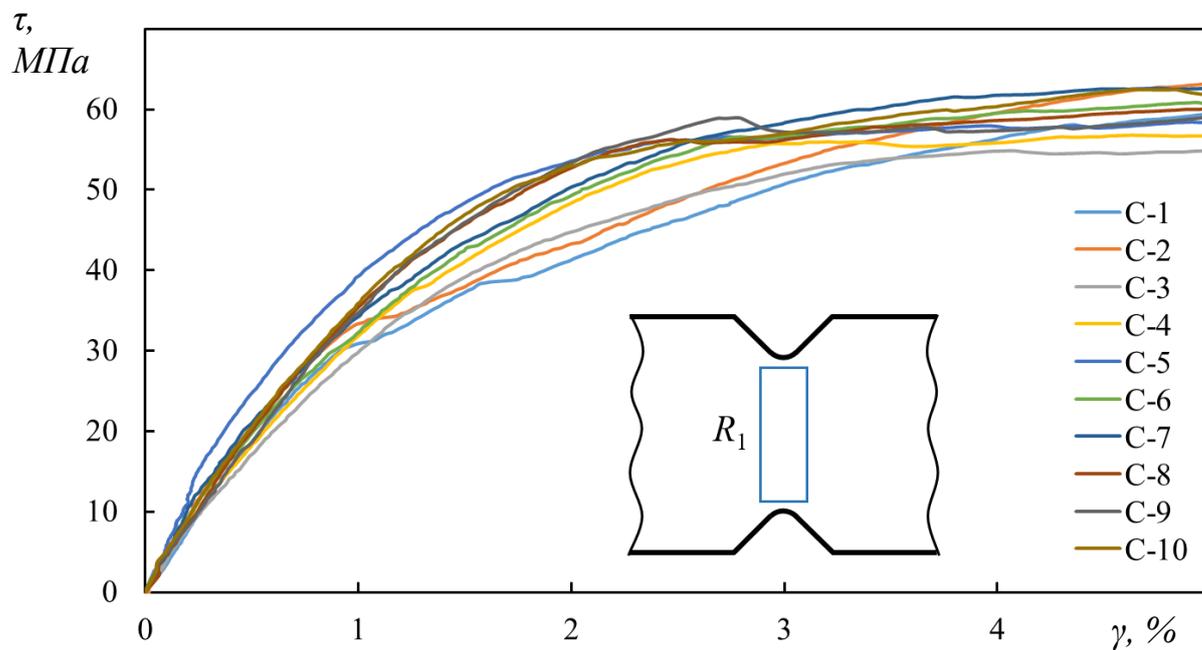


Рис. 3.34. Диаграммы деформирования образцов углепластика с использованием инструмента «прямоугольная область (R)» для определения сдвиговых деформаций, осредненных в данной области

Таблица 3.11. Результаты испытаний образцов с использованием инструментов «виртуальный экстензометр (Т)» и «прямоугольная область (R)» для определения сдвиговых деформаций

№ п/п	Образец	Деформации по модулю «виртуальный экстензометр (Т)»			Деформация по «прямоугольной области (R)»		
		Предел прочности и при сдвиге, F^u (МПа)	Модуль сдвига, G (ГПа)	Условная прочность при сдвиге, F^o (МПа)	Предел прочности и при сдвиге, F^u (МПа)	Модуль сдвига, G (ГПа)	Условная прочность при сдвиге, F^o (МПа)
1	C-1	61,8	3,48	32,6	60,2	3,56	31,4
2	C-2	60,1	3,49	34,0	63,7	3,56	33,8
3	C-3	56,8	4,07	46,1	54,9	3,00	39,3
4	C-4	57,7	2,91	39,9	56,8	3,19	40,8
5	C-5	56,9	3,37	36,4	58,4	4,27	43,6
6	C-6	60,8	2,66	32,1	60,8	3,43	40,0
7	C-7	62,3	3,26	35,9	62,7	3,38	43,1
8	C-8	61,0	3,50	42,2	60,1	3,75	42,9
9	C-9	61,6	3,71	43,6	59,1	3,52	46,2
10	C-10	62,5	4,11	40,6	62,5	3,72	45,5
11	\bar{x}	60,2	3,46	38,3	59,9	3,54	40,7
12	S	2,2	0,45	4,8	2,7	0,34	4,8
13	$CV, \%$	3,7	13,1	12,6	4,6	9,7	11,8

$$\begin{aligned} \text{Здесь и ниже: } \bar{x} &= \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n, & S &= \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right) / (n-1)}, \\ CV &= 100 \cdot S / \bar{x}, \end{aligned} \quad (3.24)$$

где \bar{x} – среднее значение, S – среднеквадратическое отклонение, CV – коэффициент вариации. Характер разрушения образцов не был ярко выраженным, на диаграммах «нагрузка – перемещение» (рис. 3.35) срывов не наблюдается. Поэтому графики строились, в соответствии с ASTM D 5379, до 5% по деформациям (γ). И поскольку разные «инструменты» дают разные значения деформаций в точках диаграммы «нагрузка – перемещение», то возникают отличия предела прочности для одних и тех же образцов (см. таблицу 3.11).

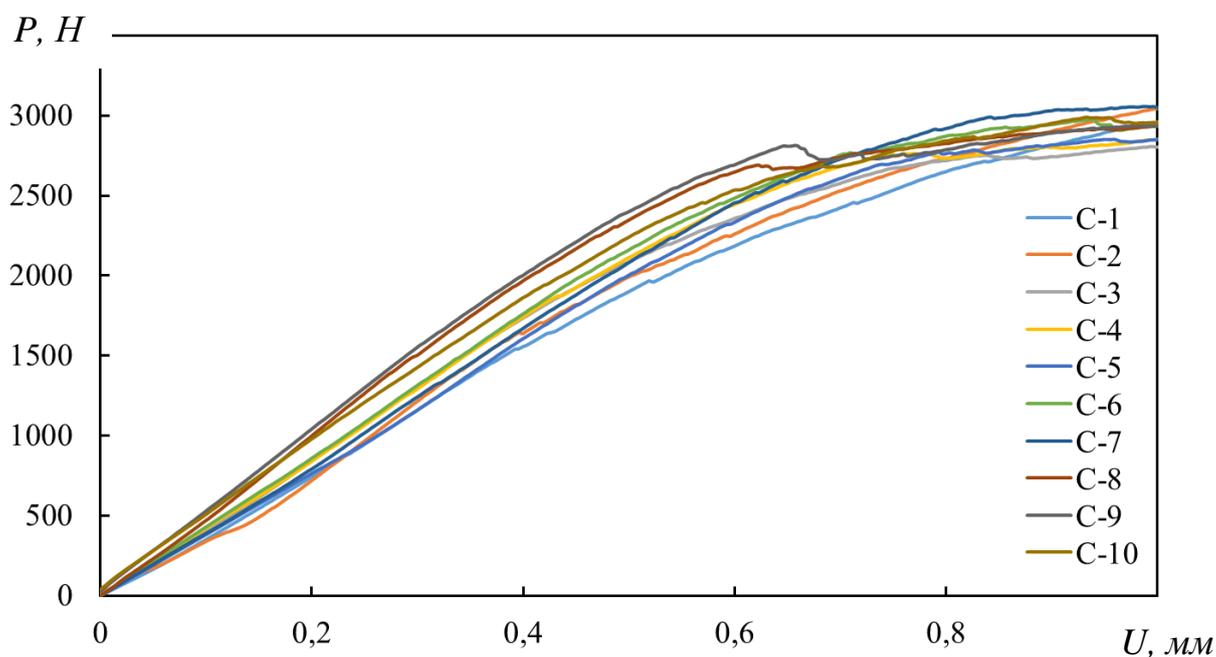


Рис. 3.35. Диаграммы нагружения образцов углепластика

Полученные зависимости (рис. 3.33, 3.34) и данные из таблицы 3.11. показывают, что при использовании инструмента «прямоугольная область (R)» в сравнении с инструментом «виртуальный экстензометр (T)» значения по модулю сдвига G и условной прочности на сдвиг F° имеют меньший разброс, кривые имеют более сглаженный вид и располагаются плотнее друг к другу (отклонения по деформациям составляют не более 1%). Увеличение «прямоугольной области (R)»

также способствует сглаживанию кривых деформирования, что согласуется с результатами, полученными в работе [181]. Отметим, что область (R_1) (см. рис. 3.30) выбрана удовлетворительно, на что указывают относительно небольшие значения коэффициентов вариации механических характеристик композита, которые не превышают 12% (см. таблицу 3.11).

При использовании инструмента «виртуальный экстензометр (T)», имитирующего тензорезисторы, виртуальная пара (T_1 ; T_2) устанавливалась в рабочей зоне по центру между V-образными вырезами, закрывая определенную площадь поля деформаций. Длины виртуальных экстензометров T_1 и T_2 выбирались в соответствии ASTM D5379 - 1,5 мм. Таким образом оказалось, что площадь перекрытия поля деформаций инструментом «виртуальный экстензометр (T)» для данной структуры композита сопоставима с размерами неоднородностей полей деформаций. В зависимости от того как был сделан V-образный вырез (концентратор), в зоне определения деформации образца может оказаться минимальная, максимальная или смешанные области поля деформации. В случае попадания виртуальных экстензометров T_1 и T_2 в область максимальных деформаций последние будут завышены по сравнению со средними, при попадании в минимальную область – занижены (см. рис. 3.34).

Для оценки данного эффекта на примере образца С-7 были построены диаграммы деформирования (рис. 3.36, а) и определены механические характеристики материала (таблица 3.12) с использованием инструмента «виртуальный экстензометр (T)», целенаправленно расположенного в областях минимальных и максимальных деформаций, как показано на рис. 3.36 (б). Анализ результатов показывает, что в зависимости от расположения областей неоднородности, значения данных по модулю сдвига G могут отличаться более чем в 1,6 раза, по условной прочности на сдвиг F° – в 1,4 раза, по пределу прочности F^u – в 1,1 раз.

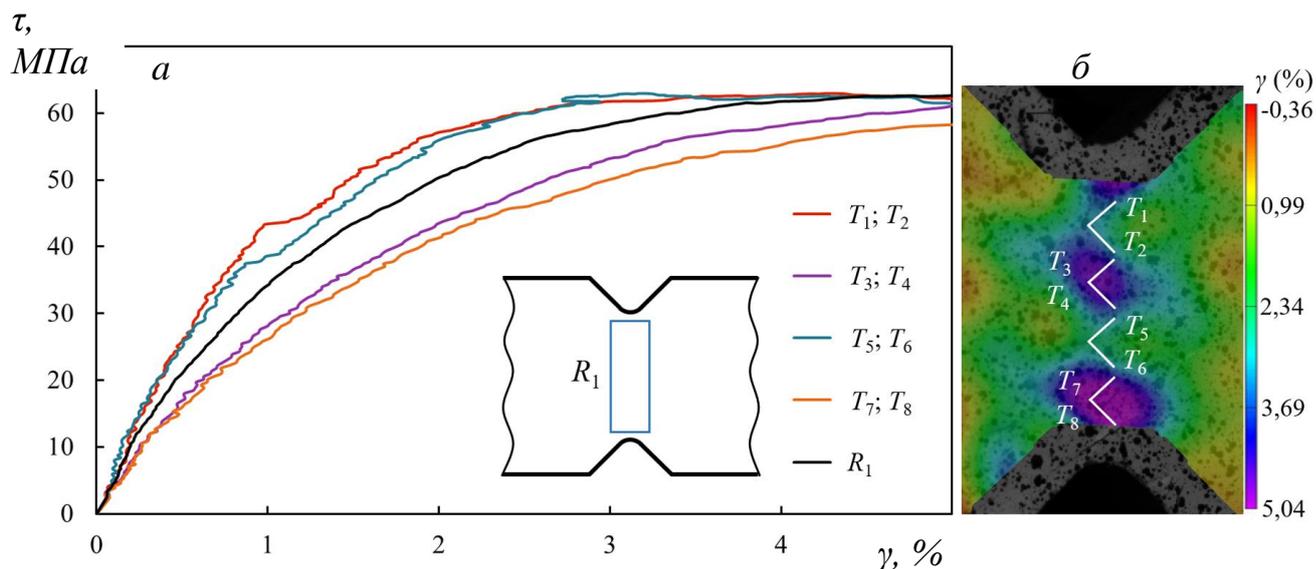


Рис. 3.36. Диаграммы деформирования образца С-7 с использованием инструментов «прямоугольная область (R)» и «виртуальный экстензометр (T)» для определения сдвиговых деформаций (a), схема расположения «виртуальных экстензометров (T)» на поверхности образца (b)

Таблица 3.12. Сравнение результатов эксперимента на сдвиг образца С-7 с использованием инструментов «прямоугольная область (R)» и «виртуальный экстензометр (T)» для определения сдвиговых деформаций

№ п.	Инструмент системы DIC	Предел прочности при сдвиге, F^u (МПа)	Модуль сдвига a , G (ГПа)	Условная прочность на сдвиг, F° (МПа)
1	R_1	62,7	3,38	43,1
2	$T_1 T_2$	63,0	4,56	44,1
3	$T_3 T_4$	61,0	3,01	34,3
4	$T_5 T_6$	63,0	3,92	44,6
5	$T_7 T_8$	58,2	2,77	32,2
6	\bar{x}	61,6	3,53	39,7
7	S	2,1	0,72	5,9
8	$CV, \%$	3,4	20,5	14,9

Стоит отметить, что вероятность попадания «виртуального экстензометра (T)» в области максимальных и минимальных деформаций не высока (в данном исследовании 2 из 10). При использовании большого количества образцов в эксперименте средние значения определяемых механических характеристик

материала будут достоверными. Однако с уменьшением числа образцов (например, до 5) попадание тензорезисторов в такие области может более ощутимо исказить общий результат, значения коэффициентов вариации и среднеквадратических отклонений увеличатся.

Подобные ошибки можно сократить путем увеличения размеров тензорезисторов, однако при этом важно располагать их таким образом, чтобы они соответствовали размеру структурного элемента (δ). В связи с этим, для корректного использования тензорезисторов для данного типа материала при определении деформаций его активная длина должна быть равна примерно 5 мм.

При этом в данном случае целесообразно располагать их внахлест, чтобы не превышать размеры структурного элемента по высоте. На рис. 3.37 (а) приведены результаты сравнения диаграмм деформирования при использовании инструментов «прямоугольная область (R)» и «виртуальный экстензометр (T)» длиной 1,5 мм и 5 мм на примере образца С-3. На рис. 3.37 (б) приведен пример схемы расположения «виртуальных экстензометров (T)» и «прямоугольной области (R)» на поверхности образца для данной структуры. Как видно из рис. 3.37 (а) кривые красного и черного цвета близки по значениям, что говорит о корректном выборе длины тензометров T_1 и T_2 . Отличие кривых можно объяснить тем, что область (R_1) покрывает примерно два структурных элемента, а пара тензометров ($T_1; T_2$) – покрывает область, примерно соответствующую только одному структурному элементу.

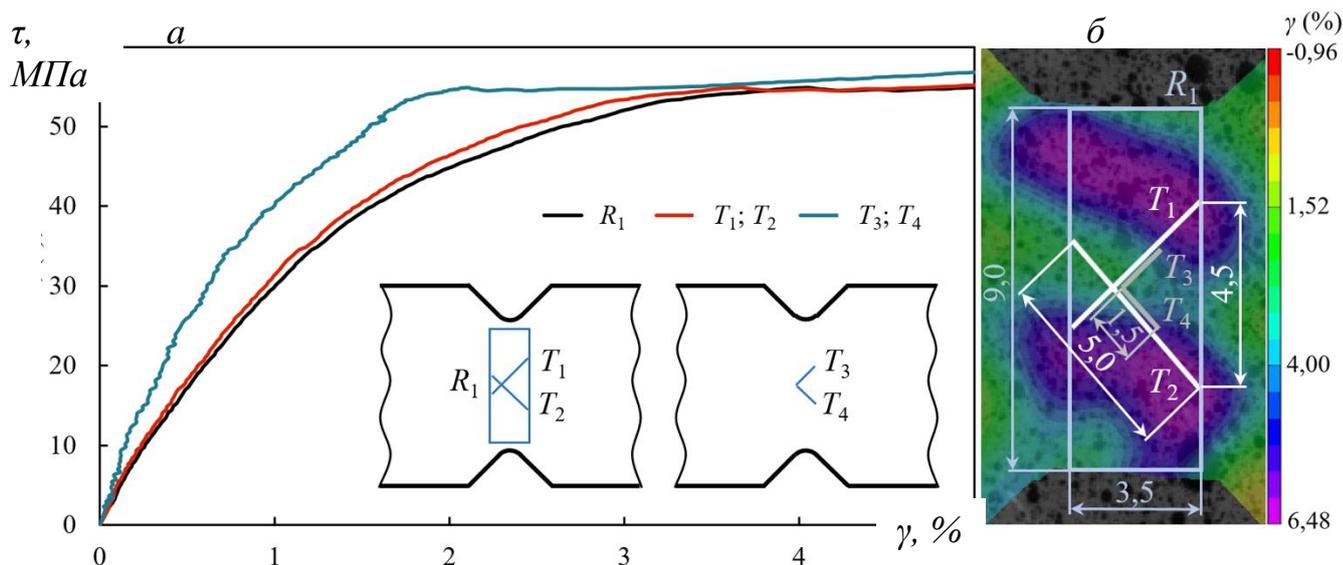


Рис. 3.37. Диаграммы деформирования образца С-3 с использованием инструментов «прямоугольная область (R)» и «виртуальный экстензометр (T)» разной длины для определения сдвиговых деформаций (a), схема расположения «виртуальных экстензометров (T)» и «прямоугольной области (R)» на поверхности образца (b)

Как было сказано ранее, в рамках работы для оценки неоднородности деформации также был использован инструмент «линия (L)». На рис. 3.38 представлен график распределения сдвиговых деформаций вдоль линии L_1 , проведенной через минимальное сечение образца между V-образными вырезами параллельно приложению нагрузки. Можно заметить, что с увеличением нагрузки неоднородность деформации усиливается, кривая приобретает все большую амплитуду флуктуаций, разброс максимальных и минимальных значений деформаций увеличивается. Так, например, при напряжении сдвига $\tau = 62,2 \text{ MPa}$ разброс по сдвиговым деформациям $\Delta\gamma = \gamma_{\max} - \gamma_{\min} = 5,2 \%$ ($\gamma_{\max} / \gamma_{\min} = 2,84$), при $\tau = 10,5 \text{ MPa}$ $\Delta\gamma = \gamma_{\max} - \gamma_{\min} = 0,1 \%$ ($\gamma_{\max} / \gamma_{\min} = 2,1$). Полученные в данной работе результаты носят более неоднородный характер, чем в других работах [112, 165], однако в литературе встречаются результаты с подобными значительными волнообразными деформациями [142, 181].

Из рис. 3.38 можно заметить, что расстояние между минимальными экстремумами составляет примерно 4,5 мм, между максимальными – 4,8 мм. В

среднем для данного типа материала расстояние между экстремумами составляет примерно 4,6 мм, что косвенно подтверждает корректность выбора области осреднения деформаций (R_1), размером 9 мм на 3,5 мм.

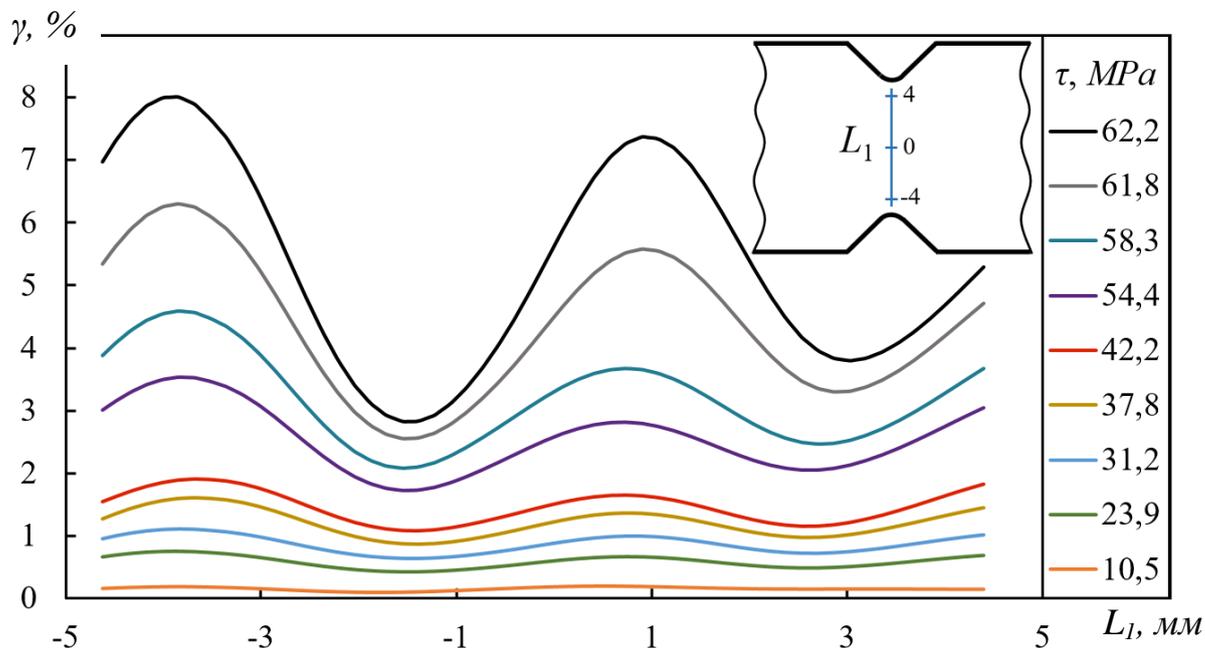


Рис. 3.38. Деформации вдоль линии L_1 между V-образными вырезами при разных уровнях напряжения сдвига на примере образца С-7

Видеосистема обладает преимуществом по сравнению с тензорезисторами и более предпочтительна в использовании, так как позволяет увидеть полную картину распределения сдвиговых деформаций на поверхности образца. И тогда при исследовании полей деформации и структуры материала с помощью видеосистемы можно подобрать размеры и схему расположения тензорезисторов для дальнейших массовых испытаний.

На фотографиях образцов, полученных в процессе нагружения (до обработки специализированной программой Vic-3D), производился визуальный контроль появления трещин. На рис. 3.38 показано при каких напряжениях образовывались трещины на поверхности образца. Контраст изображения отрегулирован так, чтобы выделить быстрорастущие поверхностные трещины.

Формирование картины уровней деформаций в структурно-неоднородной среде определяется характером неоднородности (включение, волокно, жгут). В

данном случае по мере нагружения происходит образование наклонных полос сдвиговых деформаций в рабочей зоне (рис. 3.40, а). При дальнейшем нагружении полосы сдвиговых деформаций в центральной части укорачиваются (рис. 3.40, е). На рис. 3.41 показаны области максимальных деформаций на структуре образца С-1. Здесь можно заметить, что пики максимальных деформаций соответствуют областям между волоконными жгутами структуры данного материала.

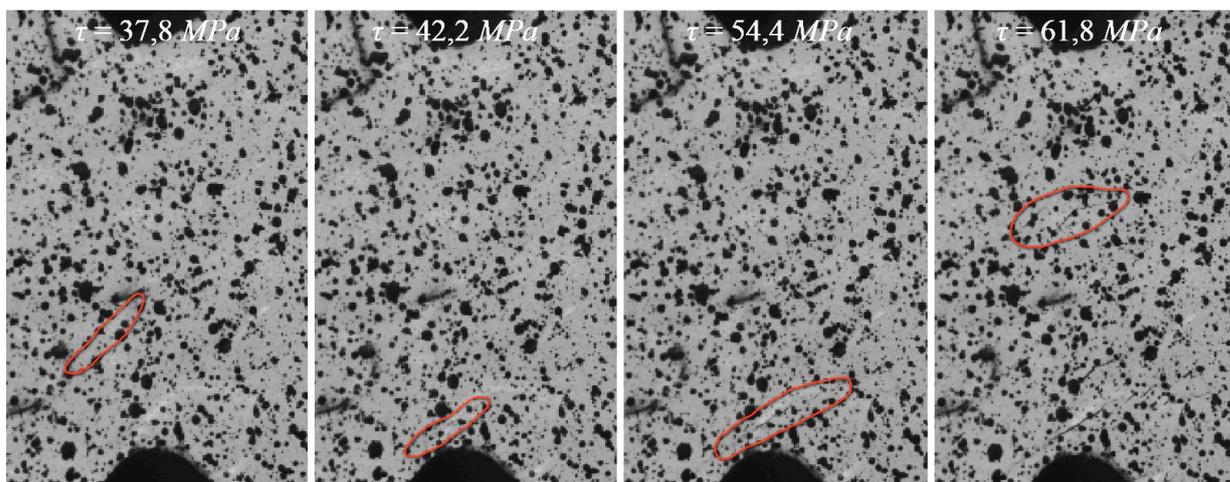


Рис. 3.39. Изображения рабочей зоны образца С-7, полученные видеосистемой Vic-3D, на разных стадиях нагружения, отражающие эволюцию образования трещин

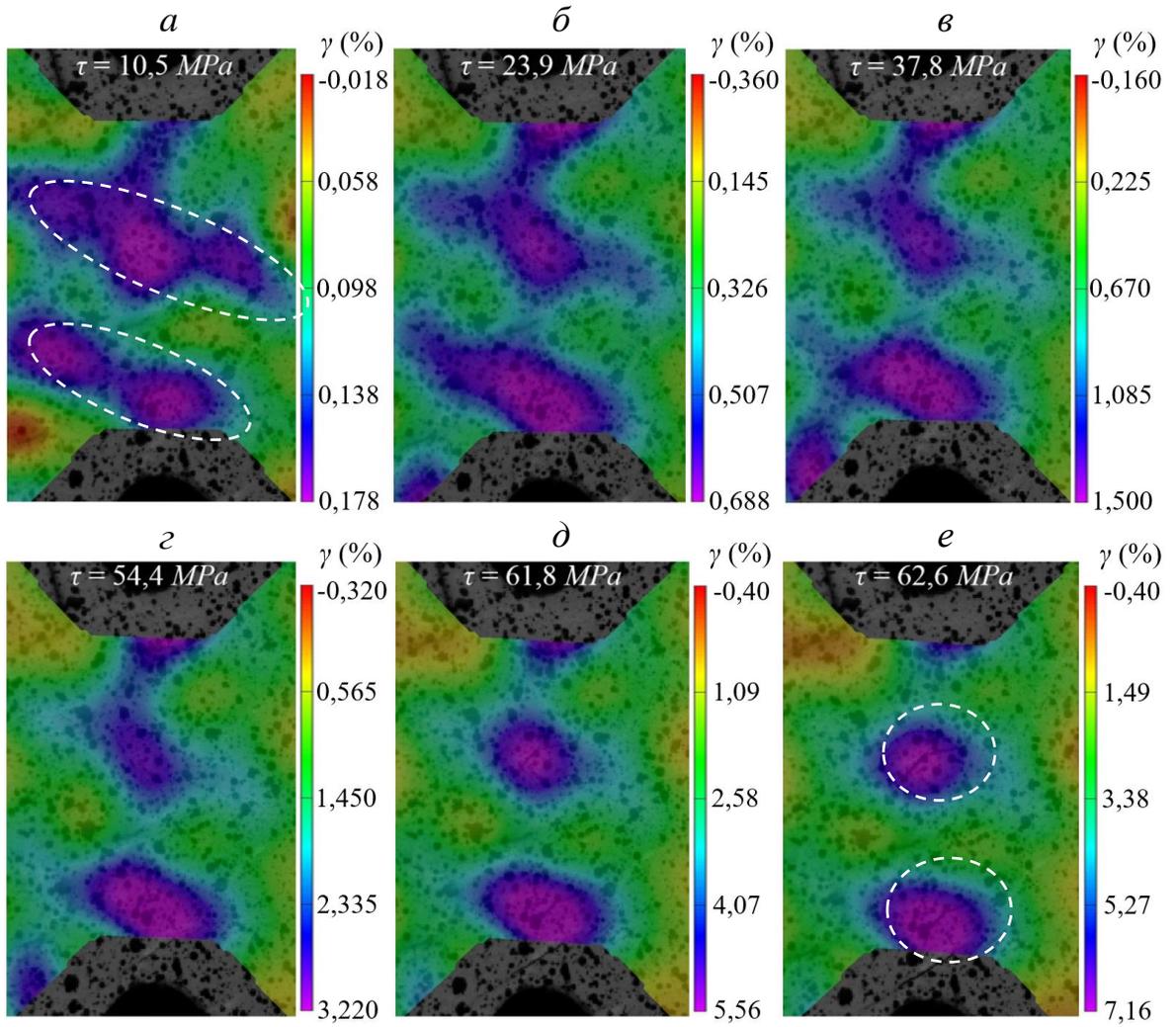


Рис. 3.40. Поля деформаций при разных уровнях напряжения сдвига для образца С-7

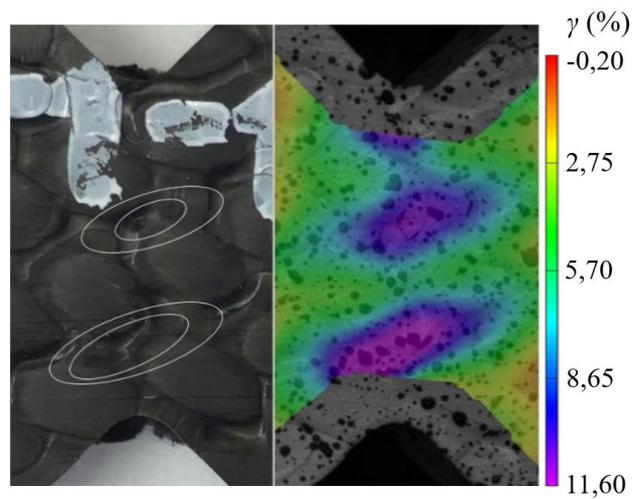


Рис. 3.41. Области максимальных деформаций на структуре для образца С-1

Таким образом, в работе для определения деформаций отдается предпочтение инструменту «прямоугольная область (R)», так как он позволяет включать в осреднение целое число структурных элементов, что не всегда позволяют сделать тензоресисторы. Инструмент «линия (L)», в свою очередь, удобен для оценки степени неоднородности деформаций.

Можно выделить следующие рекомендации: использование видеосистемы дает преимущество перед тензодатчиками, так как позволяет увидеть полную картину неоднородных деформаций в отличие от последних. В случае использования тензорезисторов необходимо подбирать их размеры и схему расположения в зависимости от структуры материала. Так, например, на исследуемом материале было показано, что при определении деформаций для корректного использования тензорезисторов их активная длина должна быть примерно 5 мм, а располагать их необходимо внахлест, чтобы они покрывали область структурного элемента и не выходили за его пределы.

На основании визуального анализа появления трещин можно заключить, что для данного композита характерно накопление повреждений на всем этапе деформирования, начиная с самых ранних стадий. Внутренняя структура композитного материала позволяет нести нагрузку и не позволяет образцу разрушиться мгновенно (лавинообразно), тем самым увеличивая деформационную способность материала.

Основные выводы по главе 3

1. Проведен анализ закономерностей неупругого деформирования композитных образцов в зонах концентрации напряжений. Рассмотрены диаграммы деформирования, картины полей продольных, поперечных и сдвиговых деформаций.

2. Проведены экспериментальные исследования механического поведения композитов в зонах концентраторов с учетом структурных и размерных параметров. Получены результаты оценки влияния размера концентратора напряжений относительно параметров структуры слоисто-волокнутого

композиционного материала при изучении процессов неупругого деформирования и разрушения.

3. Получены опытные данные о влиянии масштабного эффекта на процессы инициирования и развития дефектов в области концентраторов напряжений в структурно-неоднородном материале при квазистатическом нагружении.

4. Предложены рекомендации при определении механических характеристик пространственно-армированных углепластиков при сдвиге ASTM D5379 (метод Iosipescu) с использованием бесконтактной оптической видеосистемы.

4. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОМПОЗИТНЫХ ОБЪЕКТАХ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО И ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

В данной главе приведены экспериментальные исследования по оценке влияния дефектов на остаточную прочность конструкций из композиционных материалов, а также возможности применения локальных ремонтно-восстановительных работ. С целью анализа механизмов разрушения композитных объектов, по полученным экспериментальным данным с видеосистемы исследована эволюция неоднородных полей продольных и поперечных деформаций на поверхности образца с дефектами при статическом нагружении, а также при циклических испытаниях. С помощью инфракрасной тепловизионной системы регистрировались внутренняя структура, процессы развития дефектов, а также распределение температур на поверхности испытываемого образца.

4.1. Влияние дефектов на остаточную прочность конструктивно-подобных элементов конструкций из композитов

Использование композитов позволяет уменьшить массу конструкции при сохранении или улучшении ее механических характеристик. В ходе эксплуатации конструкций из композитов неизбежно возникают различные дефекты, при этом актуальным вопросом становится исследования возможности локального ремонта конструкций в полевых условиях.

Исследования проводились на трехслойных композитных панелях с залеченными дефектами типа сквозного пробоя. Образцы-панели изготовлены из препрега стеклотекстолита ВПС-33 и имеют следующие размеры 150×345 мм. Дефект в центральной части панели изготовлен искусственно, его длина равна половине ширины образца-панели.

Механические испытания на одноосное растяжение проводились на испытательной системе Instron 5982 со скоростью удлинения $u'_0=5,0$ мм/мин,

совместно с использованием цифровой оптической системы Vic-3D (рис. 4.1). Основные параметры корреляционной обработки: $X=71$ пиксель, $\Delta X = 7$ пикселей. Съемка осуществлялась с помощью камер Prosilica GE4900 (объектив - 35 мм f/2,0), скорость съемки составила 15 кадр/сек [36].

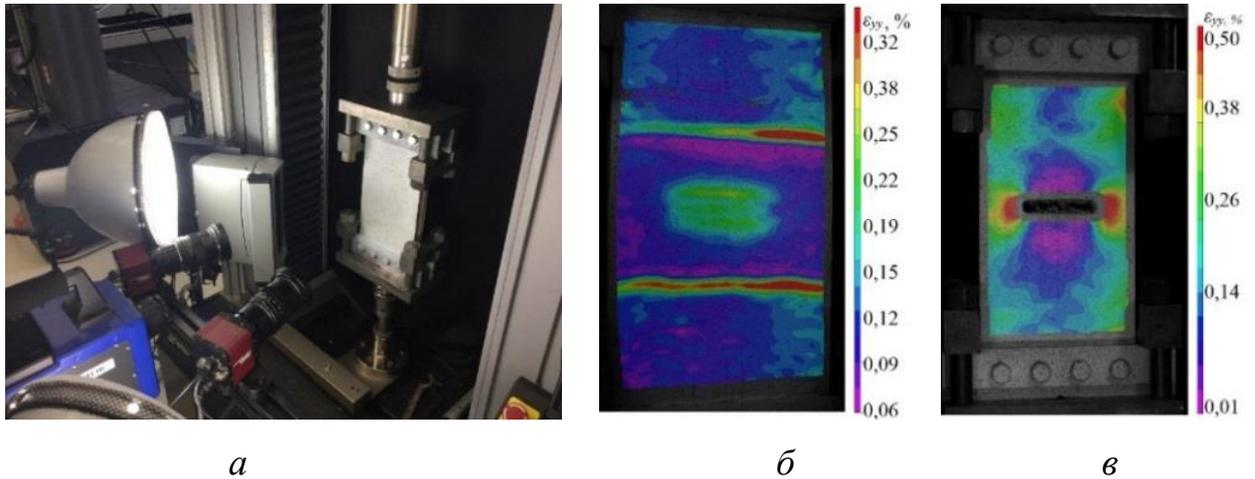


Рис. 4.1. Образец при испытании (а), поля продольных деформаций (ϵ_{yy}) на поверхности образца с залеченным дефектом (б) и образца с дефектом (в), построенные с помощью метода корреляции цифровых изображений

С целью анализа механизмов разрушения образцов-панелей на рис. 4.2. представлены диаграммы, полученные в процессе нагружения. На кривой наблюдаются срывы, что объясняется локальным разрушением клеевого соединения силовых оболочек с трубчатым наполнителем, и последующая за этим локальная потеря устойчивости силовой оболочки [5]. С помощью бесконтактной оптической видеосистемы удалось получить поля продольной деформации (ϵ_{yy}) до отрыва ремонтного слоя, в момент первичного разрушения, так как видеосистема позволяет получать поля перемещений и деформаций на поверхности исследуемого объекта [36].

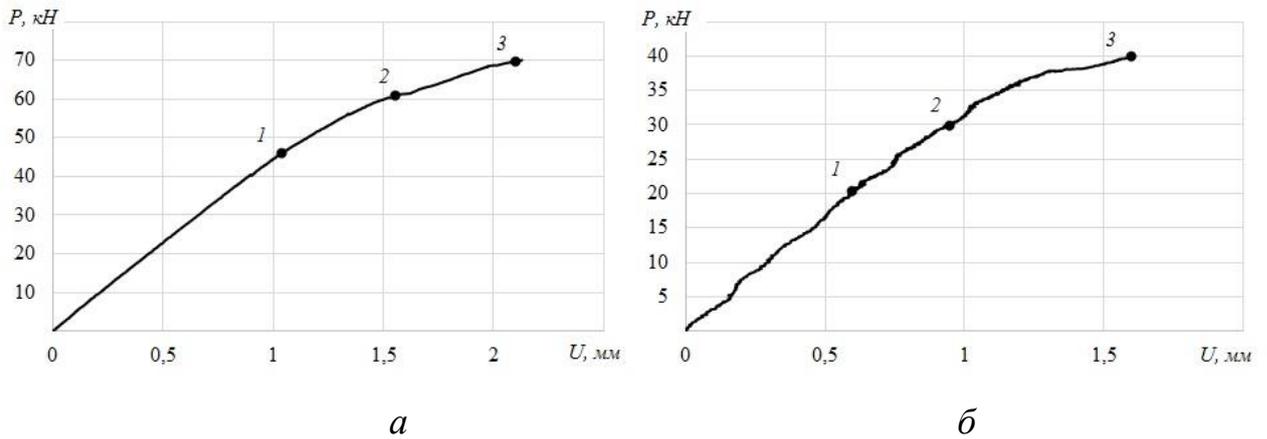


Рис. 4.2. Диаграммы нагружения для образца-панели при одноосном растяжении образца с залеченным дефектом (*a*) и образца с дефектом (*б*)

На диаграммах отмечены точки 1–3 (см. рис. 4.2) для которых приведены поля деформаций при определенной нагрузке для образца с залеченным дефектом - рис. 4.3, для образца с дефектом – 4.4. Из полученных полей деформаций видно, что разрушение образца-панели происходило по краю зоны ремонта, так как трубчатый наполнитель не восстанавливается, и зона дефекта является наиболее слабым местом сечения - концентратором напряжений. Приведенные к данным точкам поля деформаций наглядно демонстрируют места локализации дефектов, которое в свою очередь и приводит к полному разрушению образца [36].

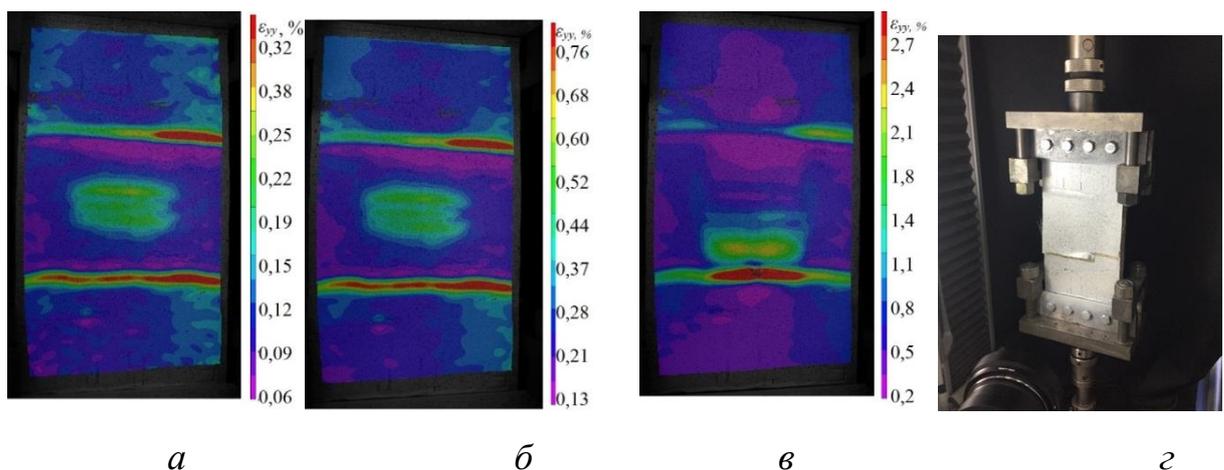


Рис. 4.3. Поля продольной деформации образца-панели при нагрузке $P_1=45$ кН (*a*), $P_2=60$ кН (*б*), $P_3=69$ кН (*в*), фото разрушенного образца в захватах (*г*)

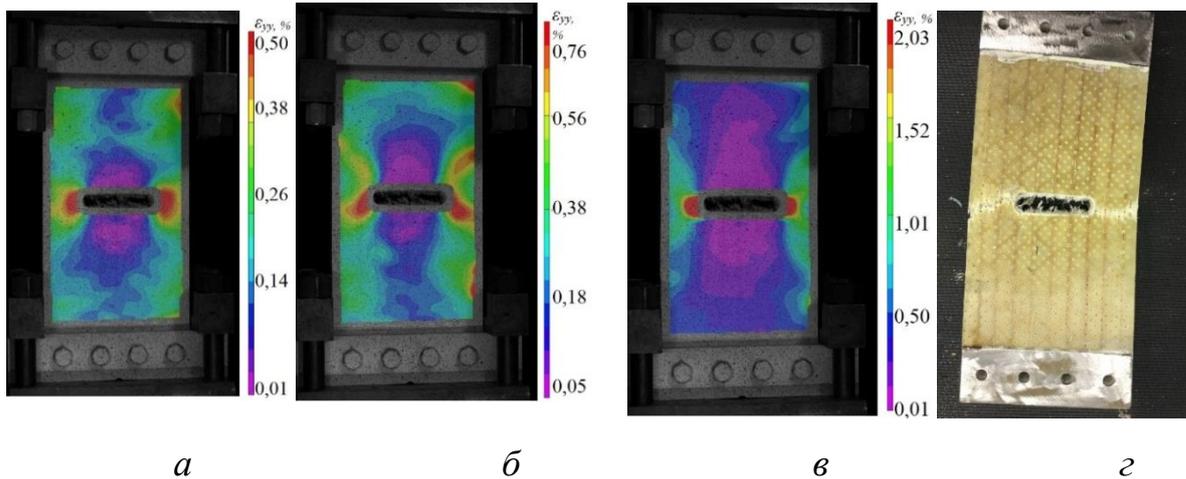


Рис. 4.4. Поля продольной деформации образца-панели при нагрузке $P_1=20$ кН (*a*), $P_2=30$ кН (*б*), $P_3=40$ кН (*в*), фото разрушенного образца в захватах (*г*)

Исследования, связанные с циклическим нагружением, прогнозированием остаточного ресурса, зарождением и распространением усталостных трещин являются актуальными задачами. Метод инфракрасной термографии широко применяется при проведении механических исследований с целью получения детальной информации о закономерностях накопления энергии в процессе деформирования металлов [55, 96, 113, 140, 169]. Ранее исследования с помощью термографии осуществлялись на однородных материалах, но с развитием технологий и появлением современного оборудования этот метод также был применен и к композитам [95, 118, 130].

Программа исследований включала в себя проведение механических испытаний на растяжение образцов-панелей размерами 150 x 350 мм по ранее предложенным методикам [28, 49, 67] при статическом и циклическом нагружении с использованием бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D и инфракрасной тепловизионной системы FLIR для контроля внутренней структуры образца, включая ремонтную зону (рис. 4.5). Тепловизор оснащен детектором типа «кадмий-ртуть-теллур», обладает разрешением 640×512 пикселей, скоростью регистрации 115 Гц (при полном разрешении) и чувствительностью <0,025 °С. Дефект расположен в центральной части образца-панели. Для проведения

исследований был выбран наиболее сложный для реализации ремонта дефект - сквозной пробой конструкции. Размер дефекта выбран из расчета, что длина дефекта равнялась половине ширины образца-панели ($l=70$ мм). Для снижения концентрации напряжений на краях дефекта выполнен радиус $R=7,5$ мм [36].

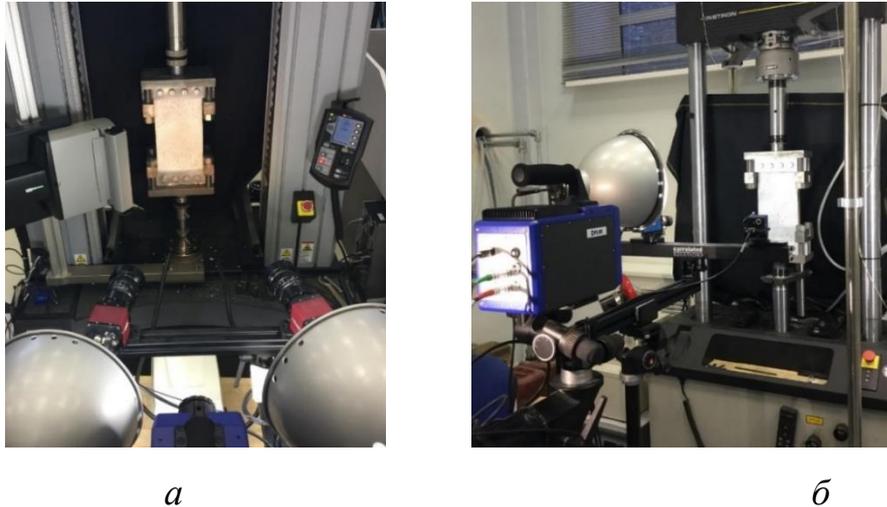


Рис. 4.5. Образы-панели при испытаниях в электромеханической системе Instron 5982 при статическом растяжении (а) и в сервогидравлической системе Instron 8801 при циклических испытаниях (б)

Статические испытания проводились на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5982. Были заданы следующие параметры испытаний: скорость перемещения подвижной траверсы при растяжении $v'_0=5$ мм/мин.; скорость съемки видеосистемой – 15 кадров в секунду, основные параметры корреляционной обработки: $X=59 \times 59$ пикселей, $\Delta X=4$ пикселя; частота съемки инфракрасной тепловизионной системы – 100 Гц [36].

Перед испытанием для контроля внутренней структуры образца и залеченного дефекта осуществлялся пассивный метод термографии – производился нагрев испытуемого образца с помощью лампы накаливания мощностью $W=150$ Вт, продолжительность нагрева составила $t=30$ с, нагрев осуществлялся на расстоянии $L=0,15$ м. На рис. 4.6. приведены термограммы образца до и после

нагрева в ненагруженном состоянии. Для контроля температуры был построен график распределение температур по выбранным линиям, проходящим через геометрический центр на поверхности образца (рис. 4.6, б) после нагрева в момент выключения лампы накаливания (рис. 4.6, в), максимальная температура на поверхности образца не превышает $T_{\max} \leq 40^\circ \text{C}$. Такой режим кратковременного нагрева выбран с учетом того, чтобы повышенная температура не оказывала влияния на механические свойства клеевого слоя в зоне ремонта. Приведенные в работе экспериментальные данные также косвенно свидетельствуют о том, что кратковременное повышение температуры до 40°C не оказывает влияние на механические свойства стеклопластиков и, в частности, клеевого слоя [36].

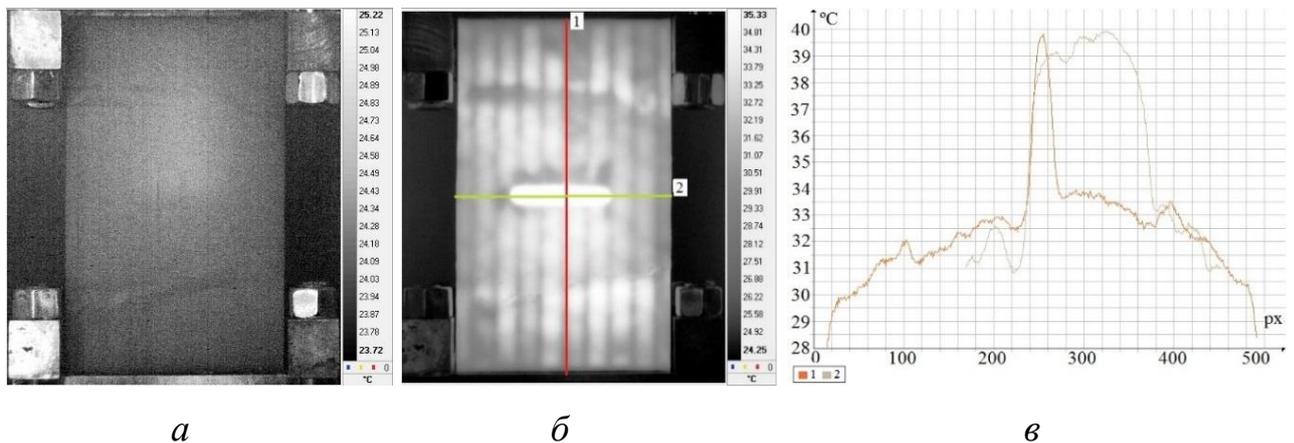


Рис. 4.6. Термограммы образца-панели с залеченным дефектом до (а) и после (б) нагрева и график распределение температур по выбранным линиям на поверхности образца после нагрева (в)

Циклические испытания проводились на сервогидравлической испытательной системе Instron 8801. Параметры циклических испытаний были выбраны исходя из норм коэффициента запаса прочности для авиационных композитов 2 – 2,5. За номинальные значения были приняты данные, полученные при испытаниях образцов-панелей без дефектов, представленные в работе [5]. При реализации программы циклических испытаний использовался знакопеременный несимметричный цикл силового нагружения со следующими параметрами: коэффициент асимметрии $R = -0,25$; амплитуда цикла $N_a = 25 \text{кН}$; форма волны в

виде синуса; частота – 0,25Гц; количество циклов $n=200$. При этом минимальные значения по нагрузке составляли -10кН, максимальные – 40кН [36].

Испытания проводились в два этапа, каждый по 100 циклов. На первом этапе после каждых 10-ти циклов производилась остановка в пике максимума для регистрации полей деформаций и температур с целью анализа зависимости развития локальных повреждений и дефектов от количества циклов нагружения.

На втором этапе, также на каждом 10-м цикле, производилась остановка в пике максимума, далее производился аналогичный по режиму, приведенному выше, нагрев зоны ремонта образца-панели и регистрация внутренней структуры.

По окончании программы циклических испытаний образец-панель статически нагружался до разрушения. При испытании на статическое растяжение были построены диаграмма нагружения (рис. 4.7), поля поперечных и продольных деформаций до отрыва ремонтного слоя, в момент первичного разрушения (рис. 4.8), так как видеосистема позволяет получать поля деформаций на поверхности исследуемого объекта и соответствующие им термограммы (рис. 4.8) [36].

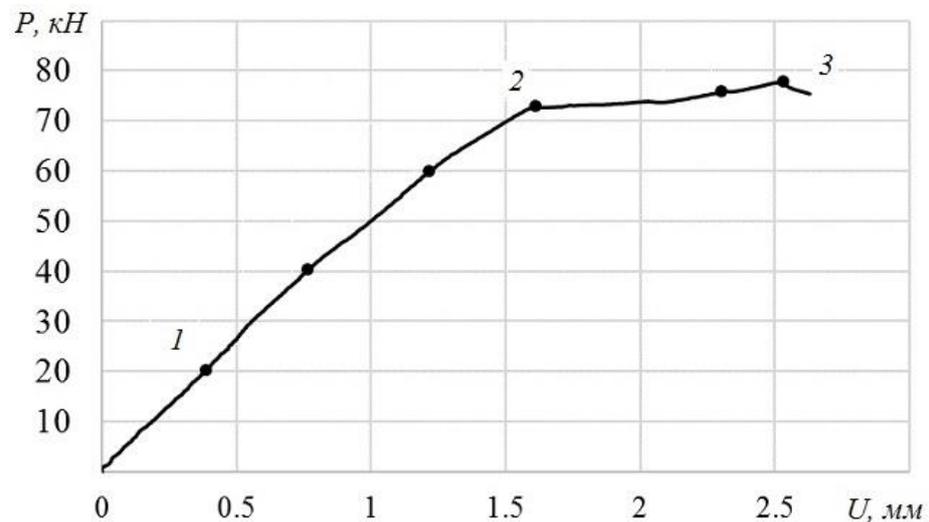
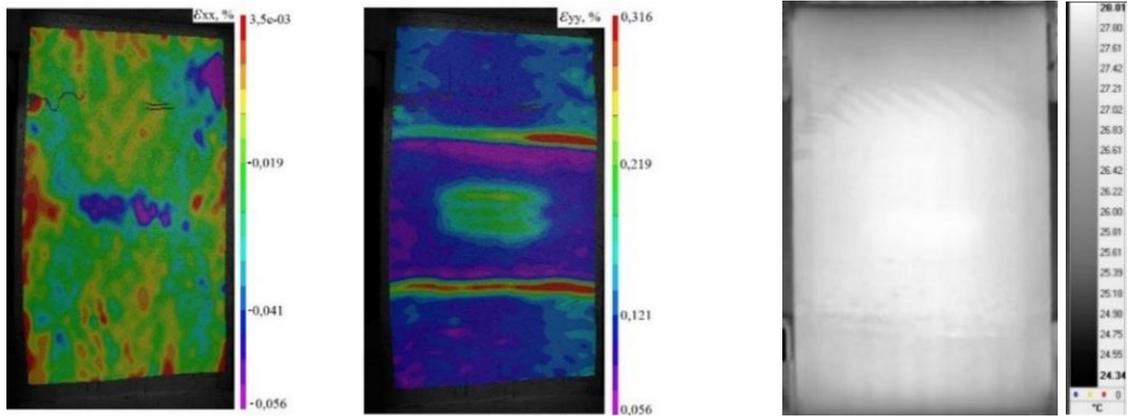
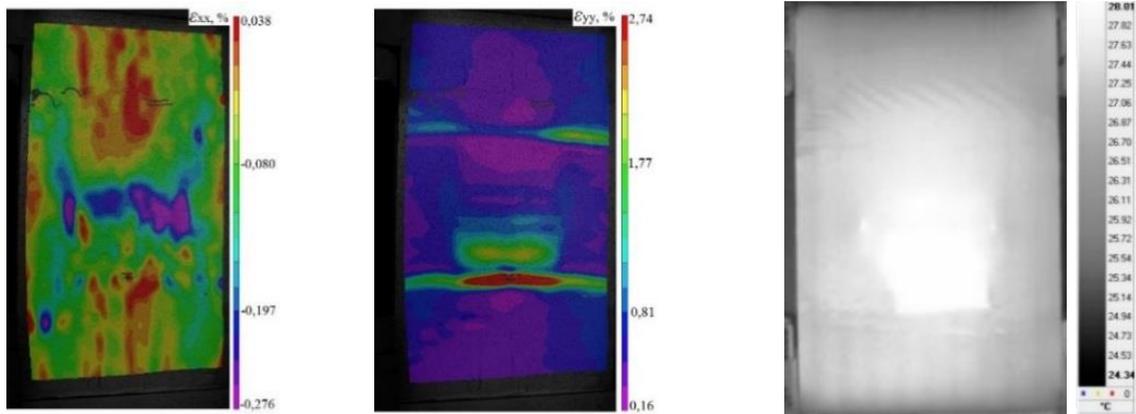


Рис. 4.7. Диаграмма нагружения образца-панели при растяжении



a



б



в

Рис. 4.8. Поля деформаций ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , и термограммы на поверхности образца в ходе испытания на статическое растяжение (*a*, *б*), внешний вид и термограмма в момент разрушения (*в*): *a* – соответствует точке 1 на диаграмме (рис. 4.7); *б* – соответствует точке 2; *в* – соответствует точке 3

Диаграмма нагружения построена по данным видеосистемы с использованием «виртуального экстензометра (Т)», при этом учитывались только перемещения в рабочей зоне образца.

На участке кривой нагружения 1-2 (рис. 4.7) картины полей деформаций и термограммы идентичны и соответствуют рис. 4.8, а, по достижении точки 2 на кривой произошло первичное разрушение, которое сопровождалось треском, и характеризовалось локальным отслоением зоны ремонта (рис. 4.8, б). Далее на участке 2-3 происходило отслоение зоны ремонта по всей ширине образца, что отчетливо видно на термограмме (рис. 4.8, в), разрушение клеевого соединения силовых оболочек с трубчатым наполнителем, и последующая за этим локальная потеря устойчивости силовой оболочки.

Также наблюдалось нарушение целостности контрастного мелкодисперсного покрытия, что привело к невозможности дальнейшего построения полей деформаций. На рис. 4.8 в, приведена фотография образца в момент, соответствующий максимальной нагрузке 78 кН на диаграмме (рис. 4.7, точка 3). Далее произошел динамичный долом образца до полного разрушения. Снижение несущей способности образца-панели с зоной ремонта дефекта относительно образца-панели без дефекта [5] составило примерно 20%.

Циклические испытания проводились в соответствии с описанной выше программой испытаний, при этом следует отметить, что на первом этапе (первые 100 циклов) развитие в зонах концентраторов деформаций не наблюдалось. Распределения полей продольных деформаций и температур имели схожий вид при прохождении контрольных точек регистрации. Поля деформаций и термограммы, соответствующие 50-ти, 80-ти и 100-а циклам нагружения представлены на рис. 4.9. ($n=50$, $n=80$, $n=100$) [36].

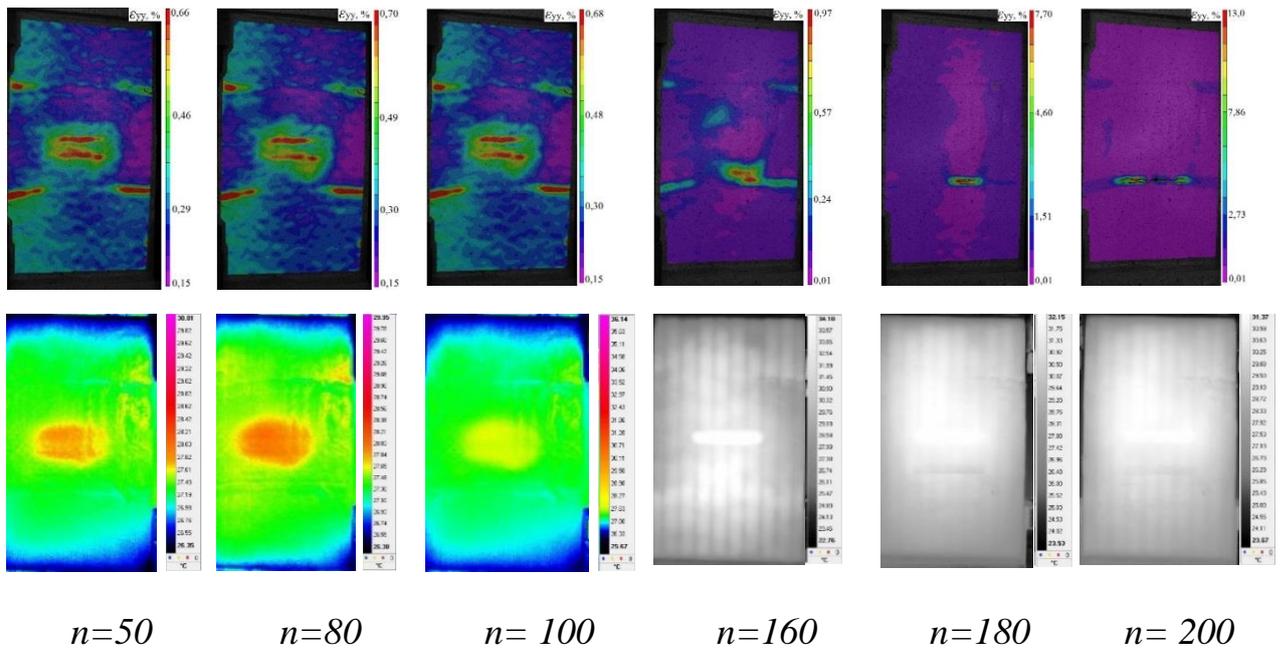


Рис. 4.9. Эволюция полей продольных деформаций и соответствующие им термограммы в зависимости от числа пройденных циклов нагружения

На втором этапе (вторые 100 циклов) до 160-го цикла наблюдалась аналогичная ситуация. Далее циклические нагружения стали сопровождаться характерным треском, после чего на последующих контрольных точках регистрации фиксировалась трещина в центральной части образца по зоне ремонта, что соответственно наблюдалось на распределениях полей продольных деформаций и термограммах и отчетливо видно на рис. 4.9. при $n=180$ и $n=200$.

По результатам регистрации 20-ти контрольных точек циклических испытаний были построены эпюры распределения продольных деформаций по ширине испытываемого образца по линии возникновения отслоения нижней зоны ремонта, расположенной на 40мм ниже геометрического центра образца (рис. 4.10). На рис. 10 вынесены эпюры, соответствующие полям деформаций (рис. 4.9), по которым также можно судить о том, на каком этапе циклических испытаний вследствие разрушения клеящего слоя и последующего отслоения возникла трещина по краю зоны ремонта [36].

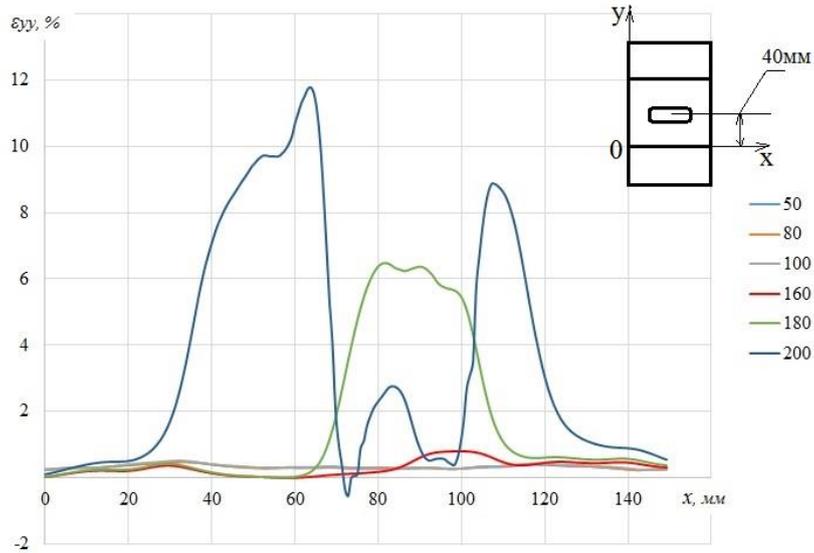


Рис. 4.10. Эпюры распределения продольной деформации ε_{yy} по линии нижней зоны ремонта на всей ширине образца-панели во время циклических испытаний соответствующие контрольным точкам регистрации по прохождению 50, 80, 100, 160, 180 и 200 циклов нагружения

После предварительных циклических воздействий образец-панель был испытан на статическое растяжение. Диаграмма нагружения построена аналогичным способом – по данным видеосистемы (рис. 4.11).

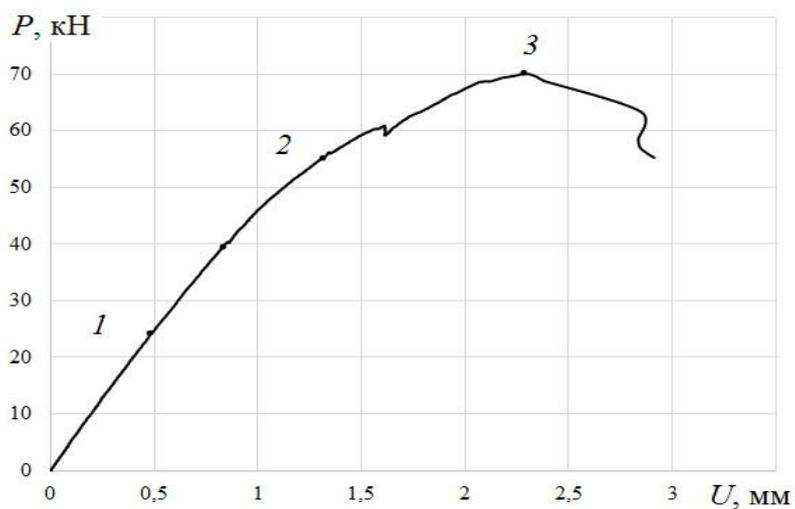


Рис. 4. 11. Диаграмма нагружения образца-панели при растяжении после предварительных циклических воздействий

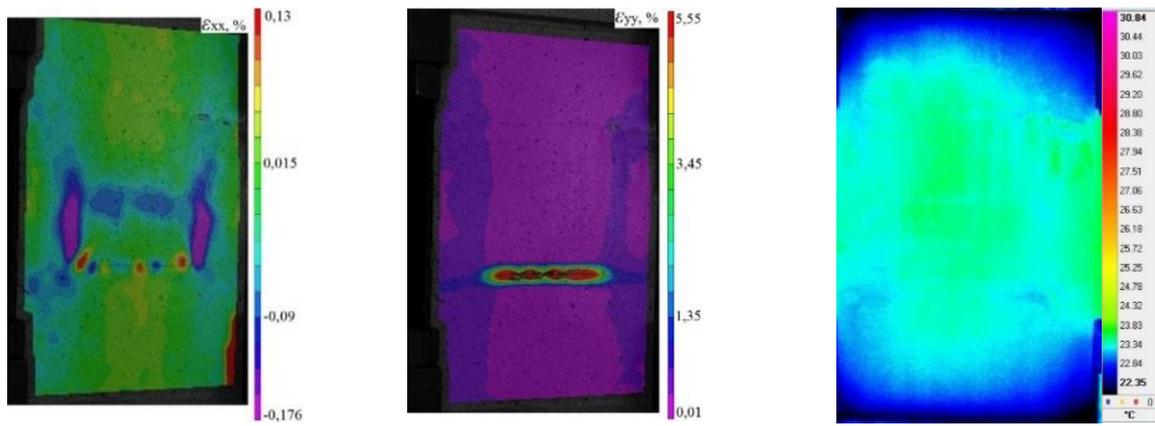
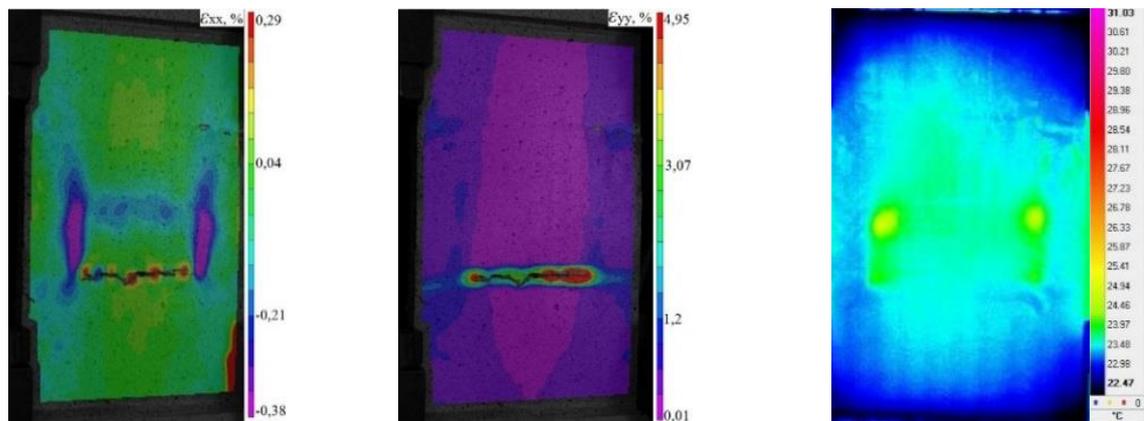
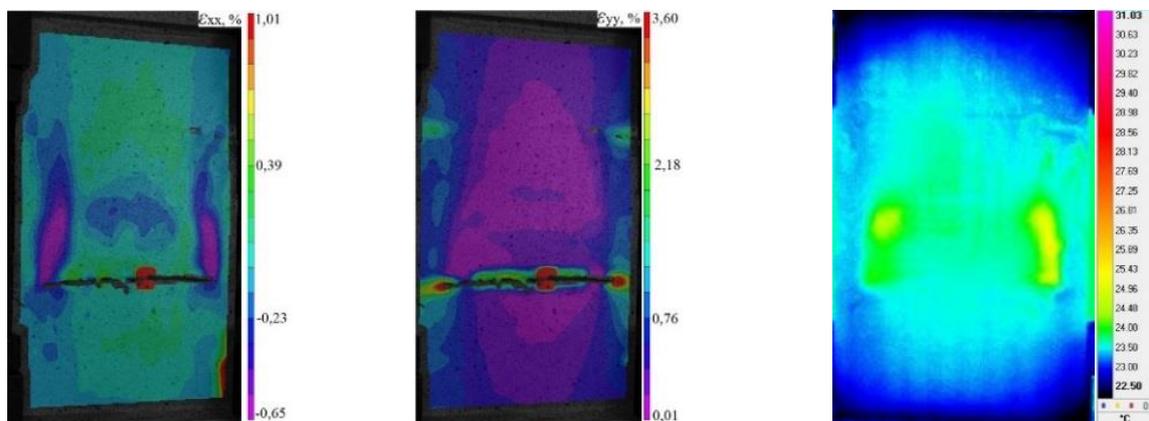
*a**б**в*

Рис. 4.12. Поля продольных и поперечных деформаций ϵ_{xx} , ϵ_{yy} и термограммы на поверхности образца в ходе испытания на статическое растяжение после предварительных циклических нагружений: *a* – соответствует точке 1 на диаграмме (см. рис. 4.11); *б* – соответствует точке 2; *в* – соответствует точке 3

В ходе нагружения образца-панели визуально отмечалось развитие трещины – отслоения по краю зоны ремонта. На рис. 4.12. приведены поля поперечных и продольных деформаций и температур, соответствующие отмеченным на диаграмме нагружения точкам. Анализируя участки 1-2 и 2-3 на диаграмме, можно сделать вывод о постепенном росте трещины. Точка 3 соответствует максимальной нагрузке 70 кН, далее происходил динамический долом.

Показано, что несущая способность образца с нанесенным дефектом на 30% ниже, чем образца без дефекта [5]. Циклические нагружения по описанным режимам привели к дополнительному снижению несущей способности на 10% [36].

4.2. Регистрация неоднородных полей деформаций в области технологических дефектов композиционных пластин

В настоящее время при разработке композитных конструкций, используемых в аэрокосмической промышленности, безопасность обеспечивается разработкой требований, при которых не допускается рост повреждений (дефектов) при эксплуатации. Определение критичности дефектов в материале и надежности является актуальной проблемой в связи с активным использованием углепластиков в качестве современных конструкционных материалов [156, 179]. Основным механизмом разрушения слоистых композитов является расслоение. Расслоение может привести к преждевременному разрушению конструкций, вызывая внезапную потерю устойчивости из-за нарушения адгезии между слоями, где присутствует дефект. Следовательно, расслоенная композитная пластина обладает наименьшей способностью противостоять сжимающим нагрузкам.

Необходимость своевременного обнаружения эксплуатационных повреждений и технологических дефектов приводит к задачам, связанным с оперативным контролем состояния конструкций и их последующим ремонтом с целью продления ресурса [4, 36].

Для исследования данного вопроса разработаны методики проведения механических испытаний композитных образцов с предварительно заложенными технологическими дефектами при совместном использовании систем регистрации неоднородных полей деформаций и температур с целью обнаружения повреждений различными современными средствами диагностики. В данной главе рассмотрено применение методов корреляции цифровых изображений и инфракрасной термографии для анализа механизмов деформирования и разрушения образцов с внутренним дефектом при растяжении/сжатии с кручением. Полученные опытные данные позволят оценить неоднородность процесса деформирования в условиях сложного напряженного состояния [150, 174].

С целью экспериментального изучения механизмов деформирования и разрушения образцов слоистых композиционных материалов с предварительно заложенными технологическими дефектами, соответствующими возможной непропрессовке и непрочлеиванию слоев материала в заданной ограниченной области изготовлены плоские образцы-полоски из препрега серийного углепластика ВКУ-39 с предварительно внедренными технологическими дефектами. Для производства образцов композитных пластин использована наиболее распространённая технология, применяемая в авиационной промышленности — автоклавное формование из препрегов. Процесс производства образцов с заложенными технологическими дефектами типа «расслоение» основан на использовании фторопластовой плёнки, которая укладывается согласно схеме расположения дефектов (таблица 4.1).

В работе рассмотрено 4 варианта укладки технологических дефектов: образец №1 — пакет из одного дефекта в форме квадрата размером $20 \times 20 \text{ мм}^2$, образец №2 — пакет из четырех дефектов в форме квадрата размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$, образец №3 — пакет из восьми дефектов в форме квадрата размером $10 \times 10 \text{ мм}^2$, образец №4 — пакет из четырех дефектов в форме квадрата размером $20 \times 20 \text{ мм}^2$ (таблица 4.1). Суммарная площадь поверхности расслоения у образцов №1 и №2 составляет 400 мм^2 , у образцов №3 и №4 $S_{def} = 800 \text{ мм}^2$ [150, 174].

Таблица 4.1. Схемы укладки технологических дефектов в виде расслоения материала в пластине

Вариант укладки дефектов	Кол-во дефектов	Размер дефекта, мм	Схема укладки дефектов
образец №1	1	20x20	7 и 8 слоев
образец №2	4	10 x 10	1 и 2, 7 и 8, 8 и 9, 14 и 15 слоев
образец №3	8	10×10	1 и 2 слоев, 2 и 3 слоев, 3 и 4 слоев, 7 и 8 слоев, 8 и 9 слоев, 12 и 13 слоев, 13 и 14 слоев, 14 и 15 слоев
образец №4	4	20×20	2 и 3 слоев, 3 и 4 слоев

Геометрические параметры образцов соответствуют параметрам крупногабаритных оболочечных конструкций, которые используются в авиационных двигателях. Образцы изготовлены с помощью плоттера Zund G3-L2500, следует отметить, что на поверхности образца дефект не визуализируется.

Механические испытания на растяжение с кручением проводились на двухосевой (растяжение/кручение) сервогидравлической испытательной системе Instron 8850 (100 кН / 1000 Н·м). В испытаниях регистрировались зависимости изменения «нагрузка-перемещение» и «крутящий момент - угол закручивания» по встроенным датчикам испытательной системы. На первоначальном этапе испытаны образцы-лопатки без дефектов при пропорциональном растяжении с кручением с контролем по положению и углу закручивания при различном соотношении задаваемого перемещения и угла закручивания ($k=u/\varphi$). Параметры испытаний приведены в таблице 4.2. Образцы с дефектами нагружались при выбранном соотношении заданного перемещения к углу закручивания ($k=0,028$) до полного разрушения [150, 174].

Таблица 4.2. Параметры испытаний при пропорциональном растяжении с кручением

№	Скорость закручивания, °/мин	Скорость растяжения, мм/мин	$k=u/\varphi$
1	0	60	0
2	5,0	60	0,083
3	5,0	90	0,056
4	2,5	90	0,028

В процессе нагружения регистрировались поля перемещений и деформаций на одной из поверхностей образцов на основе использования бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы Vic-3D. Съемка реализована комплектом камер высокого разрешения (Prosilica, 16 Мп) с частотой записи 3.5 Гц.

При вычислении полей продольных ε_{yy} , поперечных ε_{xx} и сдвиговых деформаций ε_{xy} ось Oy направлена вдоль образца (вдоль оси растяжения), ось Ox — перпендикулярно оси нагружения в плоскости образца.

На рис. 4.13. приведена фотография, иллюстрирующая взаимное расположение испытательного и регистрирующего оборудования. Синхронизация оптических систем регистрации с контроллером испытательной системы в процессе испытания осуществлялась посредством блока АЦП (NI USB-6251) [150, 174].

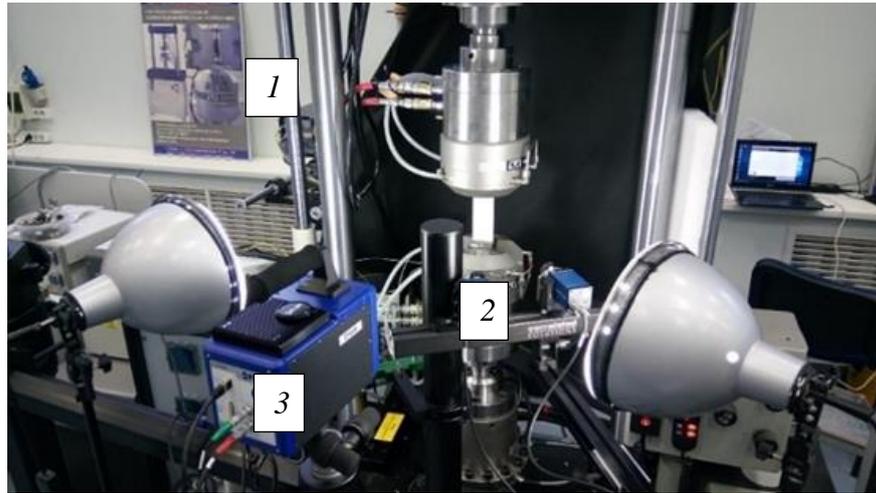


Рис. 4.13. Проведение испытаний на растяжение с кручением совместно с регистрацией полей деформаций и температур: испытательная система Instron 8850 (1), видеосистема Vic-3D (2) и тепловизор FLIR SC7700M (3)

Для идентификации месторасположения и геометрических параметров технологических дефектов типа «расслоения» использован метод активной инфракрасной термографии, при этом регистрация полей температур осуществлялась инфракрасной тепловизионной системой Flir SC7700M.

Перед проведением механических испытаний образцов с технологическими дефектами типа «расслоение» требуется определить место расположение и геометрические параметры дефектов. Методика идентификации технологических дефектов основана на использовании метода пассивной инфракрасной термографии [10]. Опытные образцы подвергались нагреву с помощью лампы накаливания мощностью 150 Вт в течении 10 секунд с расстояния 0.1 м. В процессе нагрева осуществлялась регистрация полей температуры с помощью тепловизионной системы FLIR SC7700M [150, 174].

На рис. 4.14. представлены результаты анализа неоднородных полей температур, иллюстрирующие внутренние дефекты в образцах. Поле температур представлено в значениях изменения температуры, где величина ΔT получена путем вычитания первого кадра. Использование данной методики позволило визуализировать конфигурацию внутреннего дефекта, а также зафиксировать смещение дефекта относительно центра рабочей части образца (рис. 4.14, б).

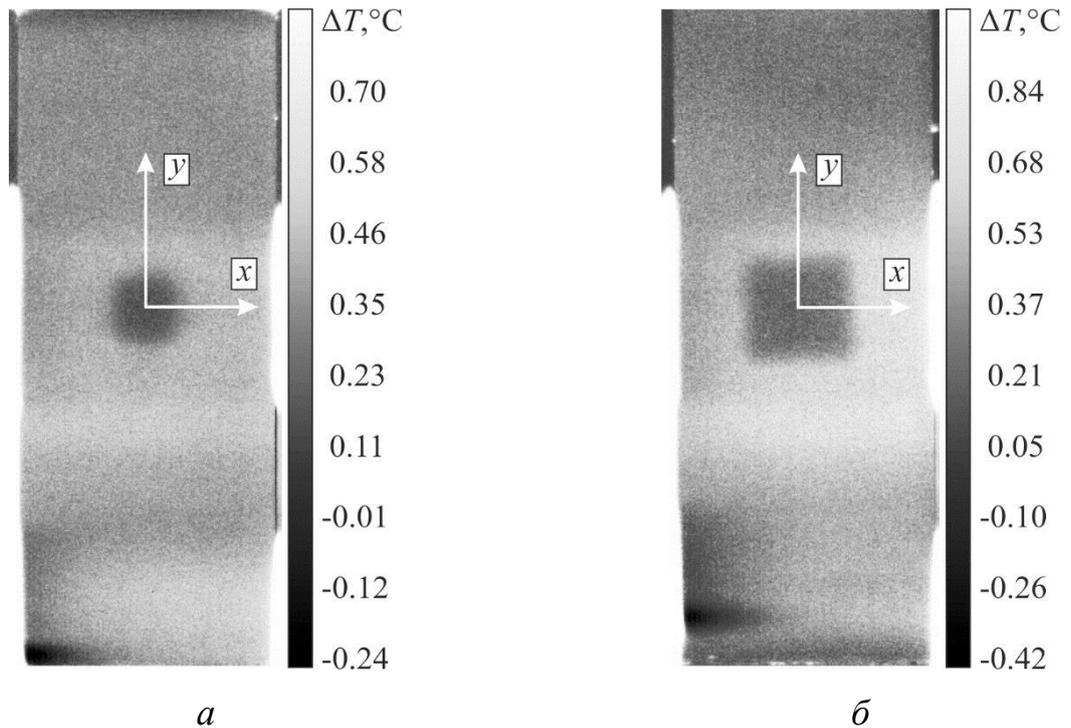


Рис. 4.14. Поля температур на поверхности образцов с различной схемой укладки технологических дефектов: образец №3 (а), образец №4 (б)

Проведены механические испытания образцов без дефектов при пропорциональном растяжении с кручением с различным соотношением задаваемого перемещения и угла закручивания в диапазоне $k=0\div 0,083$. Для проведения дальнейших исследований образцов с внутренним дефектом выбрано соотношение $k=0,028$. При данном соотношении достигаются большие значения как растягивающего усилия, так и крутящего момента [150, 174].

На рис. 4.15. приведены графики зависимостей «нагрузка-перемещение» и «крутящий момент-угол закручивания» по встроенным датчикам испытательной системы, полученные при выбранном соотношении u/φ . В качестве примера на рис. 4.15, (б) приведена фотография образца после проведения испытания. Следует отметить, что макроразрушение опытных образцов происходило в области захватной части при уровне осевой нагрузки $P_{\max}=48,2$ кН и крутящего момента $M_{\max}=72,2$ Нм.

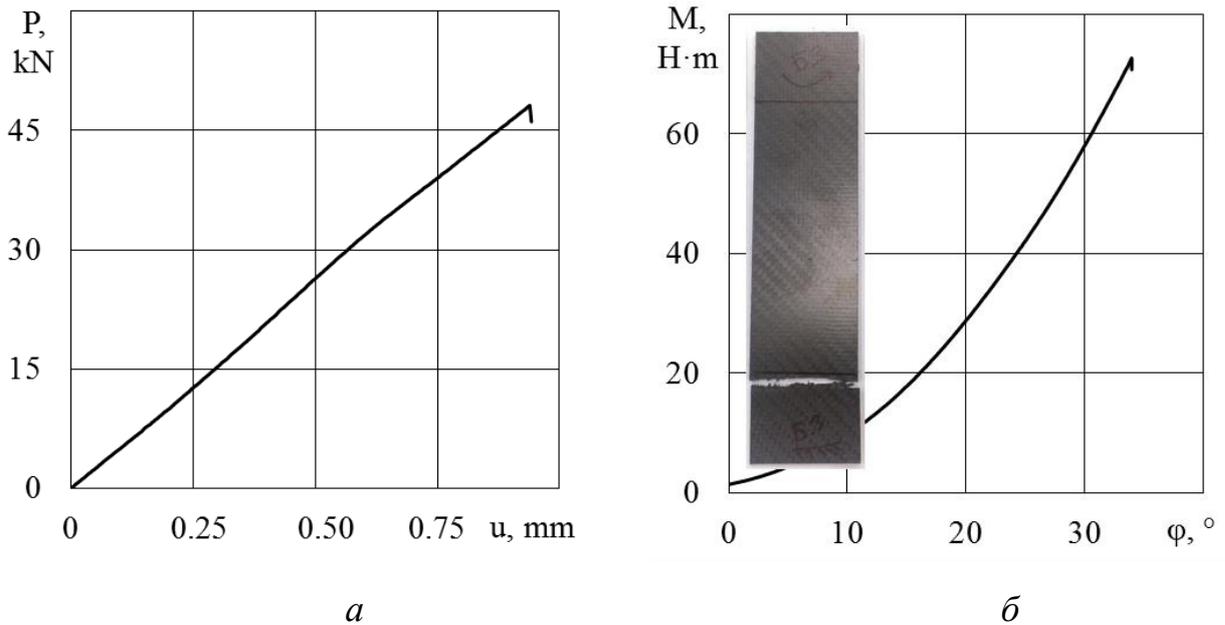


Рис. 4.15. Диаграммы нагружения P от U и M от φ при растяжении с кручением образца без дефекта и выбранном соотношении $k=0,028$

С целью экспериментального исследования механизмов неупругого деформирования и разрушения образцов углепластика с внутренними дефектами в условиях сложного напряженного состояния реализованы механические испытания при пропорциональном растяжении с кручением при соотношении $k=0,028$. Для оценки развития внутреннего дефекта проведены испытания с тремя разгрузками и повторными нагружениями. Разгрузка осуществлялась до уровня осевой нагрузки $P=10$ кН. В случае развития внутреннего дефекта в процессе нагружения возможно изменение картин полей деформаций в момент разгрузки [150, 174].

На рис. 4.16. представлены диаграммы нагружения в координатах «нагрузка-перемещение» и «крутящий момент-угол закручивания», полученные при растяжении с кручением образцов №2 и №3 в соответствии со схемой укладки технологических дефектов в виде расслоения материала в пластине (см. таблица 4.1).

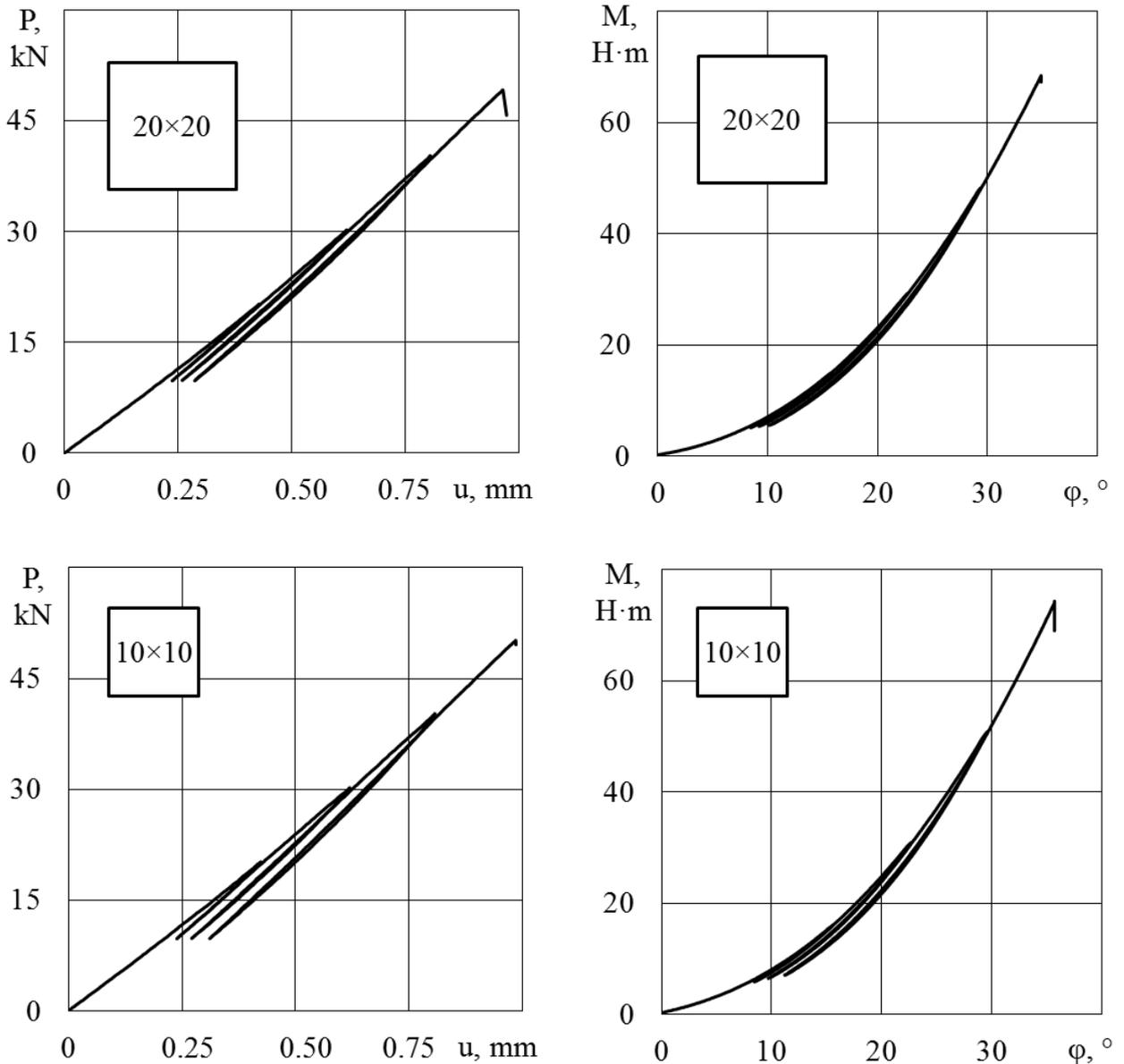


Рис. 4.16. Диаграммы нагружения P от U и M от φ при растяжении с кручением образцов с внутренним дефектом при выбранном соотношении $k=0,028$

Представляет интерес анализ эволюции неоднородных полей продольных деформаций на поверхности исследуемых образцов в процессе нагружения. На рис. 4.17. представлена временная зависимость осевой нагрузки, на которой отмечены контрольные точки, в соответствии с которыми представлены деформационные поля для образца №4 (рис. 4.18).

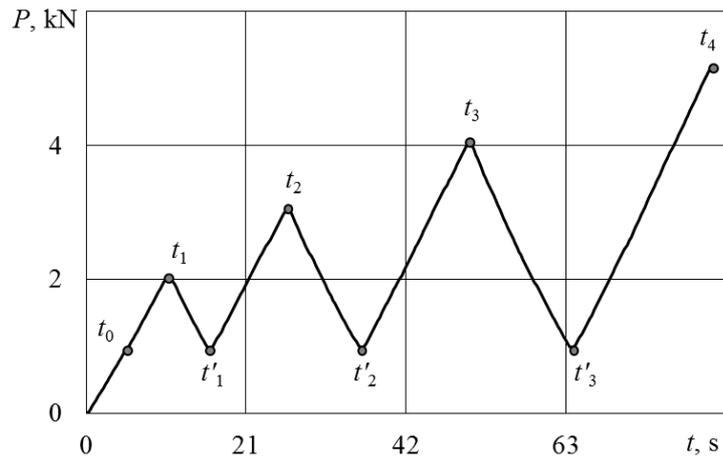


Рис. 4.17. Зависимость «нагрузка-время» для образца с дефектом $20 \times 20 \text{ мм}^2$

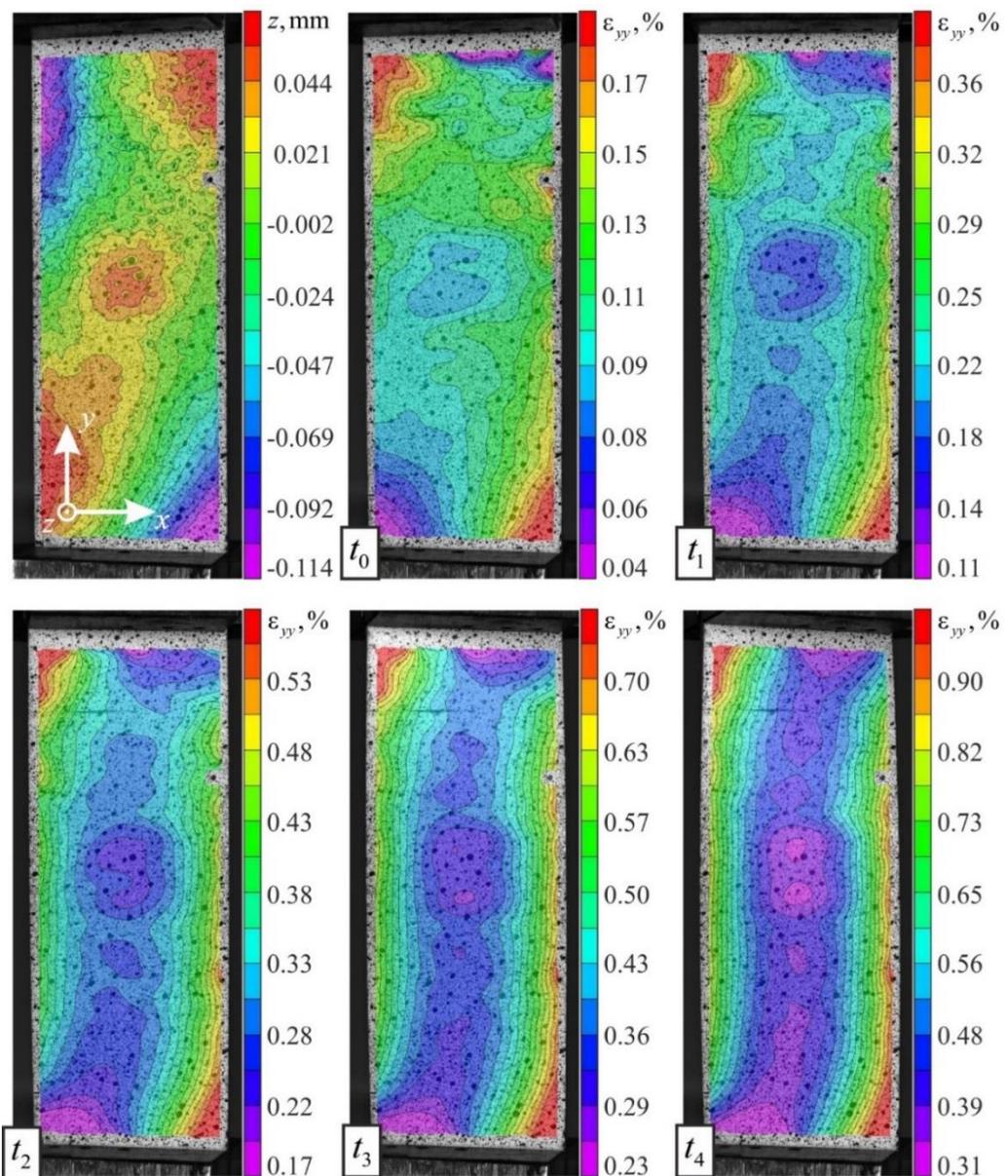


Рис. 4.18. Эволюция полей продольных деформаций в точках $t_0 - t_4$

для образца №4

Область дефекта на поверхности образца проявляется еще в не нагруженном состоянии, о чем свидетельствует поле, полученное по оси z (рис. 4.18). Падение значений продольной деформации соответствует области расположения дефекта в образце. На поверхности отмечается неоднородность полей в центральной части образца. По мере увеличения нагрузки возрастает степень неоднородности в области внутреннего дефекта [150, 174].

На основе полученных данных построены эпюры продольных деформаций (рис. 4.19, рис. 4.20) вдоль оси нагружения (вдоль оси Oy), начало координат установлено в середине рабочей части образца. Кривые построены в контрольных точках $t_0 - t_4$, соответствующих значениям осевой нагрузки $P=10, 20, 30, 40$ и 50 кН. Пунктирными линиями отмечены границы дефекта (рис. 4.19) именно в данной области отмечен спад по продольным деформациям, по мере увеличения осевой нагрузки, деформация в области дефекта уменьшается [150, 174].

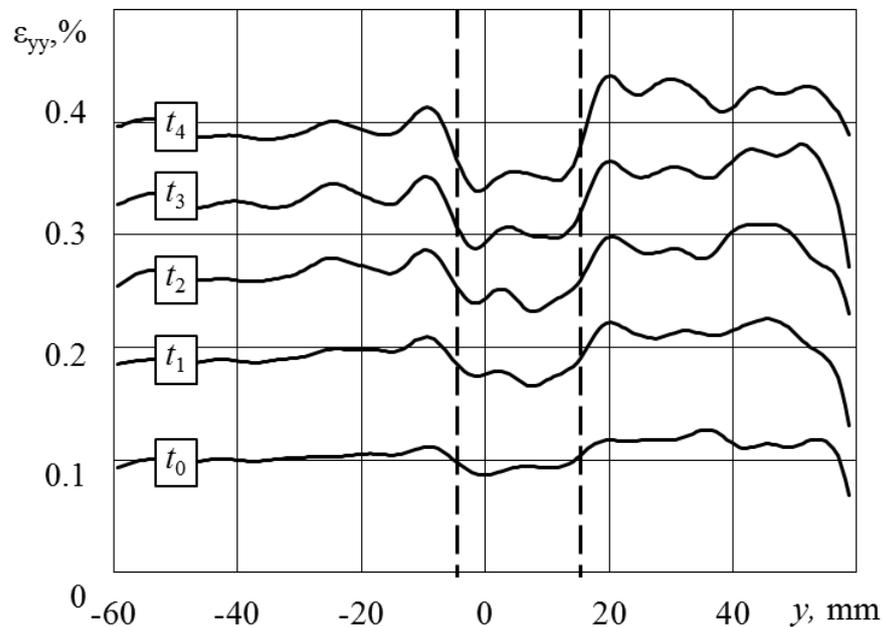


Рис. 4.19. Эпюры продольной деформации вдоль оси Oy в точках $t_0 - t_4$ для образца №4

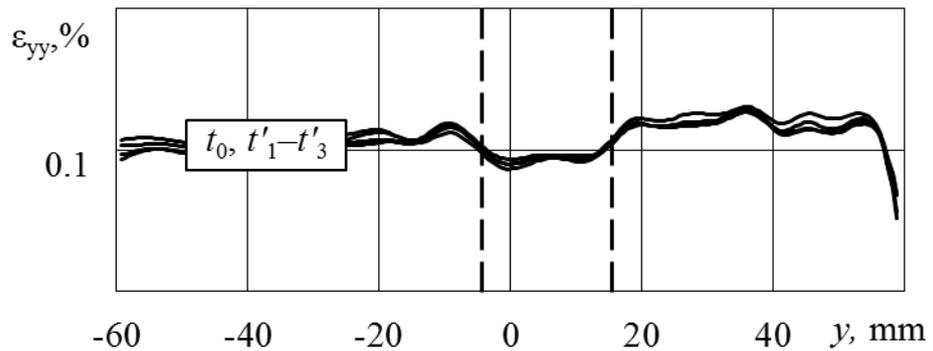


Рис. 4.20. Эпюры продольной деформации вдоль оси Oy в точках $t_0, t'_1 - t'_3$ для образца №4

В процессе нагружения не обнаружено расслоение материала в области дефекта, об этом свидетельствуют эпюры продольных деформаций, полученные в моменты разгрузок образца ($t_0, t'_1 - t'_3$) при уровне осевой нагрузки $P=10$ кН.

Так как целью данной работы является исследование механизмов неупругого деформирования и разрушения образцов с внутренним дефектом, то представляет интерес анализ эволюции неоднородных полей продольных деформаций на поверхности образца с дефектом меньшего размера. На рис. 4.21. представлены деформационные поля, соответствующие контрольным точкам (рис. 4.17), для образца №3 [150, 174].

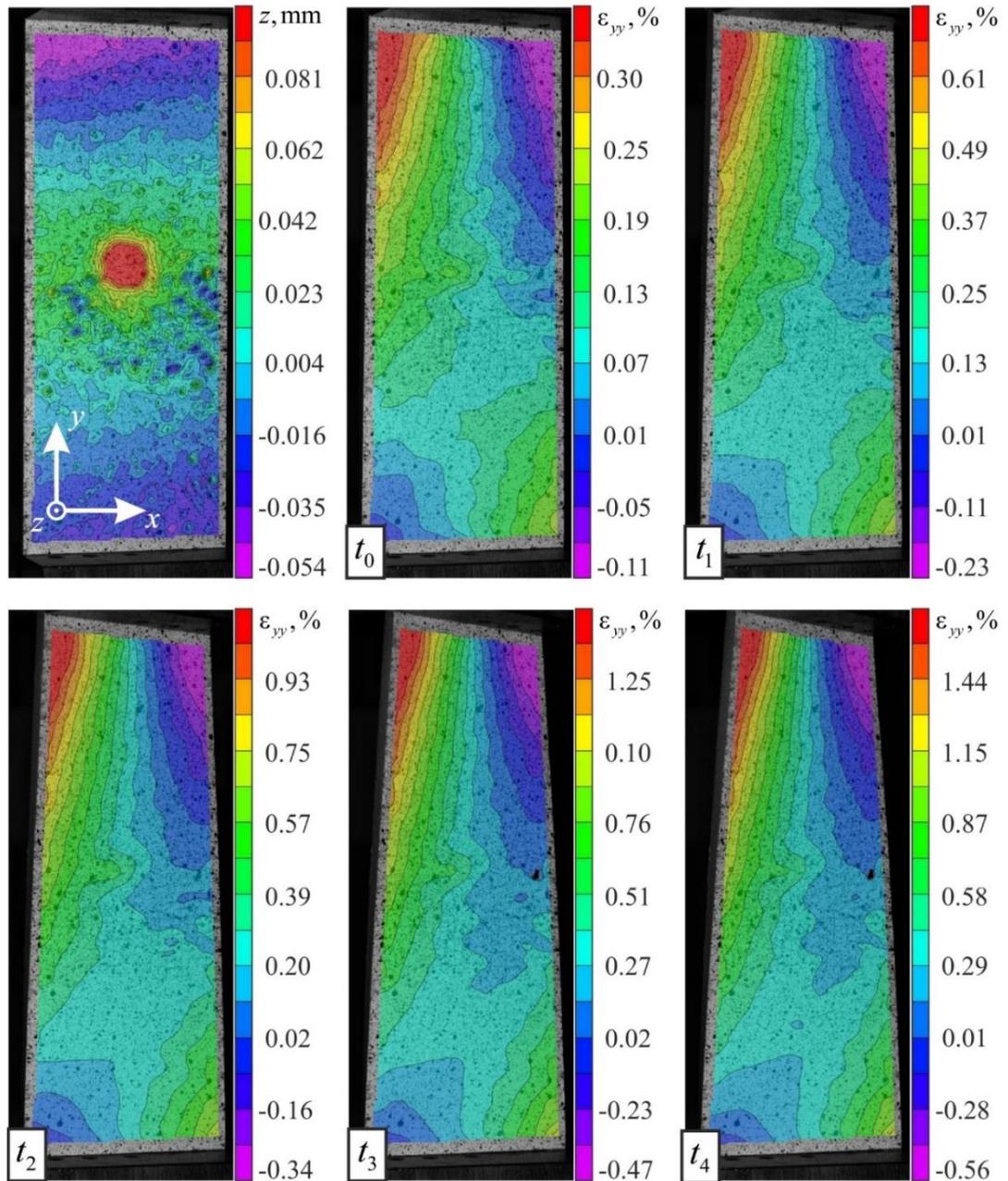


Рис. 4.21. Эволюция полей продольных деформаций в точках $t_0 - t_4$ для образца №3

На поверхности образца неоднородность полей в центральной части - в области дефекта не зафиксирована. По результатам изучения картин деформационных полей построены серии эпюры продольных деформаций (рис. 4.22) вдоль оси нагружения (вдоль оси Oy), начало координат установлено в середине рабочей части образца [150, 174].

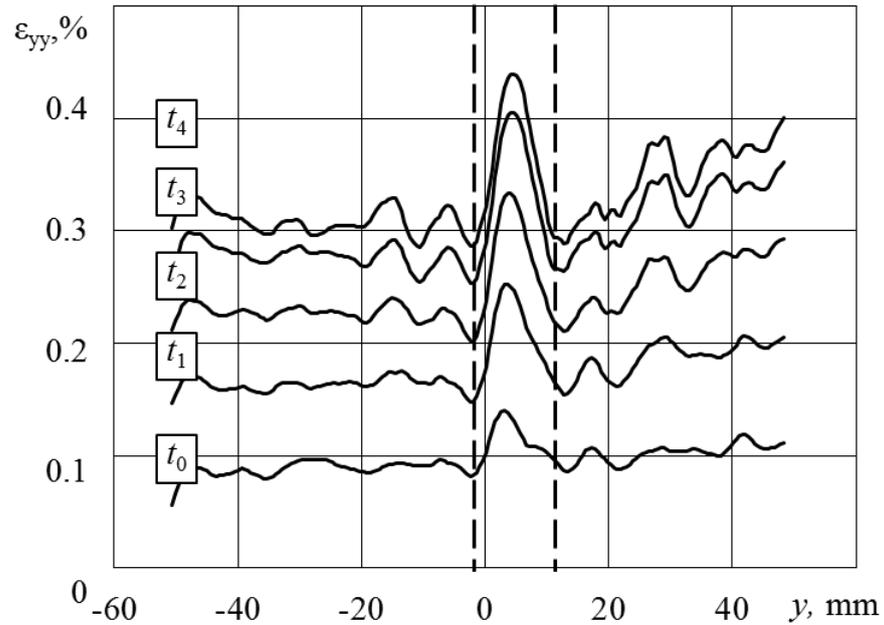


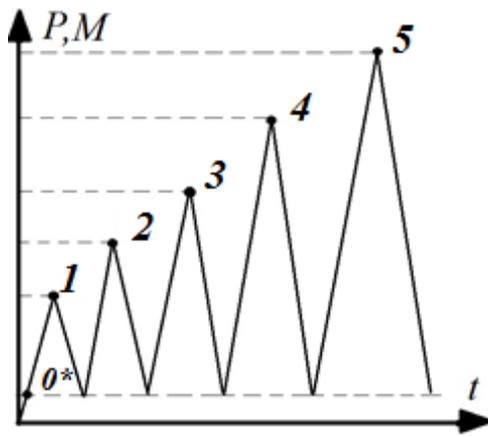
Рис. 4.22. Эпюры продольной деформации вдоль оси Oy в точках $t_0 - t_4$ для образца №3

Кривые построены в контрольных точках $t_0 - t_4$. В области дефекта отмечен всплеск деформаций, увеличивающийся по мере нагружения. В момент времени t_4 зафиксирован максимальный всплеск деформаций, соответствующий уровню осевой нагрузке $P=50$ кН.

Отмечено, что в процессе нагружения расслоение материала в области дефекта не происходило, как в образце с дефектом большего размера, так и в образце с дефектом меньшего размера. С помощью анализа эволюции неоднородных полей продольных деформаций на поверхности образца с дефектом меньшего размера не удалось зафиксировать область дефекта, но на поверхности образца №4 отмечается неоднородность полей в центральной части образца.

На основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что для эффективной оценки развития дефекта в композитном образце целесообразно учитывать результаты не только на статическое растяжение, но и на сжатие. Механические испытания проводились на двухосевой (растяжение-сжатие/кручение) сервогидравлической испытательной системе Instron 8850. Режимом нагружения было выбрано совместное сжатие с кручением. Скорость по

оси сжатия составила 1 кН/мин, закручивания 5 Н*м/мин до определенных значений в соответствии со схемой, представленной на рис. 4.23 [150, 174].



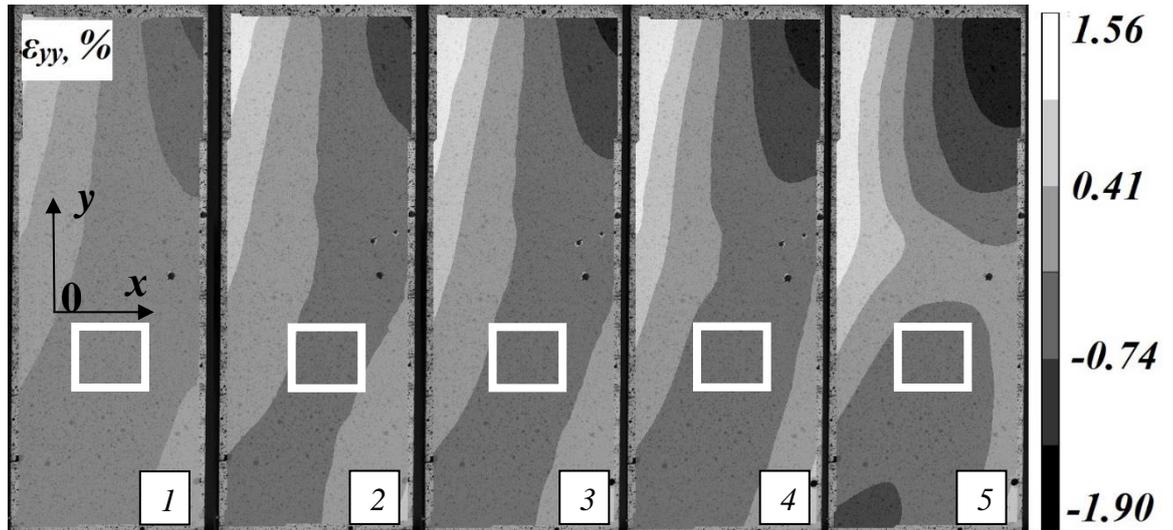
точки	0*	1	2	3	4	5
$M, Н*м$	5	10	15	20	25	30
$P, кН$	1	2	6	8	10	12

а

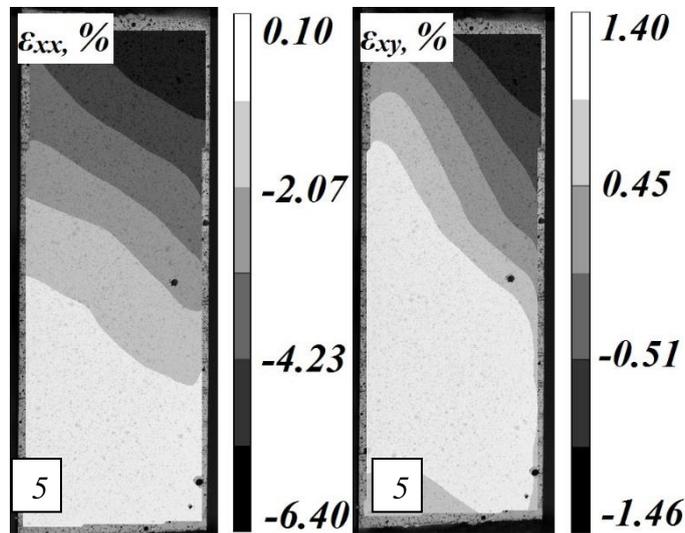
б

Рис. 4.23. Схема нагружения образца с технологическим дефектом (а), значения нагрузки при сжатии в соответствии с крутящим моментом (б)

В процессе нагружения регистрировались поля перемещений и деформаций на основе использования бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы Vic-3D. По результатам экспериментальных исследований были получены неоднородные поля продольных деформаций для образца с размером дефекта 20×20 мм (образец №1), представленные на рис. 4.24, а, поля поперечных (рис. 4.24, б) и сдвиговых деформаций (рис. 4.24, в), соответствующие точкам на схеме нагружения (см. рис. 4.23) [16].



а



б

в

Рис. 4.24. Неоднородные поля продольных деформаций на поверхности образца №1 (а) в точках 1-5, поля поперечных (б) и сдвиговых (в) деформаций в точке 5 (см. рис. 4.23)

Из полученных результатов, в области дефекта не отмечаются изменения в полях продольных, поперечных и сдвиговых деформаций, изолинии без изломов, отсутствует локальная концентрация, это свидетельствует о том, что дефект данного размера не регистрируется на поверхности образца. На основе полученных данных построены эпюры продольных деформаций (рис. 4.25) вдоль оси нагружения (вдоль оси Oy), ось Oy совпадает с осью симметрии. В процессе нагружения не обнаружено расслоение материала в области дефекта, об этом

свидетельствуют эпюры продольных деформаций, полученные при разгрузке при уровне осевой нагрузки $P=1$ кН (рис. 4.25). Пунктирными линиями отмечены границы дефекта (рис. 4.25), по мере увеличения осевой нагрузки, деформация в области дефекта не изменяется [16].

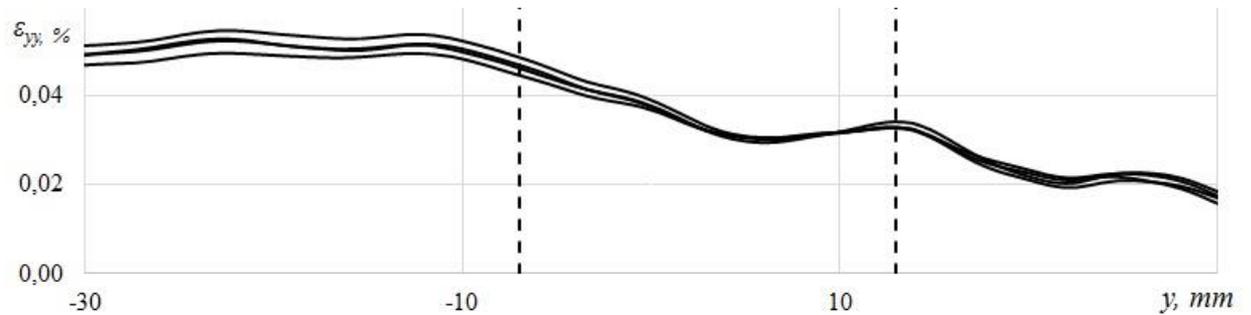


Рис. 4.25. Эпюры продольной деформации вдоль оси Oy в точках разгрузки, соответствующих значениям нагрузки 1 кН, для образца №1

На рис. 4.26 представлены неоднородные поля продольных деформаций для образца с размером дефекта 10×10 мм (образец №2), соответствующие точкам на рис. 1. Линиями 1 и 2 на рис. 4.26 отмечены границы дефекта, в которых отмечается увеличение значений продольных деформаций. На поверхности видим ярко выраженную зону дефекта. Полученные поля совмещены с эпюрами продольных деформаций (рис. 4.26) вдоль оси нагружения (вдоль оси Oy). Кривые построены в контрольных точках 0*, 1-5, соответствующих значениям осевой нагрузки $P=1, 2, 6, 8, 10$ и 12 кН (см. рис. 4.23).

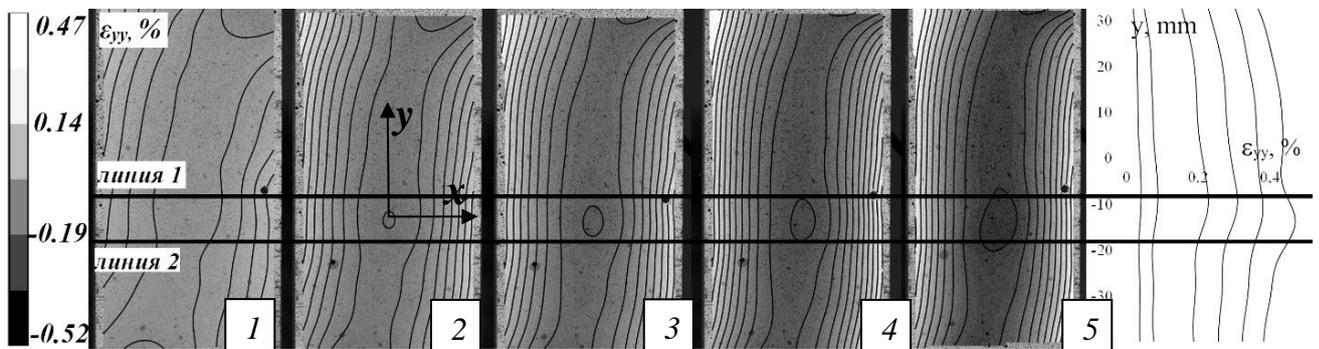


Рис. 4.26. Неоднородные поля продольных деформаций на поверхности образца №2

В процессе нагружения зафиксировано расслоение материала в области дефекта, об этом свидетельствуют эпюры продольных деформаций, полученных при разгрузке при уровне осевой нагрузки $P=1$ кН (рис. 4.27). Изменения в эпюрах продольных деформаций по координате O_y были зафиксированы при уровне разгрузки между 3 и 4 точками (см. рис. 4.23). Межслоевое расслоение по оси O_y увеличилось на 23 % относительно начального размера дефекта. На следующем шаге разгрузки между 4 и 5 точками рост дефекта составил 31 %.

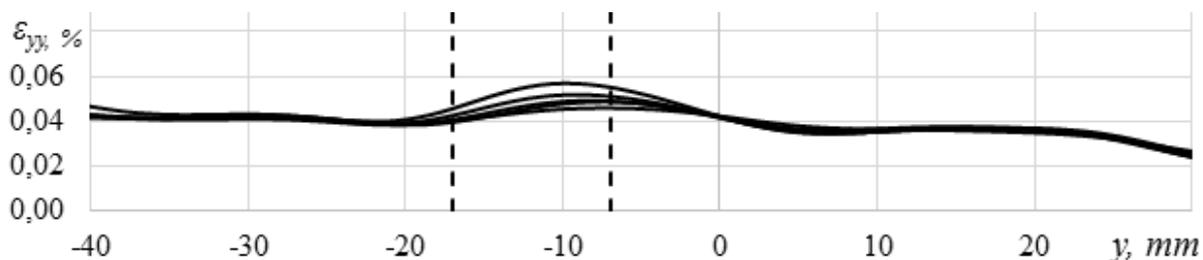


Рис. 4.27. Эпюры продольной деформации вдоль оси O_y в точках, соответствующих значениям нагрузки 1 кН, для образца с дефектом №2

В результате проведения испытаний получены экспериментальные данные при совместном сжатии с кручением, демонстрирующие наличие неоднородных полей деформаций, а также изменение деформаций в окрестности дефекта [16].

Использование видеосистемы позволило зарегистрировать не только изменения деформаций на поверхности образца, но и оценить влияние технологических дефектов, в которых реализуется сложное напряженно-деформированное состояние материала. Система позволила оценить характер неоднородности полей, отследить процессы деформирования материала, протекающие на поверхности образца. По результатам испытаний сделан вывод, что проведение исследований по разработанной методике с использованием перспективных современных методов неразрушающего контроля дает возможность обнаружения технологических дефектов в композитных материалах и элементов конструкций из них [74, 150].

Основные выводы по главе 4

1. Получены опытные данные о закономерностях развития дефектов и формировании условий макроразрушения в композитных образцах при статических испытаниях. Проведена оценка влияния циклических испытаний на поведение композитов с дефектами.

2. Предложена методика исследования влияния дефектов на остаточную прочность элементов конструкций из композитов на основе совместного использования систем регистраций полей деформаций и температур. Данная методика позволяет получать данные о процессах развития внешних и внутренних дефектов. В частности, она может быть использована для оценки эффективности ремонтно-восстановительных операций.

3. В результате проведения испытаний получены экспериментальные данные при растяжении и совместном растяжении/сжатии с кручением, демонстрирующие наличие неоднородных полей деформаций, а также изменение деформаций в окрестности дефекта. Использование видеосистемы позволило зарегистрировать не только изменения деформаций на поверхности образца, но и оценить влияние технологических дефектов, в которых реализуется сложное напряженно-деформированное состояние материала.

5. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

В данной главе рассмотрены основные методические вопросы совместного использования двух независимых измерительных систем неразрушающего контроля — бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D и волоконно-оптических датчиков деформаций. Проведены исследования при совместном использовании указанных систем при квазистатическом и циклическом воздействии, сложных режимах с выдержками, как на однородных образцах, так и на образцах с концентратором. Предложена методика организации режима равновесного роста трещины из дефекта при многоступенчатом циклическом нагружении.

5.1. Достоверность регистрации деформаций встроенными в полимерный композиционный материал волоконно-оптическими датчиками при многократном нагружении, нахождение калибровочных коэффициентов

Среди современных и перспективных средств диагностики большой интерес представляют системы мониторинга, основанные на внедрении в конструкцию волоконно-оптических датчиков деформаций (ВОДД), которые эффективны как в условиях производства, так и при эксплуатации изделий и объектов различного назначения. В качестве чувствительных элементов такой системы служат распределенные по конструкции оптоволоконные датчики на основе волоконных решеток Брэгга. Принцип работы волоконной брэгговской решетки заключается в периодическом изменении показателя преломления в сердцевине оптического волокна. При прохождении широкополосного спектра оптического сигнала по оптическому волокну часть спектра отражается обратно. Приложение механического воздействия на волоконную брэгговскую решетку вызывает

смещение спектра отраженного сигнала, что позволяет оценивать величину деформации.

Для подтверждения достоверности показаний встроенных датчиков используется метод корреляции цифровых изображений [124, 173]. Применяя оптические методы, не требующие контакта с поверхностью образца, можно детально изучить напряженно-деформированное состояние в местах концентрации. Цель настоящего раздела проверить достоверность регистрации деформаций встроенными в ПКМ ВОДД при многократном нагружении. Для поставленной в работе проблемы крайне важно обеспечить хорошую точность измерения деформаций. Для этого необходимо решить ряд задач, одна из которых связана с нахождением калибровочных коэффициентов.

Интеррогатор генерирует и передает по оптическому волокну широкополосный в заданном интервале длин волн оптический сигнал $\psi(\lambda)$ (λ – длина волны). На брэгговской решетке часть этого сигнала отражается. Основная часть отраженного оптического сигнала имеет длину волны λ (резонансная длина волны отраженного спектра). Величина этой волны прямо пропорциональна эффективному показателю преломления n и геометрической длине периода брэгговской решетки L . Именно эта зависимость и определила возможность регистрации изменения относительной длины периода $\Delta L/L$ по анализу изменения относительной величины резонансной длины волны отраженного спектра $\Delta\lambda/\lambda$. Установлено, что для кварцевого оптического волокна, который не взаимодействует в месте расположения брэгговской решетки с другими твердыми телами, деформационный коэффициент имеет значение $K = 0,78$. В качестве объекта исследований при многократном нагружении, а также для калибровки используется пластина из полимерного композиционного материала (ПКМ) ВПС-48 со встроенным оптоволоком на котором расположены 5 ВОДД (рис. 5.1). Если оптическое волокно с брэгговской решеткой взаимодействует с поверхностью какого-либо материала (например, через клеевое соединение), или встроено в материал, значение K следует уточнять, калибровать.

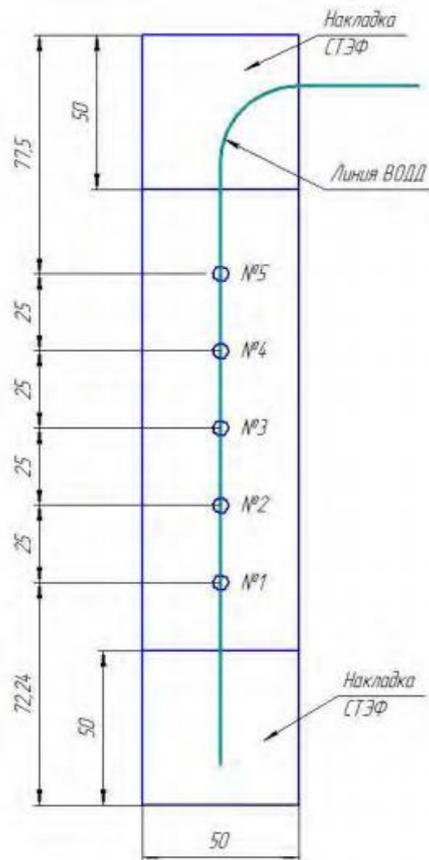


Рис. 5.1. Образец из полимерного композиционного материала со встроенными ВОДД

Образцы испытывались на растяжение на универсальной электромеханической системе Instron 5982. Цель данных испытаний получение калибровочных коэффициентов. Деформирование осуществлялось со скоростью $u'_0=2$ мм/мин., до нагрузки 10 кН. Синхронно с измерениями ВОД осуществлялась регистрация продольных деформаций поверхности образца оптической системой Vic-3D. Частота съемки составила 15 кадров в секунду. Значения деформаций, полученных этой системой в местах расположения ВОДД обозначены $\varepsilon(t)$. По отношению к этим значениям проводится калибровка величин деформации в нулевом приближении по формуле 5.1 и находится калибровочный коэффициент K_i [4].

$$\varepsilon_i(t) = K_i \cdot \varepsilon_i^0(t) \quad (5.1)$$

K_i — калибровочный коэффициент для i -го датчика

Полученные данные позволили для всего интервала времени измерения с дискретным шагом определить совокупность значений отношения деформаций, полученных с ВОДД, к деформациям по данным видеосистемы для моментов времени t_n , $n = 1, \dots, N$. Величина N определяется частотностью измерений оптической системой Vic-3D и интеррогатора ASTRO X327. Приняв полученную совокупность значения за статистическую выборку, для нее была определена выборочная средняя, характеризующая математическое ожидание. Также был определен доверительный интервал с надежностью 0,95 [4, 124].

За значение коэффициента калибровки K_2 для второго ВОДД была принята величина выборочной средней, $K_2 = 0,9534$. На рис. 5.2 представлено сравнение графических зависимостей изменения деформации $\varepsilon_2(t)$ (сплошная линия) и деформаций с учетом коэффициента калибровки (штриховая линия) от времени.

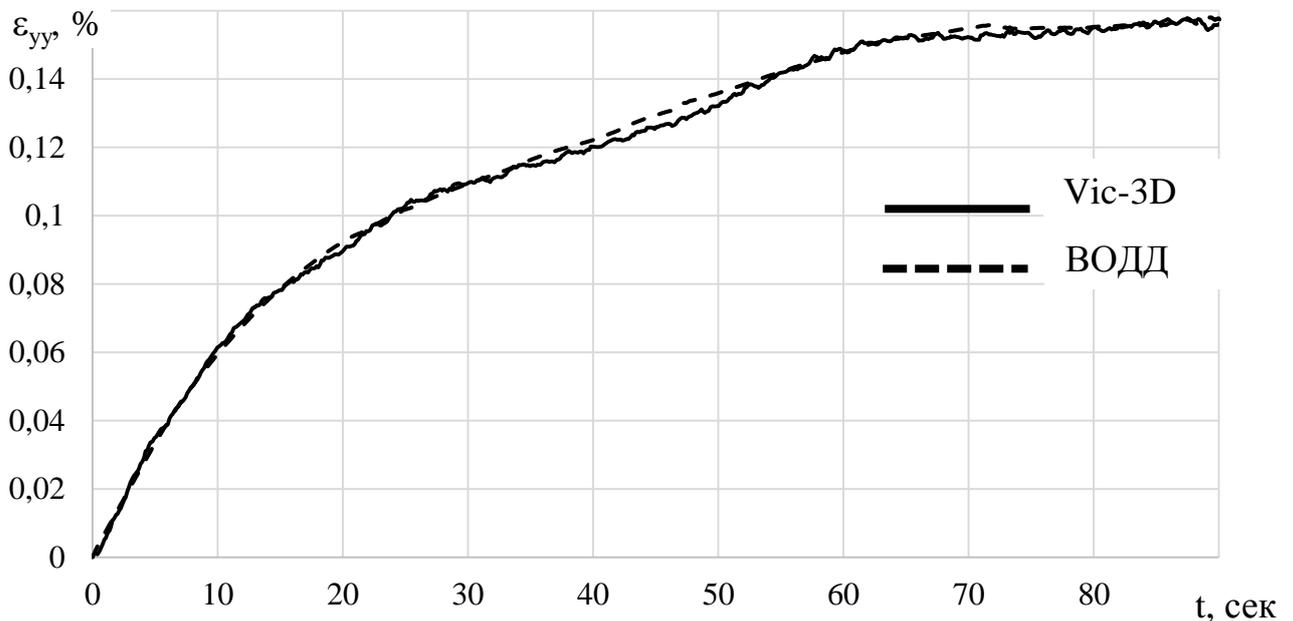


Рис. 5.2. График зависимости продольной деформации от времени однородного образца для датчика №2

Аналогичные статистические зависимости были получены для всех датчиков. Из полученных данных следует, что учет коэффициента калибровки позволяет повысить точность регистрируемых деформаций ВОДД на 25%.

На рис. 5.3. приведен график зависимости продольной деформации от времени с четырьмя разгрузками и повторными нагружениями для датчика №5. Полученные результаты свидетельствуют о том, что на образце реализуется однородное поле, значения деформаций, полученные с помощью видеосистемы и ВОДД совпадают [4].

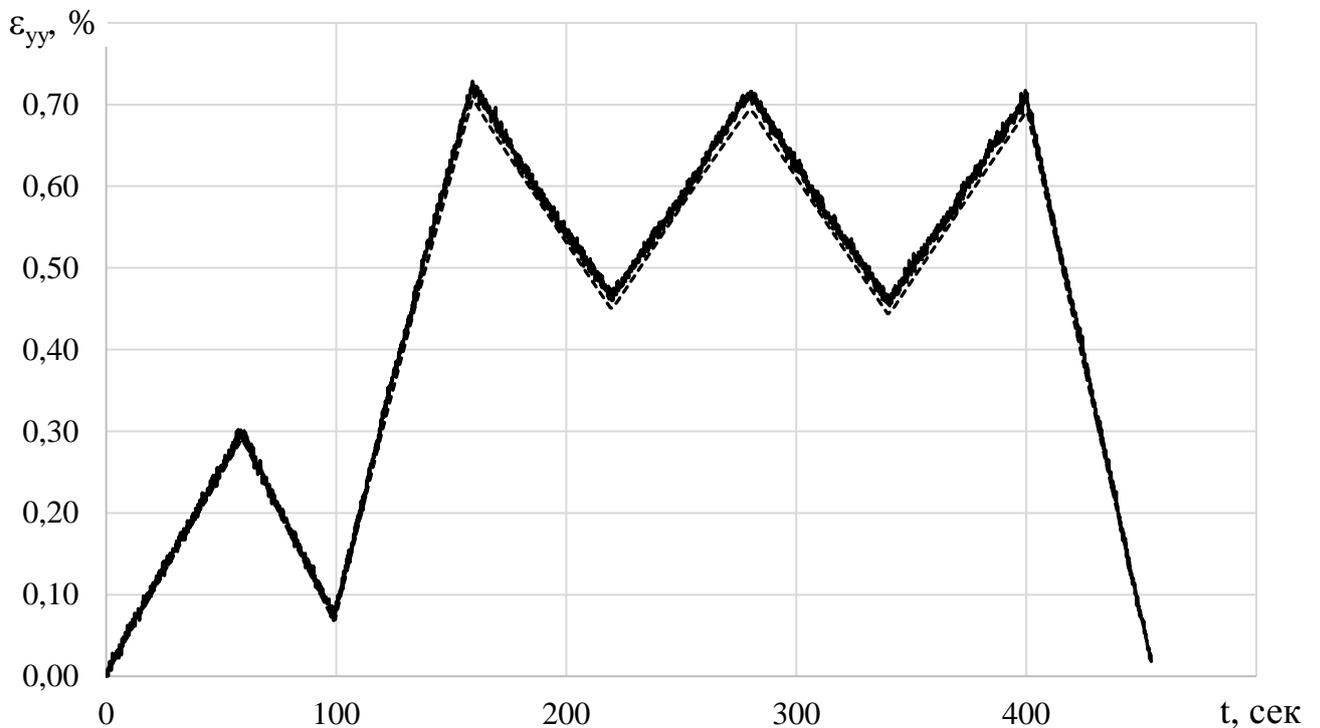


Рис. 5.3. График зависимости продольной деформации от времени полученные с ВОДД №5 с использованием калибровочного коэффициента (черная пунктирная линия) и видеосистемы Vic-3D (черная сплошная линия)

Для анализа работоспособности ВОДД при многократном нагружении как при растягивающих, так и при сжимающих деформациях были проведены соответствующие эксперименты. Результаты приведены на рис. 5.6 [4, 124].

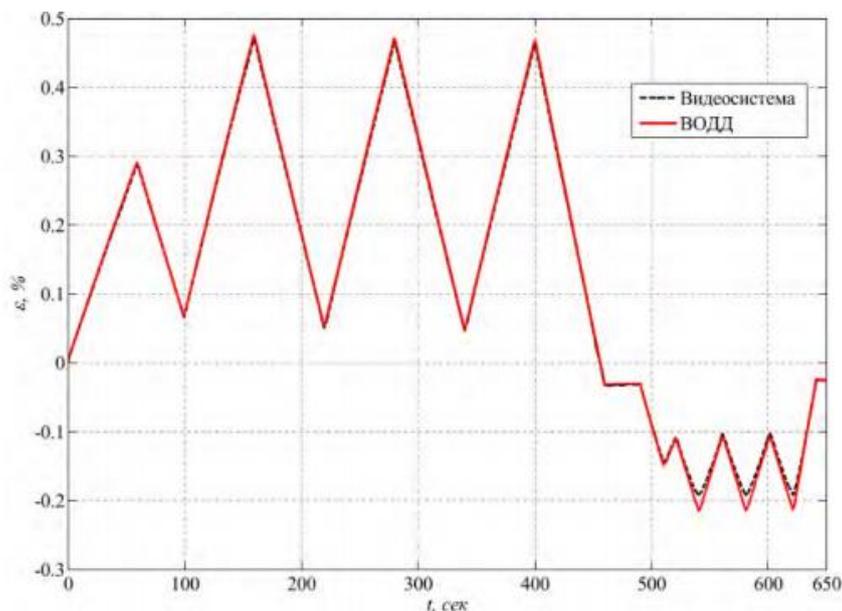


Рис. 5.6. График зависимости деформации от времени полученные с ВОДД и видеосистемы при многократном растяжении/сжатии в упругой области

5.2. Сравнительная оценка точности регистрации деформированных состояний композитных образцов с концентраторами с использованием видеосистемы анализа деформаций и оптоволоконных датчиков

Для оценки работоспособности волоконно-оптических датчиков на первом этапе проводились испытания на одноосное растяжение однородного образца при скорости нагружения 2 мм/мин на испытательной системе Instron 5882. В течение всего процесса нагружения регистрация данных с внедренных ВОДД осуществлялась с использованием интеррогатора ASTRO X327. В ходе испытания были получены эпюры продольной деформации по вертикальному сечению образца с шагом по нагрузке в 2 кН (рис. 5.7). Скорость съемки видеосистемой составила 15 кадров в секунду с помощью камер Q-400 с разрешением 4 Мп, основные параметры корреляционной обработки: локальная область (подмножество) 59×59 пикселей, шаг 6 пикселя (subset 59, step 6) [15]. Значение коэффициента калибровки составило $K=0,9534$ [4].

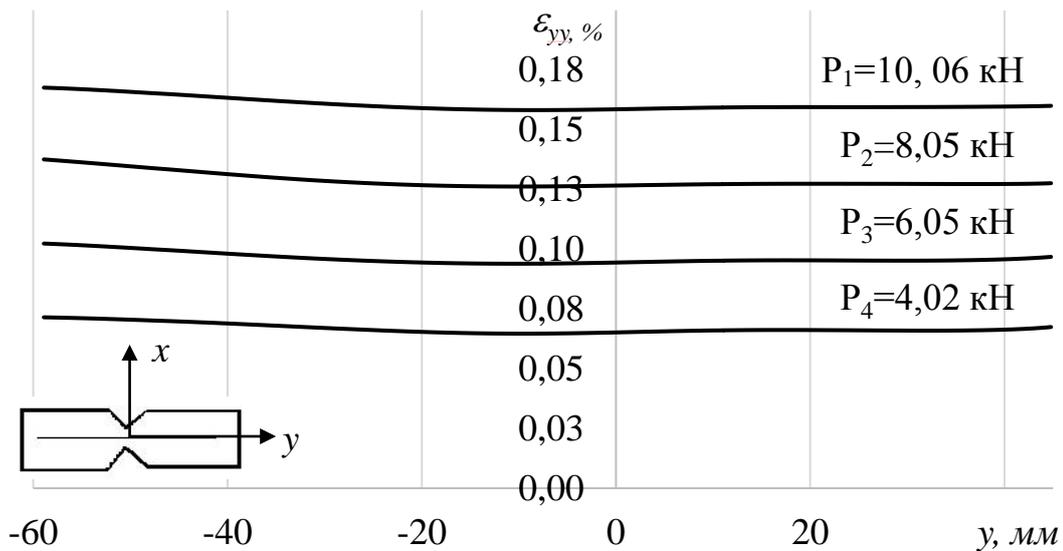


Рис. 5.7. Распределение продольной деформации на однородном образце

Стоит отметить, что при оценке экспериментальных данных в области, близкой к захватным частям испытательной машины возникает краевой эффект, приводящий к незначительному отклонению получаемых данных. Также перед испытанием необходима оценка толщины образца и схемы армирования полимерного композиционного материала, которые в свою очередь могут повлиять на неоднородность распределения деформации на образце без концентратора [15].

На втором этапе образцы подвергались одноосному растяжению с выдержками по перемещениям на универсальной электромеханической системе Instron 5982. Скорость перемещения подвижной траверсы составила $u'_0 = 2$ мм/мин., нагружение осуществлялось до нагрузки в 10 кН. При нагружении образца было использовано ступенчатое нагружение с выдержками по перемещениям траверсы (встроенный датчик перемещений), соответствующим нагрузкам 2,5 кН; 4,7 кН; 7,0 кН не менее 60 секунд [15].

Оценка полученных результатов осуществлялась по пяти контрольным точкам, соответствующим местам расположения оптоволоконных датчиков (рис. 5.8).

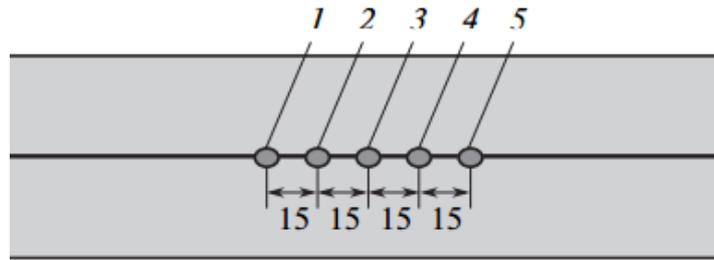


Рис. 5.8. Схема расположения ВОДД на образце без концентратора

Ниже представлена графическая зависимость изменения деформаций от времени для данных полученных с видеосистемы и волоконно-оптических датчиков (среднее значение по пяти датчикам) на однородном образце (рис. 5.9) [15].

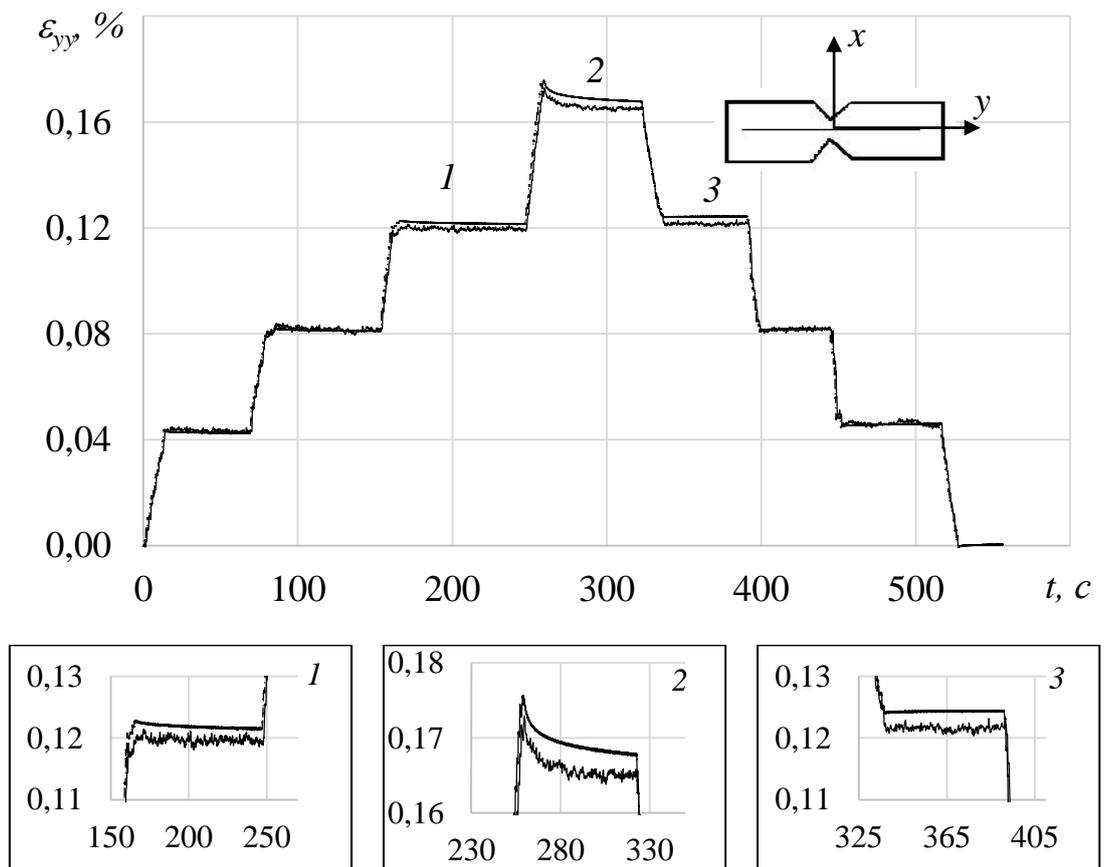


Рис. 5.9. График зависимости деформаций от времени с видеосистемы и волоконно-оптических датчиков для образца с V-образными вырезами

Расхождение значений, полученных с видеосистемы и волоконно-оптических датчиков составило 2 %. Полученный результат свидетельствует об эффективности использования ВВОДД на однородном композитном образце.

Разрушение конструкции обусловлено высокими напряжениями и деформациями в местах концентрации, поэтому для оценки работоспособности волоконно-оптических датчиков осуществлен цикл испытаний на одноосное растяжение образцов с V-образным концентратором, которые ступенчато нагружались в соответствии с описанной ранее методикой при совместном использовании испытательной системы, видеосистемы и интерогатора, при значениях нагрузки 3,6 кН; 5,5 кН; 7,3 кН не менее 60 секунд. В ходе работы выявлены основные причины, приводящие к расхождению значений деформаций, полученных с ВВОДД: неточное позиционирование встроенных датчиков в образце, при изготовлении материала возможно отклонение оптического волокна от первоначального расположения; сложности при обеспечении синхронной записи данных, объем данных, записанных ВОДД на порядок превышает объем данных, получаемых видеосистемой, для достоверности результатов необходимо знать точный момент времени регистрируемых данных [15].

В качестве характерного распределения представлены поля продольной, поперечной и сдвиговой деформации при одноосном растяжении образца с концентратором при нагрузке 10 кН на рис. 5.10, которые наглядно демонстрирует место локализации деформации в области концентратора [15].

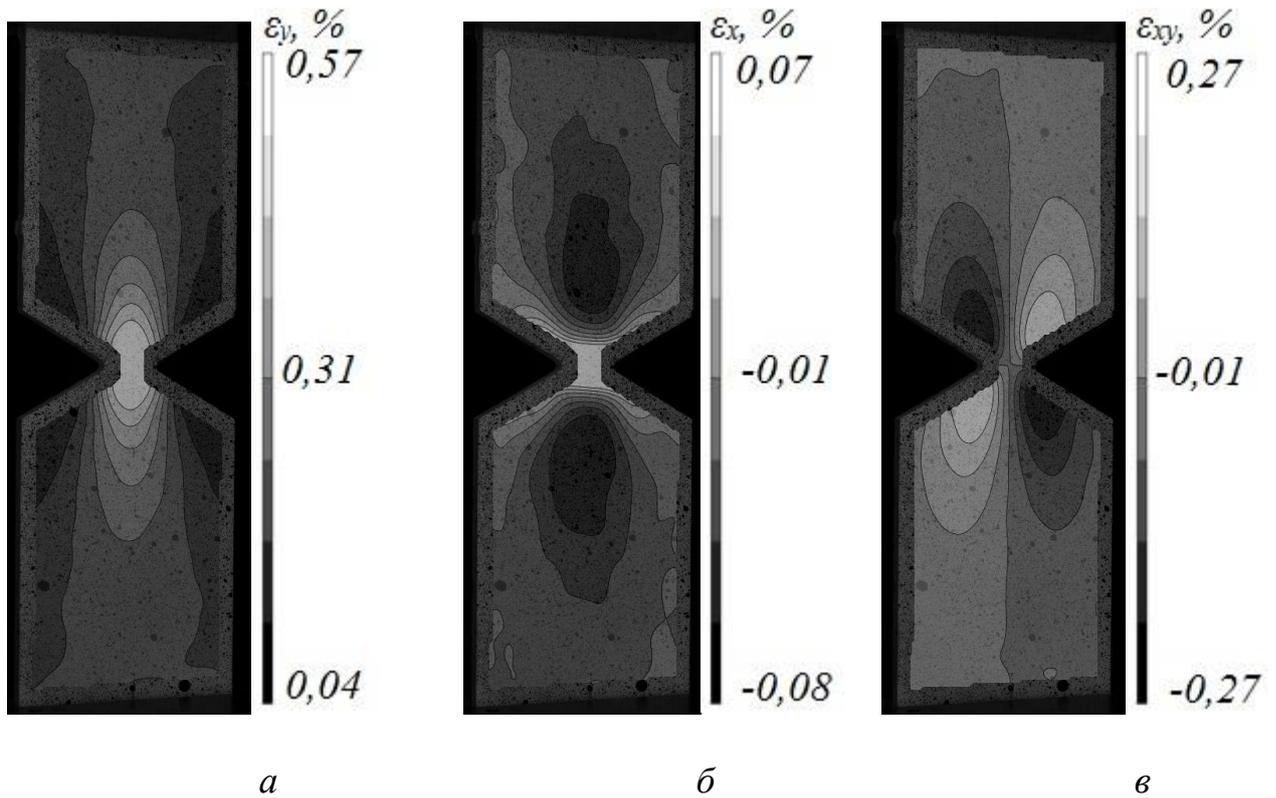


Рис. 5.10. Поля продольных деформаций ϵ_{yy} (*a*), поперечных деформаций ϵ_{xx} (*б*), сдвиговых деформаций ϵ_{xy} (*в*) на поверхности образца с концентратором

Результаты по распределению продольной деформации вдоль осевой линии образца с концентратором, на момент времени нагружения $t = 330$ сек. При нагрузке $N = 9,57$ кН, полученные с использованием видеосистемы сопоставлялись с результатами, полученными с ВОДД в тот же момент времени (рис. 5.11). Результаты измерений ВОДД представлены с учетом коэффициентов калибровки [15].

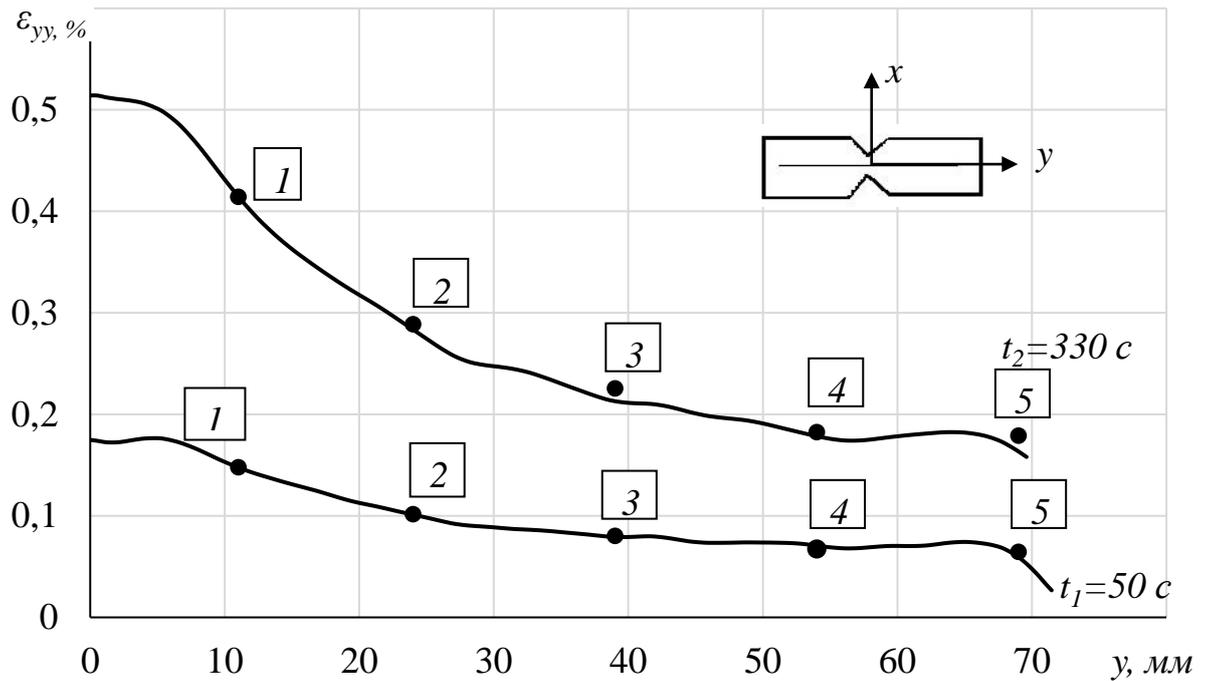


Рис. 5.11. Распределение продольной деформации вдоль осевой линии образца с концентратором: точками отмечены данные с ВОДД; кривая – данные с видеосистемы

Как видно, на рис. 5.11 отличие результатов, полученных с ВОДД, от результатов, полученных с помощью оптической измерительной системы, не превышает 5 %. Полученный результат свидетельствует об эффективности использования ВВОДД на композитном образце с концентратором [15].

5.3. Разработка методики регистрации появления и развития повреждений в полимерных композиционных материалах при циклических нагрузениях

В данном разделе приведены результаты испытаний прямоугольных образцов при растяжении с кручением (скорость закручивания 2,5 °/мин, скорость растяжения 90 мм/мин, $k=u/\varphi$, $k=0,028$). Испытывались образцы, в которые на стадии изготовления между слоями препрега закладывался дефект, который представлял собой кусочек фторопластовой пленки в виде квадрата. В данном

случае моделировался технологический дефект непропрессовки или непрочлепки [156].

Программное обеспечение Vis 3D позволяет использовать дополнительный инструмент видеосистемы «прямоугольная область (R)» для определения средних деформаций соответственно в выбранной области. Для регистрации деформаций с помощью инструмента «прямоугольная область (R)» в рабочей зоне образца выделяется площадка в виде прямоугольника и выводятся средние значения деформаций в заданной области. Зная, куда в образце встроены ВОДД, можно установить инструмент видеосистемы «прямоугольная область (R)» на поверхности образца в места расположения датчиков деформаций. Учитывая, что в образце присутствует внедренный технологический дефект и зная место расположение, становится возможным зафиксировать его на поверхности образца и сравнить результаты, полученные с ВОДД и с помощью метода КЦИ.

Для отработки данной методики на рис. 5.12 (а) представлен образец №1 с схематично отмеченной областью расположения внутреннего дефекта, в соответствии с этой областью на рис. 5.12 (б) представлен график зависимости продольной деформации от времени по данным, полученным с видеосистемы для образца №1 и №2. Схема укладки дефектов представлена в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Схемы укладки технологических дефектов в виде расслоения материала в пластине

Вариант укладки дефектов	Кол-во дефектов	Размер дефекта, мм	Схема укладки дефектов
образец №1	1	20x20	7 и 8 слоев
образец №2	4	10 x 10	1 и 2, 7 и 8, 8 и 9, 14 и 15 слоев

Стоит отметить, что размер заданной области 2×2 мм на рис. 5.12 (а) сопоставим с размерами брэгговской решетки.

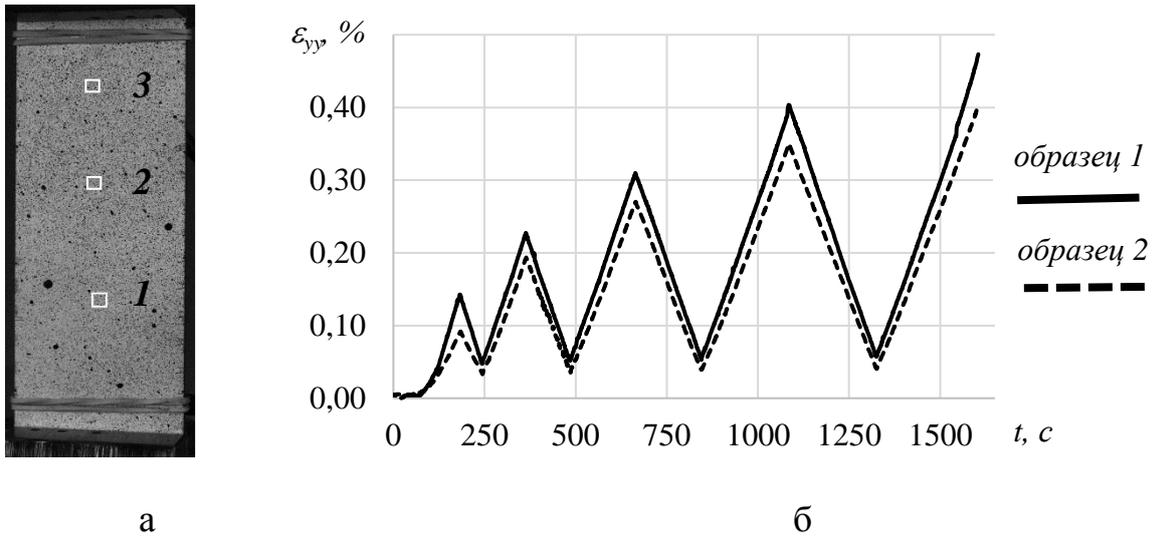


Рис. 5.12. Фотография образца с отмеченным расположением дефекта (а) - область 1, диаграмма зависимости продольной деформации от времени для данной области -1 (б)

В связи с тем, что в процессе сложного многократного нагружения, развитие дефекта в образце №1 в виде межслоевого расслоения в рассматриваемой области не зафиксировано, о чем свидетельствуют результаты, полученные ранее в работе (рис. 4.25). Можно предположить, что такая схема расположения дефекта данного размера и формы не является критической, с позиции оценки живучести и надежности конструкций из полимерных композитных материалов (ПКМ), а, следовательно, образец №1 может быть рассмотрен как бездефектным.

В качестве примера на рис. 5.13 и 5.14 представлены зависимости продольной деформации от времени для зон, удаленных от области дефекта, в соответствии с рис. 5.12 области 2 и 3. Как видно из полученных данных кривые образца №1 и образца №2 совпадают.

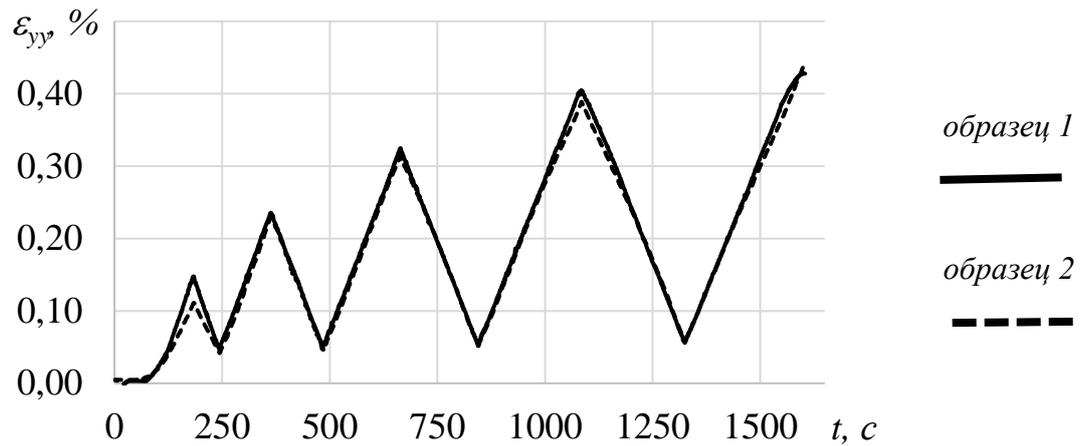


Рис.5.13. Диаграмма зависимости продольной деформации от времени для области
2

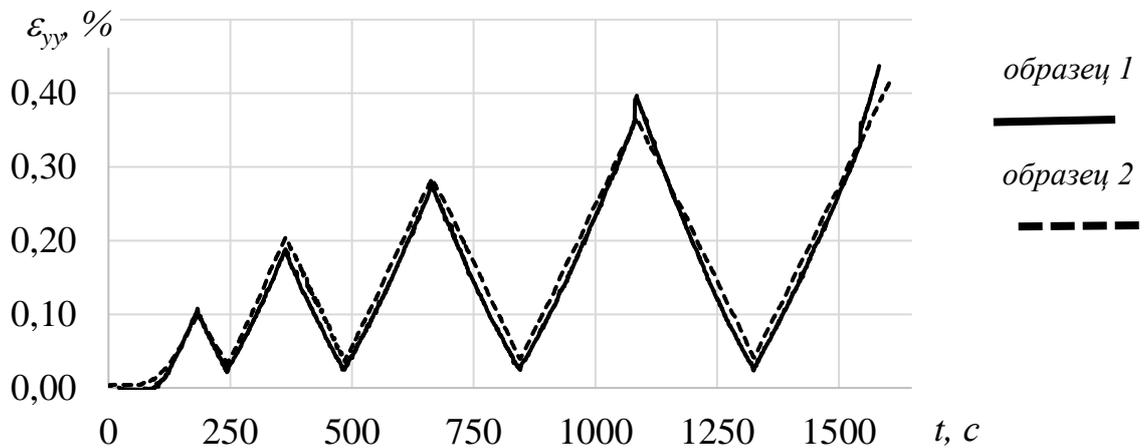


Рис. 5.14. Диаграмма зависимости продольной от времени для области 3

По полученным результатам можно отметить, что внедренный технологический дефект на образце №2 привел к изменению деформаций в области расположения дефекта в сравнение с образцом №1 (бездефектным), о чем свидетельствуют результаты продольных деформаций, полученные с помощью видеосистемы. Данные результаты можно использовать при оценке значений деформаций, полученных с ВОДД.

Отклонения в показаниях ВВОДД и деформаций, полученных с помощью видеосистемы, могут быть связаны с неправильным позиционирование ВВОД. При использовании видеосистемы рассматривается случай, в котором волокно проходит в соответствии с приведенной технологической схемой укладки волокна.

Не учитывается отклонение, возникающее при укладке волокна в материал при изготовлении. В соответствии с описанной причиной отклонения показаний ВОДД и видеосистемы, приведён пример результатов испытания на одноосное растяжение композитного образца с V-образными вырезами. На рис. 5.15 представлены две кривые, одна из которых проходит через геометрический центр образца (линия 1), другая смещена вправо на 1 мм (линия 2) при нагрузке 6 кН.

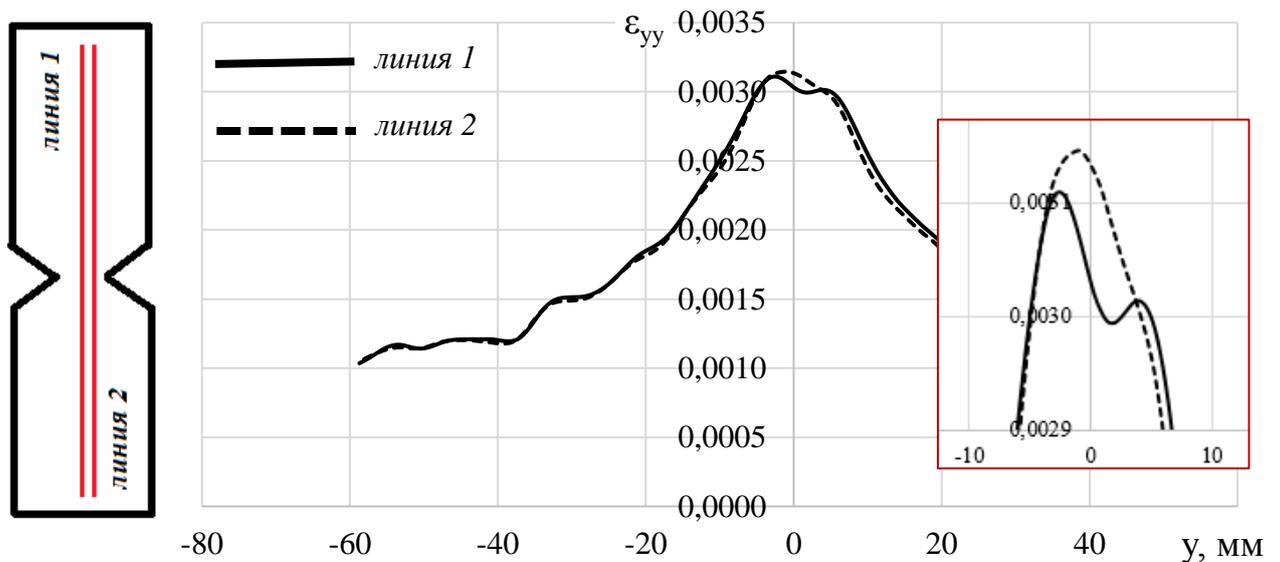


Рис. 5.15. Распределение продольной деформации для образца с V-образными вырезами, по линии, проходящей через центр образца и смещенной линии, при нагрузке в 6 кН

В области концентратора отмечается неоднородность, которая вызвана наличием концентратора. Отмечено, что характер неоднородности меняется, продольные деформации, полученные вдоль линии 1, имеют два всплеска, вдоль линии 2 ярко выражен один всплеск.

Также изучался вопрос организации режима равновесного роста трещины из дефекта. С целью анализа полей деформаций и определения мест расположения оптических датчиков для регистрации появления и развития повреждений в полимерном композиционном материале была разработана методика. На первом этапе были проведены статические испытания на растяжение на

сервогидравлической машине Instron 8801 совместно с бесконтактной видеосистемой регистрации полей деформаций Vic-3D, с регистрацией сигналов акустической эмиссии Vallen AMSY-6 и тепловизионной системой Flir. Скорость нагружения составляла 0,5 мм/мин. Стеклопластиковый образец с V-образным вырезом, сделанным с одной стороны (имитация дефекта), доводился до разрушения для получения предельных характеристик (максимальное перемещение U_{\max} , максимальная нагрузка P_{\max}). Диаграмма нагружения образца с вырезом представлена на (рис. 5.16).

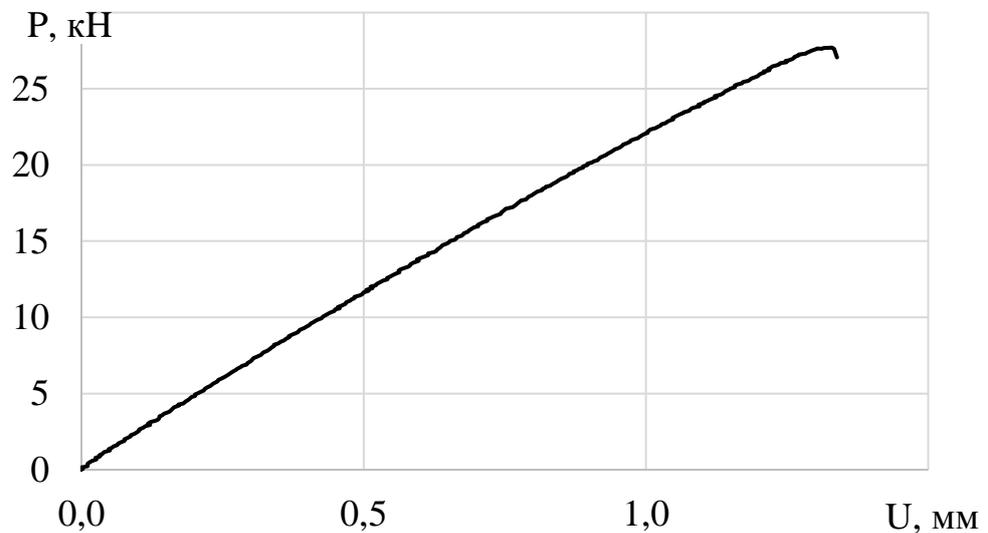


Рис. 5.16. Диаграмма нагружения стеклопластикового образца с вырезом

На следующем этапе проводилось многоступенчатое циклическое нагружение. Частота циклического нагружения составила $\nu=10$ Гц, значение амплитуды перемещений составила $u_{a1}=0,2$ мм. По данным регистрации сигналов акустической эмиссии из экспериментов на статическое растяжение, первичные изменения в материале произошли при значении перемещения $U_{\max}=1,04$ мм, значении нагрузки $P=23$ кН в соответствии со схемой, представленной на рис. 5.17.

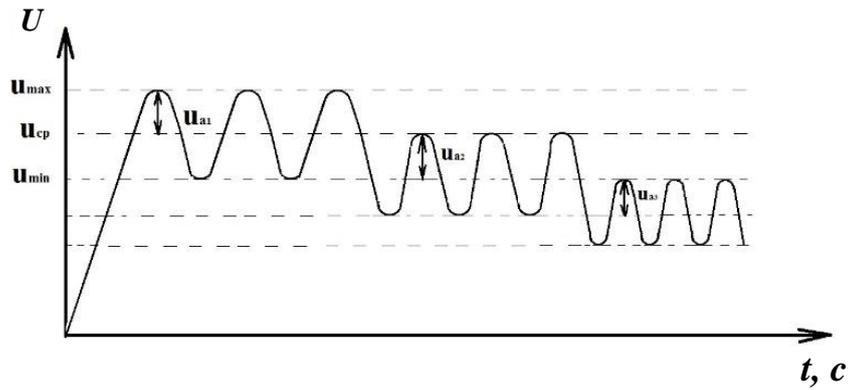


Рис. 5.17. Схема нагружения

Критерием перехода с 1 на 2 шаг являлось изменение значения амплитуды нагрузки P_a на 5 % (рис. 5.18).

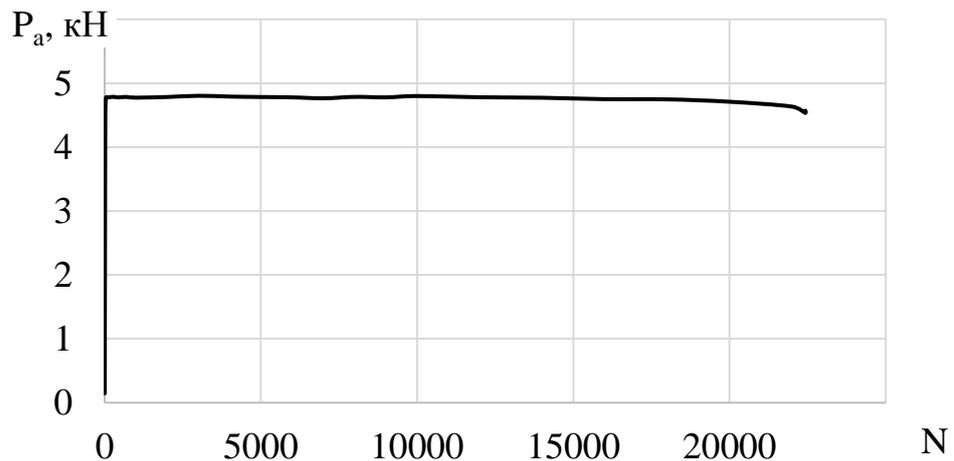


Рис. 5.18. График зависимости амплитуды перемещений от количества циклов

Анализ данных, полученных с тепловизионной системы показал, что в процессе циклического нагружения на 1-ом шаге в зоне концентратора напряжений происходил локальный разогрев до появления трещины $\Delta T=2^\circ\text{C}$, при росте трещины разогрев составил $\Delta T=13^\circ\text{C}$.

При циклических испытаниях осуществлялась непрерывная регистрация полей деформаций с целью анализа зависимости развития локальных повреждений и дефектов от количества пройденных циклов нагружения с одной стороны образца. С другой стороны образца осуществлялась съемка роста трещины с

помощью микроскопа. Полученные поля продольных деформаций и соответствующие фотографии с микроскопа представлены на рис. 5.19.

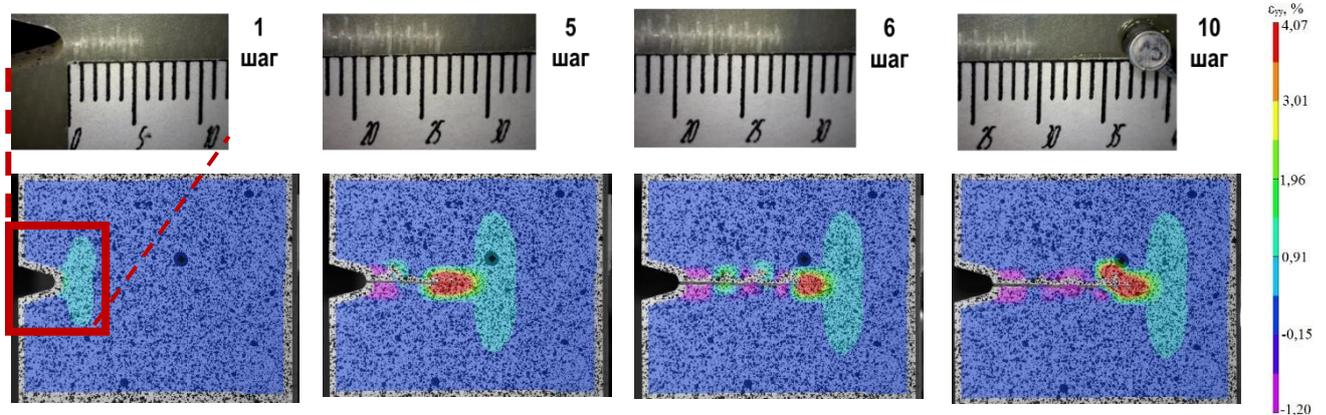


Рис. 5.19. Эволюция полей продольных деформаций и фотографии с микроскопа, соответствующие определенному шагу

Таким образом, в работе проведено исследование процессов деформирования материалов в зонах концентрации с учетом структурных особенностей при использовании метода корреляции цифровых изображений.

Основные выводы по главе 5

1. Выделены основные методические вопросы совместной работы бесконтактной оптической видеосистемы Vic-3D и встраиваемых в материал волоконно-оптических датчиков деформаций.

2. 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

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 крупно-ячеистых 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.

7. Результаты работы использованы на предприятии ПАО «ОДК Сатурн» и в учебном процессе кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 150100.68 «Материаловедение и технологии материалов» по дисциплинам «Экспериментальная механика материалов» и «Экспериментальная механика композитов», что подтверждается актами об использовании результатов.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

По мнению автора, к числу направлений дальнейших исследований можно отнести следующее:

- развитие метода корреляции цифровых изображений применительно к анализу процессов деформирования и разрушения композитов при сложных режимах внешних воздействий (квазистатических, циклических и динамических);
- использование полученных результатов для оценки эффективности применения нелокальных (градиентных) критериев прочности;
- дальнейшее исследование механизмов повреждения композитов различной структуры в зонах концентрации напряжений;

– решение научно-методических вопросов, связанных с совместным использованием видеосистемы трехмерного анализа, аппаратуры термосканирования, сигналов регистрации акустической эмиссии при исследованиях механического поведения композитных объектов;

– дальнейшее применение метода корреляции цифровых изображений для решения задач волоконно-оптических методов диагностики и мониторинга ответственных конструкций;

– использование полученных экспериментальных данных для усовершенствования моделей механического поведения конструкций из композиционных материалов в зонах конструктивных особенностей и технологических дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Албаут Г.Н., Барышников В.Н., Пангаев В.В., Табанюхова М.В., Харинова Н.В. Определение коэффициентов концентрации напряжений в нестандартных задачах поляризации оптическими методами // Физическая мезомеханика. — 2003. — Т. 6. — № 6. — С. 91–95.
2. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. — М.: Наука, 1973. — 576 с.
3. Аннин Б.Д., Максименко В.Н. Оценка разрушения пластин из композитных материалов с отверстиями // Механика композитных материалов. — 1989. — № 2. — С. 284–290.
4. Аношкин А. Н., Воронков А. А., Кошелева Н. А., Матвеев В. П., Сероваев Г. С., Спаскова 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.
5. Аношкин А.Н., Вильдеман В.Э., Лобанов Д.С., Чихачев А.И. Оценка эффективности ремонта в конструкциях из полимерных волокнистых композиционных материалов // Механика композиционных материалов — 2014. - №3. — С. 441-450.
6. Афанасьев А. М., Марьин В. А. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов. М.: Наука, 1975. — 288 с.
7. Беспалов В. А., Гоцелюк Т. Б., Коваленко Н. А., Олегин И. П. Использование модели развивающегося повреждения при оценке прочности слоистых углепластиков с различными концентраторами напряжений // Омский научный вестник, Номер: 3 (143) Год: 2015 Страницы: 329-333
8. Бураго Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С. Модели многоосного усталостного разрушения и оценка долговечности элементов конструкций. // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2011. № 6. С. 22-33.

9. Бухаринов Г.Н. Пластинка, ослабленная круговыми отверстиями. Материалы конференции по оптическому методу изучения напряжений. М.; Л.: ОНТИ, 1937.
10. Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль материалов и изделий (обзор) // Дефектоскопия. – №10. – 2017. С. 34-57.
11. Ван ФоФы Г.А. Распределение напряжений около отверстий в трехслойных сферических оболочках. – В кн.: Концентрация напряжений. Киев: Наукова думка, 1971, вып. 3.
12. Варжель С.В., Волоконные брэгговские решетки. – СПб: Университет ИТМО, 2015. — 65 с.
13. Вильдеман В.Э. [и др.] Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2011. — 165
14. Вильдеман В.Э. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях. М.: ФИЗМАЛИТ, 2012. — 204.
15. 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.
16. 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. — №1. — 2018. — с. 65-71.
17. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Методика экспериментального исследования закритического деформирования на образцах специальной усложненной конфигурации с применением метода корреляции цифровых // Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. — №2.— С.15-28.

18. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Третьяков М.П. Экспериментальное исследование закономерностей деформирования и разрушения материалов при плоском напряженном состоянии // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2010. — №5. — С. 106-111.
19. Вишнецкий З.Д. Поляризационно-оптический метод измерения напряжений на натуральных конструктивных элементах // Заводская лаборатория. — 1955. — №4., — с.471-472.
20. Вольмир А. С., Григорьевич Ю. П., Марьин В. А., Станкевич А. И. Сопротивление материалов. Лабораторный практикум: Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., испр. — М.: Дрофа, 2004. — 352 с.
21. Ворович И.И., Малкина О.С. О концентрации напряжений в толстой плите. — В кн.: Концентрация напряжений. Киев: Наук.думка, 1973, вып. 3.
22. Гольденблат И.И., Копнов В.А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. М.: Наука, 1968. — 190 с
23. Губкин С.И., Добровольский С.И., Бойко Б.Б. Фотопластичность. — Минск: Изд-во АН БССР, 1957. — 168 с.
24. Гузь А.Н. Исследование напряженного состояния сферических оболочек в случае многосвязных областей. — В кн.: Концентрация напряжений. Киев: Наукова думка, 1985, вып. 1.
25. Зайцев Д. В., Кочанов А. Н., Пантелеев И. А., Панфилов П. Е. О Влиянии масштабного фактора при испытаниях на прочность образцов горных пород. Известия Российской академии наук // 2017. — №3. — Т. 81. — С. 366-369
26. Зеньков Е.В., Рычко Н.П., Цвик Л.Б., Запольский Д.В. Методика исследования деформированного состояния плоского образца на основе использования цифровой оптической системы VIC-3D. // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. — 2014. — Т. 2. — С. 449-454.
27. Зуев М.А., Махсидов В.В., Федотов М.Ю., Шиенок А.М. К вопросу об интеграции оптоволокна в ПКМ и измерении деформации материала с помощью волоконных брэгговских решеток // Механика композиционных материалов и конструкций. 2014. Т. 20. № 4. С. 568—574.

28. Зуйко В.Ю., Лобанов Д.С., Аношкин А.Н. Методики определения предела прочности полунатурных образцов крупноячеистого композиционного материала // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. – 2012. - №2. – С. 34-39.
29. Ильичев А.В., Махсидов В.В., Шиенок А.М., Яковлев Н.О. Измерение деформации углепластика с помощью интегрированных в его структуру волоконных брэгговских решеток // Механика композиционных материалов и конструкций. 2015. Т. 21. № 3. С. 360—369.
30. Карпов Е.В. Концентрация напряжений и разрушение вблизи круговых отверстий в композитных элементах конструкций диссертация кандидата физико-математических наук, Новосибирск, 2002.
31. Корнев В.М. Интегральные критерии хрупкой прочности трещиноватых тел с дефектами при наличии вакансий в носике трещины. Прочность компактированных тел типа керамик // ПМТФ. – 1996. – Т. 37, № 5. – С. 168–177.
32. Лаптев М.Ю., Адамов А.А. Оценка влияния геометрических и технологических факторов на напряженно-деформированное состояние образцов из полимерных композиционных материалов при испытаниях на изгиб и межслоевой сдвиг короткой балки // Конструкции из композиционных материалов. 2015. – №2. – Т. 138. – С. 10-14
33. Лаптев М.Ю., Адамов А.А. Сравнение методик определения упругих и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов при разных видах нагружения // Вычислительная механика сплошных сред. 2015. – № 2. – С. 244.
34. Леонов М.Я., Панасюк В. В. Развитие мельчайших трещин в твердом теле // Прикл. механика. 1959. Т. 5. № 4. С. 391-401.
35. Лобанов Д.С. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств полимерных композиционных материалов и панелей с наполнителем: диссертация кандидата технических наук. -Пермь, 2015. –148 с.

36. Лобанов Д.С., Вильдеман В.Э., Спаскова 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. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.10
37. Ломакин Е.В., Лурье С.А., Рабинский Л.Н., Соляев Ю.О. Полуобратное решение задачи чистого изгиба балки в градиентной теории упругости: отсутствие масштабных эффектов // Доклады Академии наук. 2018. – Т. 479. № 4. – С. 390.
38. Ломакин Е.В., Мельников А.М. Задачи плоского напряженного состояния тел с вырезами, пластические свойства которых зависят от вида напряженного состояния // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2011. – № 1. – С. 77-94.
39. Лурье А.И. Концентрации напряжений в области отверстия на поверхности кругового цилиндра. – Прикладная математика и механика. — 1946. — Т. 10. — №3. — С. 397-405.
40. Мавлютов Р.Р. Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций. М.: Наука, 1981. — 140 с
41. Матвиенко Ю.Г. Двухпараметрическая механика разрушения в современных проблемах прочности. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. №5. С. 37-46.
42. Метод фотоупругости. В 3-х томах. / Под ред. Г.Л. Хесина. — М.: Стройиздат, 1975.
43. Морозов Н.Ф., Семенов Б.Н. Применение критерия хрупкого разрушения В. В. Новожилова при определении разрушающих нагрузок для угловых вырезов в условиях сложного напряженного состояния // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1986. – № 1. – С. 122–126.

44. Москвичев В.В. Основы конструкционной прочности технических систем и инженерных сооружений Монография в 3 ч. Часть 1: Постановка задач и анализ предельных состояний. Новосибирск: Наука, 2002. — 106 с.
45. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966, — 708 с.
46. Нейбер Г. Концентрация напряжений. – М. – Л.: Гостех-издат, 1947.
47. Новожилов В.В. О необходимом и достаточном критерии хрупкой прочности. ПММ. 1969. Т. 33. Вып. 2. С. 212-222.
48. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. М.: Наука, 1985, 254 с.
49. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с наполнителем: справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
50. Панин С.В., Бурков М.В., Бяков А.В., Любутин П.С. Комбинированный метод исследования деформаций и разрушения образцов из углерод-углеродного композиционного материала по данным акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и тензометрии // Вестник Науки Сибири. – 2012. – Т. 5, №4. – С. 129-138.
51. Панин С.В., Бяков А.В., Любутин П.С., Башков О.В. Стадийность локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ по данным акусто-эмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. Ч. 1. Образцы с отверстиями различного диаметра // Дефектоскопия. – 2011 –№9. – С. 47-61
52. Панин С.В., Любутин П.С., Титков В.В. 32. Анализ изображений в оптическом методе оценки деформаций. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 288 с
53. Пантелеев И.А., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Пространственно-временные закономерности развития поврежденности при деформировании стекловолоконного тканого ламината по данным акустической эмиссии//Физическая мезомеханика. -2016. -Т. 19, № 4. -С. 64-73.
54. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. Графики и формулы для расчета конструктивных элементов на прочность. – М.: Мир, 1977.

55. Плехов О.А. Экспериментальное исследование термодинамики пластического деформирования методом инфракрасной термографии // Журнал технической физики. - 2011. – Т. 81, №2. – С. 143-146.
56. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов - М. : Изд-во Московского университета, 1984. – 336 с.
57. Полилов А.Н. Схема предразрушения композитов около отверстий // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1982. - №3. – С. 110-117.
58. Полухин П.И., Воронцов В.К., Кудрин А.Б., Чиченев Н.А. Деформации и напряжения при обработке металлов давлением — М.: Металлургия, 1974. — 336 с.
59. Прохоров А.Е., Плехов О.А. Разработка системы мониторинга нестационарных температур и деформаций во влагонасыщенном грунте в условиях фазового перехода на базе оптоволоконных датчиков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 129-137. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.11
60. Радченко В.П., Еремин Ю.А. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций. М.: Машиностроение - 1, 2004. 265 с.
61. Радченко В.П., Попов Н.Н. Статистические характеристики полей напряжений и деформаций при установившейся ползучести стохастически неоднородной плоскости // Известия ВУЗов. Машиностроение, 2006. № 2. с. 3-11.
62. Разумовский И.А. Развитие оптических методов механики деформируемого тела // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2008. — Т.74. — №10. — С.45–54.
63. Савин Г.Н. Распределения напряжений около отверстий. Киев: Наукова думка. 1968. — 891 с.
64. Серьёзов А.Н., Кузнецов А.Б., Лукьянов А.В., Брагин А.А. Применение оптоволоконных технологий при создании встроенных систем самодиагностики авиационных конструкций // Научный вестник НГТУ. 2016. Т. 64. № 3. С. 95—105.

65. Слепьян Л.И. Механика трещин. –е изд., перераб. И доп.-Л: Судостроение, 1990.- 296 с.:ил.
66. Сукнев С.В. Применение нелокальных критериев для описания разрушения хрупкого материала с отверстием при двухосном нагружении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т. 80, №11. – С. 44-47.
67. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 981. – 272 с.
68. Третьякова Т. В., Спаскова 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.
69. Третьякова Т.В. Особенности использования программного обеспечения Vis-3D, реализующего метод корреляции цифровых изображений, в приложении к исследованию полей неупругих деформаций // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 162-171
70. Третьякова Т.В. Пространственно-временная неоднородность процессов деформирования металлов. Диссертация кандидата физико-математических наук, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, 2015.
71. 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. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.15.
72. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // Вестник пермского государственного технического университета. Механика, Номер: 2 Год: 2011 Страницы: 92-100

73. Устинов Ю.А. Концентрация напряжений в полуплоскости и плоскости с круговыми отверстиями при напряжении. – Изв. АН СССР. Механика, 1965, № 1.
74. Устинов Ю.А. Расчет напряжений в круговом кольце. – Изв. АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение, 1964, № 1.
75. Фильштинский Л.А. Напряжения и смещения в упругой плоскости, ослабленной двоякопериодической системой отверстий. – Прикладная математика и механика. — 1964.— №3— С. 430 - 441.
76. Экспериментальная механика: В 2-х книгах: Книга 1. Пер. с англ. /Под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 616 с.
77. Adams D.F., Walrath D.E. Further development of the Iosipescu shear test method. *Exp Mech* 1987;27(2):113–9.
78. Alam, Syed Yasir; Saliba, Jacqueline; Loukili, Ahmed. Fracture examination in concrete through combined digital image correlation and acoustic emission techniques. // *Construction and building materials*. – 2014. – Vol. 69. – pp. 232-242
79. Aljibori H.S.S., Chong W.P., Mahlia T.M.I., Chong W.T., Edi P., Alqrimli H., et al. Load-displacement behavior of glass fiber/epoxy composite plates with circular cut-outs subjected to compressive load. *Mater Des* 2010;31(1):466–74.
80. ASTM D 5379, Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-notched Beam Method, 1998 (2005).
81. Awerbuch J., Madhukar M.S. Notched strength of composite laminates: predictions and experiments—a review *J. Reinforced Plast. Compos*, 74 (1985), pp. 3-159
82. 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.
83. Bai J. *Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications*. Woodhead Publishing Limited, 2013. – 906 p.

84. Bilisik K. Multiaxis three-dimensional weaving for composites: A review // *Textile Research Journal*. – 2012. – Vol. 82. – Iss. 7. – P. 725–743. DOI: 10.1177/0040517511435013
85. Camanho P.P., Maimí P., Dávila C.G. Prediction of size effects in notched laminates using continuum damage mechanics // *Compos Sci Technol*, 67 (2007), pp. 2715-2727
86. Chao Y.J., Sutton M.A. Measurement of strains in a paper tensile specimen using computer vision and digital image correlation—part 1: data acquisition and image analysis system *Tappi J*, 70 (3) (1988), pp. 173–175
87. Choi S., Shah S.P. Measurement of deformations on concrete subjected to compression using image correlation *ExpMech*, 37 (3) (1997), pp. 307–313
88. Chow CL, Xian XJ, Lam J. Experimental investigation and modelling of damage evolution/propagation in carbon/epoxy laminated composites. *Compos Sci Technol* 1990;39:159–84.
89. Close M.G. Ostergaard, A.R. Ibbotson, O.L. Roux, A.M. Prior Virtual testing of aircraft structures *CEAS Aeronaut J*, 1 (1–4) (2011), pp. 83-103
90. 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.
91. Dang Van Ky. New methods in fatigue of structures // *International journal of computational methods*. – 2014 – Vol. 11 – Issue 3. – pp. 178-188
92. David Staniera, Arjun Radhakrishnana, Ian Genta, Sree Shankhachur Roy, Ian Hamertona, Prasad Potlurib, Fabrizio Scarpa, Milo Shaffer, Dmitry S. Ivanov, Matrix-graded and fibre-steered composites to tackle stress concentrations // *Composite Structures* 207 (2019) 72–80
93. De Wilde W.P., Brebbia C.A. Hernández S. *High Performance Structures and Materials VI*. WIT Press, 2012. – 506 p.
94. Dyskin A.V. Crack growth criteria incorporating non-singular stresses: Size effect in apparent fracture toughness // *Int. J. Fract.* – 1997. – Vol. 83, No. 2. – P. 191–206.

95. Emery T.R., Dulieu-Barton J.M., Thermoelastic Stress Analysis of damage mechanisms in composite materials, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2010. – Vol. 41. – P. 1729–1742.
96. Fargione G., Geraci A., La Rosa G., Risitano A. Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method // *International Journal of Fatigue*. – 2002. – Vol. 24. – Iss. 1. – P. 11–19.
97. Fedulov B. N., Fedorenko A. N., Kantor M. M., Lomakin E. V. Failure analysis of laminated composites based on degradation parameters // *Meccanica*. — 2018. — Vol. 53, no. 1-2. — p. 359–372.
98. Frantziskonis, G; Deymier, P. The effects of stress concentrators on strength of materials at nanoscale: A molecular dynamics study. // *Mechanics research communications*. – 2006 – Vol. 33 – Issue 3. – pp. 352-358
99. Frantziskonis, George; Deymier, Pierre. Surface effects at the nanoscale significantly reduce the effects of stress concentrators. // *Probabilistic engineering mechanics*. – 2006 – Vol. 21 – Issue 3. – pp. 277-286
100. Green B.G., Wisnom M.R., Hallet S.R. An experimental investigation into the tensile strength scaling of notched composites // *Composites—Part A*, 38 (2007), pp. 867-878
101. Hadjem-Hamouche Z., Derrien K., Héripré E., Chevalier J. P. In-situ experimental and numerical studies of the damage evolution and fracture in a Fe-TiB₂ composite // *Materials Science and Engineering: A Volume 724*, 2 May 2018, p. 594-605
102. Hu Junshan, Zhang Kaifu, Cheng Hui, Liu Ping, Zou Peng, Song Danlong Stress analysis and damage evolution in individual plies of notched composite laminates subjected to in-plane loads // *Chinese Journal of Aeronautics*, (2017), 30(1): 447–460
103. Huh Y.-H., Kim J., Hong S., Park J. H. Measurement of hole damage characteristics in the glass fibre reinforced plastic composite using digital image correlation technique // *Material wissenschaft und Werkstofftech*. 2015, 46, No. 4–5, p. 446-453.

104. Inglis C. E. Stresses in a Plate Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners. – Transactions of the Institute of Naval Architects, 55, Pt. 1 1913.
105. Iosipescu N. New accurate procedure for single shear testing of metals. J Mater 1967; 2(3):537–66.
106. Kahn-Jetter Z.L., Jha N.K., Bhatia H. Optimal image correlation in experimental mechanics Opt Eng, 33 (4) (1994), pp. 1099–1105
107. Khechai A., Tati A., Guerira B., Guettala A., Mohite P.M. Strength degradation and stress analysis of composite plates with circular, square and rectangular notches using digital image correlation // Composite Structures Volume 185, 2018, p. 699-715
108. Kipp M.E., Sih G.C. The strain energy density failure criterion applied to notched elastic solids // Int. J. Solids Struct. – 1975. – Vol. 11, No. 2. – P. 153–173.
109. Kirsch B. Dtsch. Ing., Juli 16, 1898, Bd. 42.
110. Koiter W.T. Stress distribution in an in finits elastic sheet with a double– periodic setofequal holes. Boundary problems of different equation. Madison: Univ. Wisconsin Press, 1940
111. Krzyzak, D.; Robak, G., Lagoda, T Determining fatigue life of bent and tensioned elements with a notch, with use of fictitious radius. // Fatigue & fracture of engineering materials & structures. – 2015 – Vol. 38 – Issue 6. – pp. 693-699
112. L. Jia et al. Combined modelling and experimental studies of failure in thick laminates under out-of-plane shear / Composites Part B 105 (2016)
113. La Rosa G., Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components // International Journal of Fatigue. – 2000. –Vol. 22. – Iss. 1. – P. 65–73
114. Lagattu F, Brillaud J, Lafarie-Frenot MC. High strain gradient measurements by using digital image correlation technique. Mater Charact 2004;53:17–28.
115. Lagattu F., Lafarie-Frenot M.C., Lam T.Q., Brillaud J. Experimental characterisation of overstress accommodation in notched CFRP composite laminates // Composite Structures Volume 67, Issue 3, March 2005, Pages 347-357

116. Lajtai E.Z. Effect of tensile stress gradient on brittle fracture initiation // *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 1972. – Vol. 9, No. 5. – P. 569–578.
117. Lanza Di Scalea F., Hong S.S., Cloud G.L. Whole-field strain measurement in a pin-loaded plate by electronic speckle pattern interferometry and the finite element method // *Experimental Mechanics.* – 1998. – 38(1). – P. 55–60.
118. Libonati F., Vergani L., Damage assessment of composite materials by means of thermographic analyses // *Composites Part B: Engineering.* – 2013. – Vol. 50. – P. 82–90.
119. Lyons J.S., Liu J., Sutton M.A. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation *ExpMech*, 36 (1) (1996), pp. 64–70
120. Maheshwaria, Muneesh, Tjin, Swee Chuan, Asundi, A. Efficient design of Fiber Optic Polarimetric Sensors for crack location and sizing. // *Optics and laser technology.* – 2015 – Vol. 68 – pp. 182-190
121. Mahoor Mehdikhani, Mohammadali Aravand, Baris Sabuncuoglu, Michaël G. Callens, Stepan V. Lomov, Larissa Gorbatikh Full-field strain measurements at the micro-scale in fiber-reinforced composites using digital image correlation // *Composite Structures Volume 140*, 2016, p. 192-201
122. Maiti S.K., Smith R.A. Comparison of the criteria for mixed mode brittle fracture based on the preinstability stress-strain field. Part I: Slit and elliptical cracks under uniaxial tensile loading // *Int. J. Fract.* – 1983. – Vol. 23, No. 4. – P. 281–295
123. Matveenکو V. P., Serovaev G. S., Tashkinov M.A. Numerical Analysis of Delamination in Composite Structures Using Strain Measurements from Fiber Bragg Gratings Sensors // *Proceedings of the First International Conference on Theoretical, Applied and Experimental Mechanics.* 2018, V.5. P. 62-67.
124. Matveenکو V. P., Shardakov I. N., Voronkov A. A., Kosheleva N.A., Lobanov D.S., Serovaev G.S., Spaskova 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>)
125. McNeill S.R., Peters W.H., Sutton M.A. Estimation of stress intensity factor by digital image correlation *EngFractMech*, 28 (1) (1987), pp. 101–112

126. Meraghni, F., Nouri, H., Bourgeois, N. Parameters identification of fatigue damage model for short glass fiber reinforced polyamide (PA6-GF30) using digital image correlation. // Conference: 11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials (ICM) Location: Como, ITALY Date: 2011 – Vol. 10
127. Mikhailov S.E. A functional approach to non-local strength condition and fracture criteria. – Eng. Fract. Mech. – 1995. – Vol. 52, No. 4. – P. 731–754.
128. Mindlin R.D. Stress distribution around a hole near the edge of plate under tension. – Proc. Soc. Exptl. Stress. Analysis, 1948, vol. 5, N 2.
129. Mohammad Kashfuddoja, R.G.R. Prasath, M. Ramji Study on experimental characterization of carbon fiber reinforced polymer panel using digital image correlation: A sensitivity analysis // Optics and Lasers in Engineering 62 (2014) 17-30
130. Montesano J., Fawaz Z., Bougherara H. Use of infrared thermography to investigate the fatigue behavior of a carbon fiber reinforced polymer composite // Composite Structures. –2013. – Vol. 97. – P. 76–83
131. Mouritz A.P., Bannister M.K., Falzon P.J., Leong K.H. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites // Composites: Part A. – 1999. – Vol. 30. – Iss. 12. – P. 1445–1461. DOI: 10.1016/S1359-835X(99)00034-2
132. Murasawa, G., Takahashi, R., Morimoto, T. Inhomogeneous Deformation Twinning Measurement Using Digital Image Correlation and Acoustic Emission. // Experimental mechanics. – 2015. – Vol. 55. – Issue: 1 – Special Issue: SI – pp. 182-190
133. Neuber H. Kerbspannungslehre, Grundlagen fur eine genaue Spannungsrechnung. – Berlin: Springer-Verlag, 1937.
134. Owolabi, G. M., Prasannavenkatesan, R.; McDowell, D. L. Probabilistic framework for a microstructure-sensitive fatigue notch factor. // International journal of computational methods. – 2010 – Vol. 32 – Issue 8. – pp. 1378-1388
135. Pan B, Xie H, Wang Z, Qian K, Wang Z. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. // Opt Express. – 2008. – Vol. 16 (10) – pp. 7037–7048

136. Pan B. [et al.] Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation // *Optical Engineering*. – 2007. – Vol. 46, N 3. – P. 33601-33610.
137. Pereira G., Frias C., Faria H., Frazão O., Marques A.T. On the improvement of strain measurements with FBG sensors embedded in unidirectional composites // *Polymer Testing*. 2013. V. 32. P. 99—105.
138. Peters W. H., Ranson W. F., Digital image techniques on experimental stress analysis, *Optical Engineering*, 21 (1982) 427-31.
139. Pierron F, Cerisier F, Gré'diac M. A numerical and experimental study of woven composite pin-joints» // *Compos Mater* 1999;34(12): 1028–54.
140. Plekhov O., Saintier N., Palin-Luc T., Uvarov S., Naimark O. Theoretical analysis, infrared and structural investigation of energy dissipation in metals under quasi-static and cyclic loading // *Materials Science and Engineering A*. – 2007. – Vol. 462. – No. 1. – P. 367–370.
141. Pohoryles D.A., Melo J., Rossetto T., Fabian M., McCague C., Stavrianaki K., Lishman B., Sargeant B. Use of DIC and AE for Monitoring Effective Strain and Debonding in FRP and FRCM-Retrofitted RC Beams // *Journal of Composites for Construction*. 2017. V. 21. Issue 1.
142. Qin et al. Full-field analysis of shear test on 3D orthogonal woven C/C composites // *Composites: Part A* 43 (2012) 310–316
143. Radaj D., Zhang S. Process zone fracture criteria for crack tips // *Eng. Fract. Mech.* – 1995. – Vol. 50, No. 1. – P. 111–120.
144. Sapora, A., Cornetti, P., Carpinteri, A. Cracks at rounded V-notch tips: an analytical expression for the stress intensity factor. // *International journal of fracture*. – 2014 – Vol. 187 – Issue 2. – pp. 285-291
145. Senthil K., Arockiarajan A., Palaninathan R., Santhosh B., Usha K.M. Defects in composite structures: Its effects and prediction methods – a comprehensive review *Compos Struct*, 106 (2013), pp. 139-149.
146. Seweryn A. Brittle fracture criterion for structures with sharp notches // *Eng. Fract. Mech.* – 1994. – Vol. 47, No. 5. – P. 673–681.

147. Seweryn A., Mroz Z. A non-local stress failure condition for structural elements under multiaxial loading // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1995. – Vol. 51, No. 6. – P. 955–973.
148. Shahram Amini, Rajesh S. Kuma A high-fidelity strain-mapping framework using digital image correlation // *Materials Science and Engineering: A Volume 594*, 31 January 2014, p. 394-403
149. Singh I., Bhatnagar N. Drilling-induced damage in uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composite laminate *Int J Adv Manuf Tech*, 27 (9–10) (2006), pp. 877-882.
150. Spaskova 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. DOI 10.1007/978-3-319-51439-0_32.
151. Spaskova E.M. Research of the non-uniform strain and displacement fields in solids with concentrators with the use of the DIC technique // *Challenge journal of structural mechanics*. — 2016. — Vol. 2, No. 3. — P. 193-195. — DOI: <http://dx.doi.org/10.20528/cjsmec.2016.09.023>
152. 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
153. Sun Z., Lyons J.S, McNeill S.R. Measuring microscopic deformations with digital image correlation *Opt Lasers Eng*, 27 (4) (1997), pp. 409–428
154. Sutton M.A., Orteu J.-J., Schreier.H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. – University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. – 364 p.
155. Talib AR Abu, Ramadhan AA, Rafie ASM, Zahari R. Influence of cut-out hole on multi-layer Kevlar-29/epoxy composite laminated plates. *Mater Des* 2013;43:89–98.

156. Tashkinov M. A. Modelling of fracture processes in laminate composite plates with embedded delamination // 2017. - 11 (39), pp. 248-262. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.39.23.
157. Tashkinov M.A., Spaskova E.M. Estimation of microstructural failure probability based on restoration of the field distributions laws in components of heterogenous media // 2nd International Conference on Structural Integrity, ICSI 2017, 4-7 September 2017, Funchal, Madeira, Portugal, pp. 608–613.
158. Tay T.E., Tan S.H.N., Tan V.B.C., Gosse J.H. Damage progression by the element-failure method (EFM) and strain invariant failure theory (SIFT) // *Compos Sci Technol*, 65 (6) (2005), pp. 935-944
159. Tirosh J. On the tensile and compressive strength of solids weakened (strengthened) by an inhomogeneity // *Trans. ASME. J. Appl. Mech.* – 1977. – Vol. 44, No. 3. – P. 449–454.
160. Tong W. An evaluation of digital image correlation criteria for strain mapping applications // *Strain.* – 2005. – Vol. 41. – No. 4. – P. 167–175. 66. Full-field strain measurement using a two-dimensional Savitzky-Golay digital differentiator in digital image correlation / B. Pan [et al.] // *Optical Engineering.* – 2007. – Vol. 46, N 3. – P. 33601-33610
161. Toribio J. A fracture criterion for high-strength steel notched bars // *Eng. Fract. Mech.* – 1997. – Vol. 57, No. 4. – P. 391–404.
162. Touchard-Lagattu F., Lafarie-Frenot M.C. Damage and inelastic deformation mechanisms in notched thermoset and thermoplastic laminates // *Composites Science and Technology* 56 (1996) 557-568
163. Tretyakova T.V., Tretyakov M.V., Wildemann V.E. Stable crack growth in Al-Cu-Mg alloy under various stiffness of loading system in bodies with concentrators // *Structural Integrity Procedia.* T.13, pp. 1774-1779, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.369>
164. Tretyakova T.V., Vildeman V.E. Influence the loading conditions and the stress concentrators on the spatial-time inhomogeneity due to the yield delay and the jerky

- flow: study by using the digital image correlation and the infrared analysis // *Frattura ed integrità strutturale*, — 2017 — Vol. 11 — No. 42 — pp. 303-314.
165. Tsepennikov M.V., Strom A.A., Povyshev I.A., Smetannikov O.Yu. Theoretical-experimental study of mechanical behavior in 3D composites under quasi-steady damage // *PNRPU Mechanics Bulletin*. — 2016. — Vol. 2. — P. 143–158. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.10.
166. Vassoler M.J., Fancello A.E. Error analysis of the digital image correlation method. // *Mec Comput*. — 2010. — Vol. 29. — pp. 6149–6161.
167. Vildeman V.E., Lomakin E.V., Tret'yakova T.V., Tret'yakov M.P. Supercritical deformation and fracture of bodies with concentrators under plane stress state conditions // *Mechanics of Solids*. — Vol. 52. — No. 5. — pp. 488–494. DOI 10.3103/S002565441705003X
168. Waddoups M.E., Eisenmann J.R., Kaminski B.E. Macroscopic fracture mechanics of advanced composite materials // *J. Compos. Mater.* — 1971. — Vol. 5, No. 4. — P. 446–454.
169. Wagner D., Ranc N., Bathias C., Paris P.C. Fatigue crack initiation detection by an infrared thermography method // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. — 2010. — Vol. 33. — Iss. 1. — P. 12–21.
170. Walrath D.E., Adams D.F. The Iosipescu shear test as applied to composite materials. *Exp Mech* 1983; Vol. 23, №1, 105–110.
171. Wang Y, Lava P, Coppieters S, De Strycker M, Houtt PV, Debruyne D. Investigation of the uncertainty of DIC under heterogeneous strain states with numerical tests. // *J Strain* — 2012. — Vol. 48 (6) — pp. 453–462.
172. Whitney J.M., Nuismer R.J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations // *Composite Materials*, 8 (1974), pp. 253-265
173. Wiegardt K. Über das Spalten und Zerreißen elastischer Körper // *Zeitschrift für Mathematik und Physik*. — 1907. — Vol. 55, No. 1-2. — P. 60–103.
174. Wildemann V. V., Tret'yakova T. V., Strungar E. M., Tret'yakov 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
175. Wildemann V.E., Lomakin E.V., Tretyakov M.P. Postcritical deformation of steels in plane stress state // *Mechanics of Solids*. — 2014. — Vol. 49, Issue 1. P. 18-26. DOI 10.3103/S0025654414010038.
176. Wildemann V.E., Spaskova 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 doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.243.163
177. Williams J.G., Ewing P.D. Fracture under complex stress – the angled crack problem // *Int. J. Fract. Mech.* – 1972. – Vol. 8, No. 4. – P. 441–446.
178. Wu H.-C., Chang K.-J. Angled elliptic notch problem in compression and tension // *Trans. ASME. J. Appl. Mech.* – 1978. – Vol. 45, No. 2. – P. 258–262.
179. Xie, N., Smith, R. A., Mukhopadhyay, S. and Hallett, S. R. (2018). A numerical study on the influence of composite wrinkle defect geometry on compressive strength, *Materials and Design*, 140, pp. 7-20. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.11.034.
180. Yeh H.-Y., Kim C.H. Fracture mechanics of the angled elliptic crack under uniaxial tension // *Eng. Fract. Mech.* – 1995. – Vol. 50, No. 1. – P. 103–110.
181. Yu G., Gao X., Song Y. Experimental Investigation of the In-Plane Shear Behavior on Needled C/SiC Composites using Digital Image Correlation // *Journal of Ceramic Science and Technology*. Vol. 7, No. 4. P. 387-395

Приложение

АКТ

Использования результатов НИР

Мы, нижеподписавшиеся, от лица ИСПОЛНИТЕЛЯ проректор по науке и инновациям Пермского национального исследовательского политехнического университета Кортаев В.Н. и от лица ЗАКАЗЧИКА генеральный конструктор ПАО «ОДК-Сатурн» Храмин Р.В., составили настоящий акт о том, что в результате научных исследований, выполненных в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (ЦЭМ ПНИПУ) в 2016 г. в рамках договора №831/010-001-2016 по теме «Исследование влияния типов переплетения углеволокна на механические свойства полимерного композиционного материала. Формирование научно-технического задела для проектирования деталей из 3D-армированного ПКМ» (руководитель работ профессор Вильдеман В.Э.) проведен комплекс испытаний (испытания на сжатие, растяжение, сдвиг) образцов полимерных композиционных материалов на основе преформ, полученных методами 3D-ткачества, слоистых с дополнительным усилением методом прошивки в поперечном направлении, для получения механических свойств материала. Проведено сравнение результатов со свойствами слоистых образцов, осуществлена оценка влияния схем переплетения на механические характеристики. Контроль процесса деформирования образцов осуществлялся с помощью цифровой оптической системы анализа деформаций. По полученным экспериментальным данным с видеосистемы исследована эволюция неоднородных полей продольных, поперечных и сдвиговых деформаций на поверхности образца в области концентратора.

Результаты исследований используются на предприятии ПАО «ОДК-Сатурн» при оценке свойств полимерных композиционных материалов в зависимости от типов переплетения при проектировании деталей из 3D-армированного ПКМ.

От ИСПОЛНИТЕЛЯ:

Проректор по науке и инновациям ПНИПУ
Профессор, д.т.н.

В.Н. Кортаев

Руководитель работ, директор ЦЭМ
ПНИПУ
Профессор, д.ф.м.н.

В.Э. Вильдеман

Исполнитель работы
м.н.с. ЦЭМ ПНИПУ

Е.М. Струнгарь

От ЗАКАЗЧИКА:

Генеральный конструктор ПАО «ОДК-Сатурн»

Р.В. Храмин

Главный конструктор по ЦД-35 и изд.156

А.В. Пахоменков





УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
Пермского национального
исследовательского политехнического
университета,
доктор технических наук, профессор
Лобов Н.В.
« 01 » сентября 2019 г.

АКТ

**внедрения в учебный процесс кафедры «Экспериментальная механика и
конструкционное материаловедение» ФГБОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет»
результатов диссертации Струнгарь Елены Михайловны
на тему «Неупругое деформирование и разрушение слоисто-волоконистых
полимерных композитов в зонах концентрации напряжений»**

Настоящий акт составлен в том, что материалы диссертационной работы Струнгарь Е.М. используются в учебном процессе кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» по направлению 150100.68 «Материаловедение и технологии материалов» по дисциплинам «Экспериментальная механика материалов» и «Экспериментальная механика композитов».

Заведующий кафедрой
«Экспериментальная механика и
конструкционное материаловедение»,
доктор физико-математических наук,
профессор

/Вильдеман В.Э./