

На правах рукописи



**Сероваев Григорий Сергеевич**

**МЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ  
ТОЧЕЧНЫМИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ВОЛОКОННО-  
ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ**

1.1.8 – Механика деформируемого твёрдого тела

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2025

Работа выполнена в Институте механики сплошных сред УрО РАН – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: **Матвеев Валерий Павлович**, д.т.н., профессор, академик РАН.

Официальные оппоненты: **Сапожников Сергей Борисович**, д.т.н. (01.02.04, 01.02.06), профессор, профессор кафедры технической механики Политехнического института ФГАОУ ВО "Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)", г. Челябинск;

**Федулов Борис Никитович**, д.ф.-м.н. (01.02.04), профессор кафедры теории пластичности ФГБОУ ВО "Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова", г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт проблем машиноведения Российской академии наук", г. Санкт-Петербург.

Защита состоится **25 июня 2025 г.** в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук" (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: [www.icmm.ru](http://www.icmm.ru).

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

Автореферат разослан « \_\_\_ » мая 2025 г.

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



/ А.Л. Зув

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы, степень ее разработанности.** Измерение деформаций является одной из ключевых задач при мониторинге механического состояния машин, конструкций и сооружений. Для измерения деформаций используются различные датчики: механические, гидравлические, оптические, тензорезистивные и пьезоэлектрические, контактные и бесконтактные экстензометры. Начиная с 80-х годов, к этому семейству добавились волоконно-оптические датчики (ВОД). Они имеют ряд преимуществ по сравнению с другими датчиками: не требуют электрического питания; не чувствительны к электромагнитному воздействию; могут работать в широком диапазоне температур; имеются возможности по размещению множества ВОД на одной линии оптического волокна и одновременной регистрации показаний со всех датчиков на линии. Малые размеры оптического волокна позволяют фиксировать ВОД как на поверхности контролируемого объекта, так и встраивать в материалы на технологической стадии их изготовления. Возможность встраивания датчиков в материал особенно актуальна для полимерных композиционных материалов (ПКМ), изготавливаемых по различным технологиям.

В литературе, главным образом в зарубежной, имеется обширная информация о различных вариантах применений ВОД деформаций в аэрокосмической, машиностроительной, геотехнической, строительной и других отраслях. Анализ литературы и личный опыт работы с ВОД позволяет выделить ряд проблем, требующих решения при измерении деформаций ВОД. Большие ожидания связаны с использованием ВОД, встроенных в ПКМ. При реализации этой задачи необходимо проанализировать перераспределение напряженно-деформированного состояния (НДС), вызванного встраиванием в материал оптического волокна, с учетом возможного появления технологического дефекта. При использовании ВОД, встроенных в материал или фиксированных клеевым соединением на поверхности материала, одна из сложных проблем связана с оценкой достоверности значений деформаций, вычисленных на основе физических величин, регистрируемых датчиком. Такая же проблема имеет место при использовании розеток из ВОД, обеспечивающих получение информации о компонентах тензора деформаций. В литературе практически отсутствует информация об особенностях измерения деформаций в областях с высоким градиентом деформаций. В частности, при использовании распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния, может быть не получен результат в силу сложности кросс-корреляционного анализа. Представляют интерес результаты, обеспечивающие обоснованное использование расположенных на одном оптическом волокне точечных датчиков на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР) и распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния, что обеспечит дополнительную достоверность результатов измерений и синергетический эффект от совместного использования достоинств этих датчиков.

Результаты, представленные в работах двух последних десятилетий, не дают полных ответов на вышеупомянутые проблемы. В связи с этим актуальность темы диссертационной работы определяется необходимостью комплексного анализа методами механики деформируемого твердого тела задач, возникающих при измерении деформаций точечными ВОД на брэгговских решетках и распределенными ВОД на основе рэлеевского рассеяния, с целью обеспечения обоснованного использования этих датчиков.

**Целью работы** является развитие методов и оценка результатов измерения деформаций точечными и распределенными ВОД, встроенными в материал или фиксированными на его поверхности.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Экспериментальное исследование работоспособности ВОД при разных климатических условиях и при встраивании в материал.
2. Численный анализ перераспределения напряжений при встраивании ВОД в полимерные композиционные материалы.
3. Разработка вариантов совместного использования точечных и распределенных ВОД.
4. Построение математических моделей и экспериментальные исследования для оценки погрешности измерения деформаций ВОД, встроенными в материал и при наличии градиентного распределения деформаций.
5. Демонстрация эффективности ВОД в практических приложениях.

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

1. Разработаны алгоритмы, обеспечивающие измерение деформаций расположенными на одном оптическом волокне точечными датчиками на брэгговских решетках и распределенными датчиками на обратном рэлеевском рассеянии на всех зонах оптического волокна.
2. Выполнены эксперименты, демонстрирующие в течение длительного времени стабильность показаний волоконно-оптических датчиков на основе ВБР при различных температурах и влажности и работоспособность ВОД, встроенных в различные материалы.
3. Разработаны модели и алгоритмы для расчета напряженно-деформированного состояния и оценки концентрации напряжений в окрестности оптического волокна, встроенного в полимерные композитные материалы.
4. Разработаны численные методики оценки погрешности вычисления деформаций на основе физических величин, регистрируемых датчиками на брэгговских решетках, встроенными в материал, фиксируемыми на поверхности материала, образующими розетки, встроенные в материал.
5. Выполнены численные и экспериментальные исследования по измерению градиентных полей деформаций и разработаны рекомендации по выбору параметров распределенных ВОД.

6. Продемонстрированы методики использования ВОД для регистрации технологических деформаций в различных материалах, регистрации появления и развития дефектов.

**Методология и методы исследования.** Численное решение поставленных задач осуществлялось на основе метода конечных элементов с использованием программного пакета ANSYS. Экспериментальные исследования по измерению деформаций в образцах из полимерных композитных материалов, изготовленных методами прямого прессования и вакуумной инфузии, материалов, изготовленных по аддитивным технологиям, цементной смеси, полимеров, проводились с помощью ВОД на брэгговских решетках и ВОД на основе обратного рэлеевского рассеяния с использованием интеррогаторов ASTRO A322 и HYPERION si255 и рефлектометра обратного рассеяния OBR 4600.

**Реализация работы.** Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

**Теоретическая значимость** работы заключается в разработке моделей, алгоритмов и методик, обеспечивающих оценку напряженного состояния материалов со встроенными ВОД, оценку погрешности вычисления деформаций на основе физических величин, регистрируемых ВОД, рекомендаций по измерению градиентных полей деформаций.

**Практическая значимость** работы определяется методиками измерения деформаций разными типами датчиков, расположенных на одном оптическом волокне, оценками погрешности измерения деформаций и работоспособности ВОД, вариантами приложений ВОД деформаций.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритм измерения деформаций расположенными на одном оптическом волокне точечными датчиками на брэгговских решетках и распределенными датчиками на обратном рэлеевском рассеянии на всех зонах оптического волокна.

2. Результаты экспериментов, демонстрирующие стабильность показаний точечных ВОД на основе ВБР при различных температурах и относительной влажности воздуха, целостность и работоспособность ВОД при их встраивании в различные материалы.

3. Анализ напряженно-деформированного состояния и оценка концентрации напряжений в окрестности оптического волокна, встроенного в полимерные композитные материалы.

4. Методика и результаты оценки погрешности вычисления деформаций на основе физических величин, регистрируемых датчиками на брэгговских решетках, встроенными в материал, фиксируемыми на поверхности материала, образующими розетки, встроенные в материал.

5. Результаты численных и экспериментальных исследований по измерению градиентных полей деформаций с помощью точечных ВОД на основе ВБР и распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния.

6. Рекомендации по выбору параметров распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния.

7. Примеры использования ВОД для регистрации технологических деформаций в различных материалах, регистрации появления и развития дефектов.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена численными экспериментами, демонстрирующими сходимость решений, полученных методом конечных элементов (МКЭ) при увеличении степени дискретизации; удовлетворительным совпадением численных и экспериментальных результатов; сопоставлением результатов измерений деформаций различными типами ВОД; сопоставлением отдельных результатов измерений ВОД с результатами показаний на основе системы оптической регистрации деформаций методом цифровой корреляции изображений VIC-3D.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на 18 всероссийских и международных научных конференциях и семинарах, в том числе: XI, XII, XIII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, Уфа, Санкт-Петербург, 2015, 2019, 2023), XI, XVI Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2017, 2022), 7-м Международном симпозиуме по авиационным материалам (Франция, Компьен, 2018); XIX, XXI, XXII и XXIII Зимней школе по механике сплошных сред (Пермь, 2015, 2019, 2021, 2023); 25-й Международной конференции «Разрушение и структурная целостность» (Италия, Катания, 2019); 3-й Международной конференции по структурной целостности (Португалия, Фуншал, 2019); XLVIII Международной летней школе-конференции «Передовые проблемы в механике» (Санкт-Петербург, 2020); Научном форуме «Национальная экосистема высокоскоростного транспорта» (Сочи, 2022); конференции «Механика деформируемого твердого тела в проектировании конструкций» (Пермь, 2022); Международной конференции «Оптическая рефлектометрия, метрология и зондирование» (Пермь, 2023); 12-й международной конференции по математическому моделированию в физических науках (Сербия, Белград, 2023); XI Международном научно-практическом симпозиуме «Безопасность космических полетов» (Санкт-Петербург, 2024).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 35 работ, в том числе 12 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus; 19 статей в прочих журналах; 4 работы в материалах конференций.

**Личный вклад автора.** Методики и алгоритмы измерения деформаций точечными и распределенными ВОД, расположенными на одном оптическом

волокне; численного моделирования напряженно-деформированного состояния в окрестности оптического волокна, встроенного в ПКМ; численной оценки погрешности измерения деформаций ВОД на брэгговских решетках и розетками из этих датчиков, встроенными в материал или фиксированными на его поверхности клеевым соединением; рекомендации по выбору параметров распределенных ВОД. В соавторстве получены результаты по оценке работоспособности ВОД, измерению градиентных полей деформаций, приложениям ВОД для измерения технологических деформаций, регистрации дефектов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из вводной части, четырех глав, заключения и списка литературы (135 наименований). В работе приводятся 94 рисунка и 11 таблиц. Общий объем диссертации составляет 153 страницы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** имеет преимущественно обзорный характер. Представлены публикации, отражающие историю появления и развития точечных ВОД на брэгговских решетках, распределенных датчиков на основе рэлеевского рассеяния и их приложения в различных отраслях промышленности. Основное внимание уделено работам, в которых отмечаются проблемы, связанные с использованием ВОД: появление концентрации напряжений в окрестности оптического волокна, встроенного в материал; вычисление деформаций на основе физических величин, регистрируемых датчиками, встроенными в материал или фиксированными на поверхности; достоверность результатов измерений градиентных полей деформаций. На основе анализа этих и других проблем дается вывод об актуальности комплексного анализа методами механики деформируемого твердого тела задач, возникающих при измерении деформаций ВОД, формулируется цель, задача диссертационной работы, а также ее научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** диссертационной работы приведено описание точечных ВОД на брэгговских решетках и распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния и основные соотношения, необходимые для вычисления деформаций на основе физических величин, регистрируемых датчиками. Приведены эксперименты, демонстрирующие при измерении однородных полей деформаций совпадение результатов измерений точечными и распределенными датчиками в пределах 1.5%.

На основе анализа возможностей рассматриваемых точечных и распределенных ВОД деформаций сделан вывод о полезности использования двух типов датчиков на одном оптическом волокне. В связи с этим рассмотрена задача измерения деформаций с помощью распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния при наличии в измерительном оптическом волокне одной или нескольких ВБР с высокой отражательной способностью. Показано, что при сканировании оптического волокна рефлектометром обратного рассеяния в

диапазоне длин волн, в который входят резонансные длины волн ВБР, наблюдается высокий уровень шума, и стандартные алгоритмы обработки данных не позволяют выделить полезный сигнал. Предложено проводить сканирование вне резонансных длин волн ВБР. Это позволило устранить данный шум, но появляются нечувствительные зоны в окрестности ВБР, в которых не удастся получить значений деформаций. Для устранения этих нечувствительных зон предложен алгоритм, основанный на использовании оконного преобразования Фурье с оконной функцией Ханна. Применение разработанного алгоритма продемонстрировано при измерении однородных и градиентных полей деформаций.

Предложенные алгоритмы обеспечивают достоверность измерений на основе сопоставления результатов показаний разных типов датчиков и позволяют получать более детальную информацию о распределении деформаций.

Приведены результаты экспериментов по оценке стабильности показаний ВОД на основе ВБР в течение длительного промежутка времени (до 900 часов) при различных температурах ( $-43^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$ ) и относительной влажности воздуха (45–55%, 85–95%). Оптические волокна нагружались постоянной нагрузкой, которая составляла 50% и 70% от предельной нагрузки оптического волокна с защитной полиимидной оболочкой и записанной ВБР. Результаты испытаний в течение длительного промежутка времени показали, что изменение показаний ВОД при различной влажности, температуре и нагрузках, близких к предельным, находится в пределах 0.36%, что гарантирует возможность использования ВОД на брэгговских решетках в разных климатических условиях.

**Вторая глава** посвящена исследованию возможности внедрения оптического волокна в различные материалы с сохранением его целостности и работоспособности, влияния внедренного оптоволокна на внутреннюю структуру материалов и анализу напряженного состояния в окрестности внедренного оптического волокна.

Представлены результаты экспериментальных исследований, демонстрирующие возможность внедрения оптического волокна в различные материалы. В выполненных экспериментах ВОД встраивались в образцы из цементного раствора, эпоксидной смолы, термопластичных материалов, полученных с помощью аддитивных технологий, слоистых полимерных композитных материалов (стеклопластик, углепластик).

Проведены экспериментальные исследования внутренней структуры композитных образцов из угле- и стеклопластика с внедренным оптическим волокном, уложенным вдоль и поперек направления армирования, на основании изучения поперечных срезов с помощью оптического микроскопа. Показано, что для однонаправленного композитного материала оптическое волокно плотно встраивается в структуру материала при совпадении направления его укладки с направлением армирования. При укладке оптического волокна под углом к

направлению армирования образуется технологический дефект в виде смоляного кармана, и при угле  $90^\circ$ , длина смоляного кармана составляет 8–10 диаметров оптического волокна. При встраивании оптического волокна в ПКМ с плетеной структурой армирования происходит небольшое изменение структуры материала без образования смоляного кармана.

Предложена методика оценки целостности и работоспособности внедренного оптического волокна по наличию проходящего через волокно оптического излучения в видимом спектральном диапазоне. Работоспособность оптического волокна как распределенного ВОД на основе рэлеевского рассеяния проверялась по его отклику на температурное воздействие на образец. Реализация данного подхода апробирована на образцах из ПКМ на основе углеродного волокна с различной схемой армирования: однонаправленное армирование, саржевое плетение и триаксиальное плетение, изготовленных методом вакуумной инфузии в Центре композитных технологий КНИТУ-КАИ.

Для анализа перераспределения напряжений при встраивании оптического волокна в материал построены модели и алгоритмы, и выполнены расчеты НДС в окрестности оптического волокна.

При анализе перераспределения напряжений в ПКМ рассмотрены наиболее распространенные в приложениях слоистые композиционные материалы. Для этих материалов рассмотрены два варианта моделирования композитного материала: слоистая и однородная модели. В слоистой модели материал представляется пакетом слоев, каждый из которых является однородным анизотропным телом, а в однородной модели материал представляется однородной анизотропной средой. В рассмотренных моделях при встраивании оптического волокна учитывается образование технологического дефекта в виде смоляного кармана. На Рисунке 1 представлены варианты сечений, перпендикулярных оптическому волокну. При моделировании учитывается искривление слоев ПКМ, вызванное встраиванием оптического волокна.

Для всех вариантов представления ПКМ моделирование НДС в окрестности оптического волокна проводилось на элементе в виде параллелепипеда со встроенным оптическим волокном при разных вариантах нагружения нормальными однородными нагрузками на боковых гранях параллелепипеда (Рисунок 2).

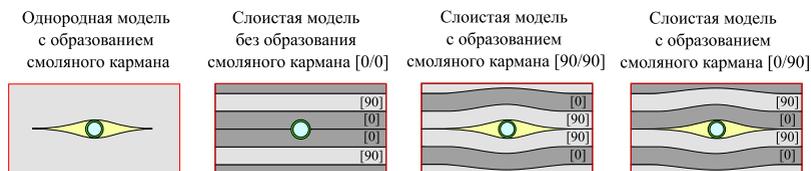


Рисунок 1 — Варианты представления ПКМ со встроенным оптическим волоком

Расчет НДС проводился методом конечных элементов с использованием сеток, сгущающихся в зоне концентрации напряжений. Точность вычислений обеспечивалась анализом сходимости решения при увеличении числа элементов. Размеры параллелепипеда обеспечивают однородное напряженное состояние на удалении от оптического волокна.

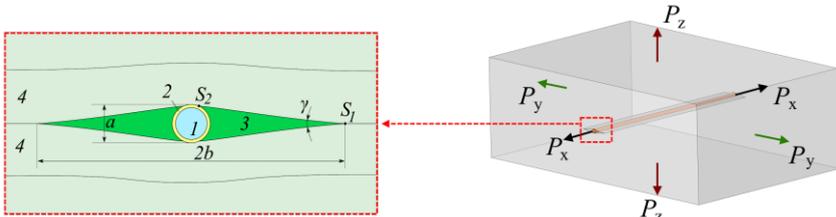


Рисунок 2 — Модель ПКМ со встроенным оптическим волокном и смоляным карманом: оптическое волокно (1); оболочка оптического волокна (2); смоляной карман (3); слой полимерного композитного материала (4)

В результате расчетов получены распределения напряжений в окрестности оптического волокна и коэффициенты концентрации напряжений. Результаты моделирования позволяют для соответствующих компоновок слоев выбирать варианты встраивания оптического волокна, обеспечивающие наименьшие уровни концентрации напряжений. Результаты моделирования позволяют также оценить влияние на напряженное состояние параметров смоляного кармана, которые в конкретных расчетах определяются результатами эксперимента. В частности показано, что увеличение длины смоляного кармана приводит к снижению концентрации напряжений. При заданной длине смоляного кармана его асимметрия, связанная с уменьшением одного из размеров, приводит к увеличению коэффициента концентрации напряжений. Наличие смоляной прослойки между волокном и композиционным материалом приводит к изменению концентрации напряжений, которая уменьшается при увеличении толщины заполненного смолой зазора.

В третьей главе рассматриваются задачи механики деформируемого твердого тела, результаты решения которых определяют обоснованное использование ВОД, в том числе датчиков, встроенных в материал. При анализе достоверности результатов измерения деформаций датчиками на основе ВБР, одна из ключевых проблем связана с процедурой вычисления деформаций на основе регистрируемых датчиком физических величин. В общем случае компоненты тензора деформаций в зоне брэгговской решетки  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ , среди которых деформация вдоль оптического волокна  $\varepsilon_3$  является измеряемой величиной, связаны с регистрируемыми датчиком физическими величинами —

сдвигами значений резонансных длин волн отраженного спектра  $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$  следующими соотношениями:

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_B} = \varepsilon_3 - \frac{1}{2}n^2(p_{11}\varepsilon_1 + p_{12}(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)), \quad \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_B} = \varepsilon_3 - \frac{1}{2}n^2(p_{11}\varepsilon_2 + p_{12}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)) \quad (1)$$

где  $n$  — эффективный показатель преломления сердцевины оптического волокна в зоне ВБР,  $p_{11}, p_{12}$  — коэффициенты фотоупругости,  $\lambda_B$  — резонансная длина волны ВБР в отсчетный момент времени.

Особенность этих соотношений состоит в том, что для определения трех неизвестных имеется только два уравнения. При одноосном напряженном состоянии  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\nu\varepsilon_3$ . В этом случае  $\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2 = \Delta\lambda$  и вместо двух уравнений (1) будет одно:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = \left(1 - \frac{n^2}{2}(p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}))\right)\varepsilon_3 \quad \text{или} \quad \varepsilon_3 = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} \quad (2)$$

Параметры  $n, p_{11}, p_{12}, \nu$  оптических волокон, рассматриваемых в работе, определяют величину  $k = 0.78$ .

Для оптического волокна, встроенного в материал или фиксированного на его поверхности клеевым соединением, в зоне брэгговской решетки имеет место сложное напряженное состояние. В связи с неединственностью решений уравнений (1), в большинстве практических приложений для вычисления деформаций используется уравнение (2), что соответствует принятию допущения об одноосном напряженном состоянии в зоне брэгговской решетки.

В работе предлагается следующий алгоритм численной оценки погрешности вычисления деформаций на основе соотношения (2). В качестве модельного объекта рассматривается параллелепипед со встроенным оптическим волокном при разных вариантах нагружения боковых поверхностей нормальными однородными нагрузками (Рисунок 2). При заданном варианте нагружения вычисляются деформации  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  в зоне брэгговской решетки.

Затем на основе соотношений (1) вычисляются значения  $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ , которые в данном случае являются имитацией экспериментальных результатов. В расчетах контролируется совпадение деформации  $\varepsilon_3$  в волокне и соответствующей деформации в материале рядом с оптическим волокном, которая является результатом измерения. Далее, из соотношения (2) на основе значений  $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ , моделирующих физический эксперимент, вычисляются деформации  $\varepsilon_3^{E_1}$  и  $\varepsilon_3^{E_2}$ . Погрешностями измерений в данном случае являются величины  $\delta_1 = (\varepsilon_3^{E_1} - \varepsilon_3) / \varepsilon_3 \cdot 100\%$ ,  $\delta_2 = (\varepsilon_3^{E_2} - \varepsilon_3) / \varepsilon_3 \cdot 100\%$ .

Следует отметить, что данные оценки определяют максимальные погрешности вычисления деформаций, так как реальные резонансные длины

волн отраженных спектров дают значения между  $\Delta\lambda_1$  и  $\Delta\lambda_2$ . На основе полученных оценок могут быть найдены значения  $k_1$  и  $k_2$ , которые по формулам  $\Delta\lambda_1/\lambda_B = k_1\varepsilon_3$ ,  $\Delta\lambda_2/\lambda_B = k_2\varepsilon_3$ , дают достоверные значения деформаций. Таким образом, величины  $k_1, k_2$  по отношению к величине  $k = 0.78$  определяют калибровочные коэффициенты. Практический интерес представляют зависимости  $k_1, k_2$  в системе координат  $\varepsilon_2/\varepsilon_3, \varepsilon_1/\varepsilon_3$  относительно плоскости  $k = 0.78$  (Рисунок 3).

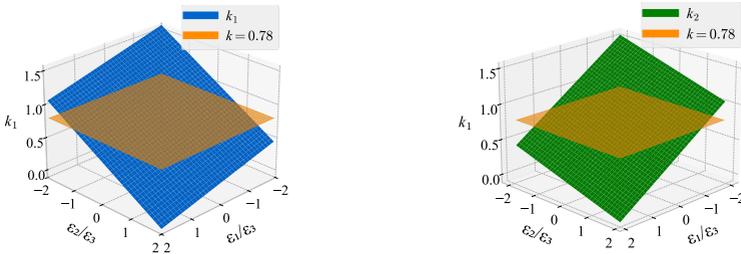


Рисунок 3 — Зависимости  $k_1$  и  $k_2$  от компонент тензора деформаций

Полученные результаты дают представление о зависимости погрешности вычисления деформаций от вида напряженного состояния в зоне брэгговской решетки и позволяют сделать вывод, что наименьшая погрешность имеет место при измерении максимальной компоненты тензора деформаций и при ориентации оптического волокна вдоль этой компоненты.

Данный вывод подтвержден экспериментальными результатами при одноосном растяжении образца из ПКМ, полученного на основе препрегов стеклопластика. Оптическое волокно с 14 датчиками на брэгговских решетках было встроено в образец на технологической стадии его изготовления. На Рисунке 4 представлены результаты измерения деформаций ВОД, результаты численного моделирования МКЭ и экспериментальные результаты, полученные оптической системой VIC-3D.

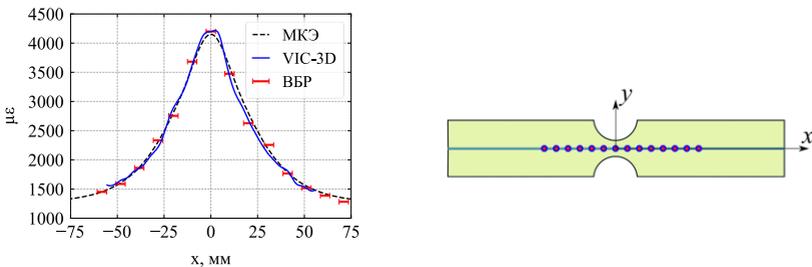


Рисунок 4 — Распределение деформаций в образце с вырезом

Для датчиков, фиксированных на поверхности клеевым или другим соединением, при оценке погрешности вычисления деформаций на основе предлагаемой методики используется модель, представленная на Рисунке 5.

В работе представлены результаты использования этой модели для оценки факторов, влияющих на погрешность результатов измерения: градиента деформаций от сердцевины оптического волокна к зоне измерения деформаций; изменения деформаций в результате размещения оптического волокна и клея на поверхности материала.

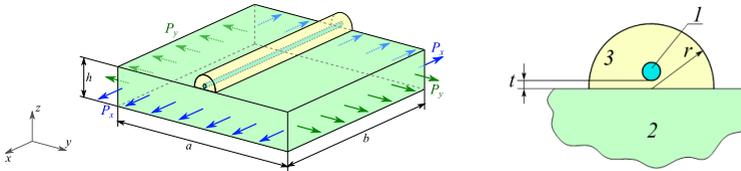


Рисунок 5 — Модель материала с оптическим волокном, фиксированным клеевым соединением на поверхности

Наряду с измерением одной из компонент тензора деформаций, в работе приведены результаты измерения деформаций розетками из ВОД на брэгговских решетках и результаты оценки погрешности вычисления деформаций при использовании розеток. Модель материала с оптическим волокном и датчиками, образующими розетку, приведена на Рисунке 6.

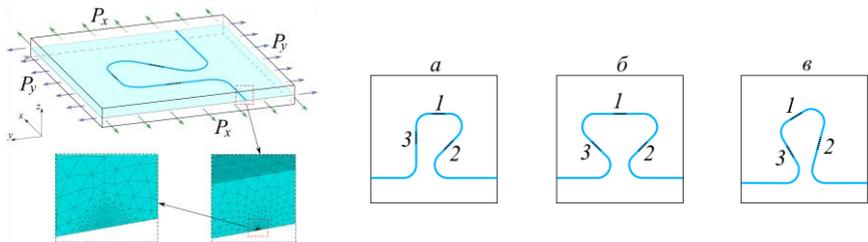


Рисунок 6 — Схема расчета ПКМ со встроенным оптическим волокном, образующим розетку датчиков, пример дискретизации конечно-элементной сетки вблизи волокна, варианты расположения датчиков в розетке

Результатом моделирования является оценка погрешности вычисления  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ , полученной на основе результатов измерения деформаций датчиками, образующими розетку. В качестве примера на Рисунке 7 для ПКМ на основе 20 слоев стеклопластика, изготовленного методом прямого прессования, приведены значения погрешностей:

$$\delta_x^1 = \frac{\varepsilon_x^1 - \varepsilon_x}{\varepsilon_0} \cdot 100\%, \quad \delta_y^1 = \frac{\varepsilon_y^1 - \varepsilon_y}{\varepsilon_0} \cdot 100\%, \quad \delta_x^2 = \frac{\varepsilon_x^2 - \varepsilon_x}{\varepsilon_0} \cdot 100\%, \quad \delta_y^2 = \frac{\varepsilon_y^2 - \varepsilon_y}{\varepsilon_0} \cdot 100\%,$$

где  $\varepsilon_x^1$ ,  $\varepsilon_y^1$ ,  $\varepsilon_x^2$ ,  $\varepsilon_y^2$  — значения деформаций, полученных на основе результатов модельного эксперимента,  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  — деформации материала в зоне розетки,  $\varepsilon_0$  — деформация материала при одноосном растяжении нагрузкой  $P_0$ .

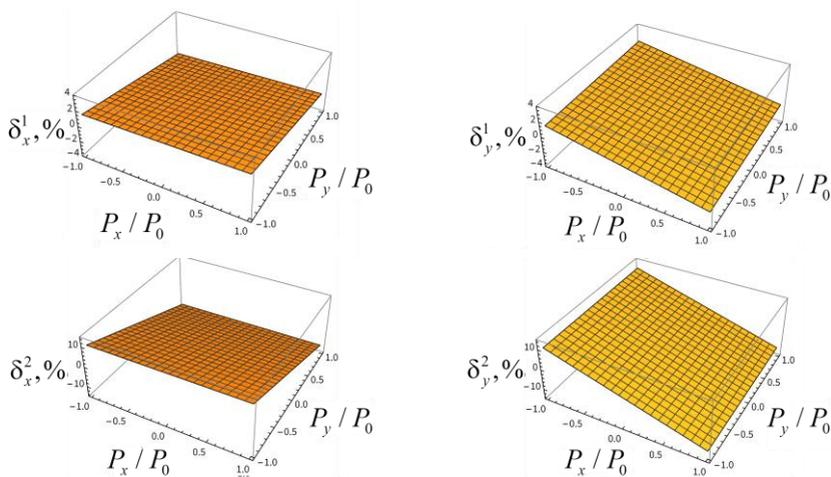


Рисунок 7 — Значения погрешностей  $\delta_x^1$ ,  $\delta_y^1$ ,  $\delta_x^2$ ,  $\delta_y^2$  при различных значениях нагрузок  $P_x/P_0$  и  $P_y/P_0$

Экспериментальное подтверждение приведенных оценок получено при реализации сложного напряженного состояния в образце из ПКМ, представленного на Рисунке 8. Розетки из датчиков на брэгговских решетках встроены в материал на технологической стадии его изготовления.

В выполненных экспериментах на отраженном оптическом спектре нет выраженных пиков, соответствующих значениям  $\Delta\lambda_1$  и  $\Delta\lambda_2$ . Численными экспериментами показано, что значения  $\Delta\lambda_1$  и  $\Delta\lambda_2$  достаточно близки, и в реализованных экспериментах на общей картине отраженного спектра два пика сливаются вместе. При нагрузках, обеспечивающих большие значения деформаций  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ , в экспериментах получены два пика на отраженном спектре, в частности, при нагружении образца давлением, перпендикулярным его плоскости.

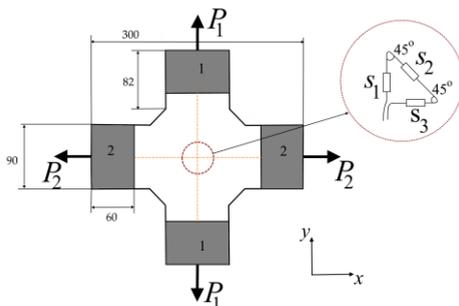


Рисунок 8 — Экспериментальный образец в форме креста

В работе получены экспериментальные и численные результаты, обеспечивающие получение достоверных значений деформаций при измерении точечными и распределенными ВОД градиентных полей деформаций. Для экспериментов предложены образцы из ПКМ (Рисунок 9) и полимерные образцы, полученные 3D-печатью (Рисунок 10).

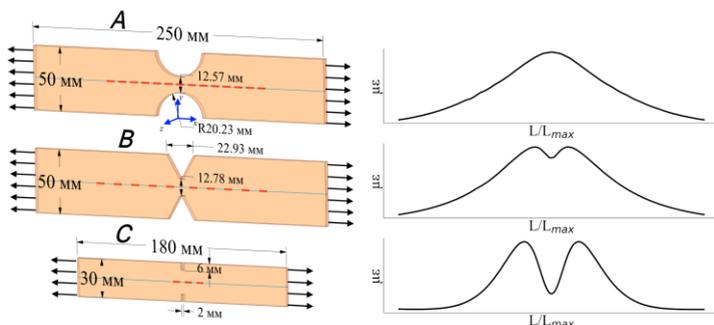


Рисунок 9 — Геометрии образцов и распределения деформаций вдоль центральных осевых линий

Достоинством этих образцов является реализация при простых нагружениях различных вариантов градиентного распределения деформаций, в том числе варианта с изменением знака производной от функции распределения деформаций. Точечные и распределенные ВОД были встроены в материал или фиксированы на поверхности образцов.

Наибольшее расхождение результатов измерения деформаций ВОД с результатами численного анализа при растяжении образцов, представленных на Рисунке 9, имеет место на участках, где производная от функции распределения деформаций изменяет знак.

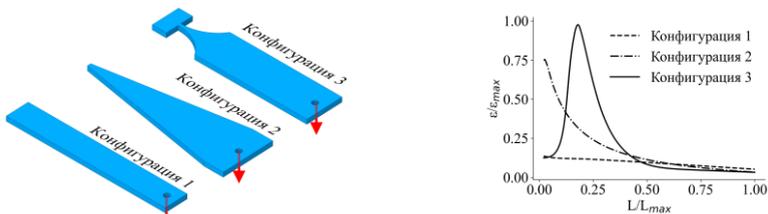


Рисунок 10 — Геометрические конфигурации образцов и распределения деформаций вдоль их длины

Показано, что погрешность при измерении деформаций ВОД в локальных зонах неоднородного распределения деформаций существенно зависит от выбранной длины (базы) датчика и уменьшается с уменьшением базы датчика. При этом для распределенных ВОД на основе рэлеевского рассеяния оптимальная база датчика ограничена снизу наименьшим количеством точек на профиле рассеяния, которые необходимы для получения спектра в частотной области, а сверху — предельной длиной фрагмента оптического волокна, на котором при наличии градиента деформаций возможно проведение алгоритма кросс-корреляции. Выход за обозначенные пределы приводит к высокому отношению сигнал/шум, как показано на Рисунке 11.

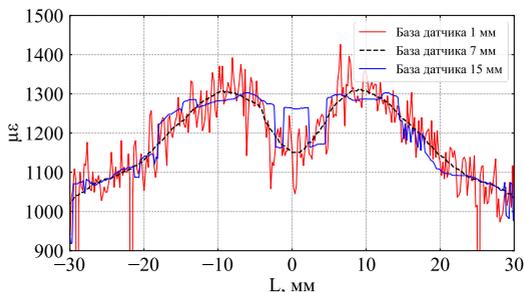


Рисунок 11 — Распределения деформаций вдоль центральной осевой линии образца, полученные распределенным ВОД при разных базах датчика

Для ВОД на основе ВБР продемонстрировано влияние градиента деформаций вдоль длины брэгговской решетки, возникающего при нагружении образца предлагаемой геометрии (конфигурация 3 на Рисунке 10), на форму отраженного спектра, выраженное в увеличении ширины основного пика отражения ВБР. При характерной для градиентного распределения деформаций форме отраженного спектра могут иметь место сложности в определении резонансной длины волны и погрешности в измерении деформаций с помощью ВОД на основе брэгговских решеток.

В четвертой главе приведены варианты решения прикладных задач, демонстрирующие преимущества ВОД деформаций.

Встраивание ВОД в материал дает уникальные возможности для регистрации в изделиях технологических деформаций. В разделе 4.1 приведены результаты измерения технологических деформаций в образцах из цемента, полимеров, изготовленных 3D-печатью и ПКМ.

Использование большого числа ВОД деформаций, в том числе датчиков, расположенных на одном оптическом волокне, открывает новые возможности для оценки механического состояния конструкций. В качестве одного из таких примеров в разделе 4.2 приведен алгоритм регистрации появления и развития дефектов при внешних воздействиях на конструкцию, подобных в различные моменты времени. Алгоритм основан на анализе относительных величин деформаций, измеренных в различных зонах конструкции, и использовании математического моделирования для размещения датчиков в зонах концентрации напряжений, где велика вероятность появления дефекта, и в зонах без концентрации напряжений.

Возможности предлагаемого алгоритма продемонстрированы на ряде примеров. На пластине (Рисунок 12а) с ВОД выполнены эксперименты при ее растяжении для варианта без отверстия и вариантов с отверстиями разных диаметров, которые являются имитацией дефекта.

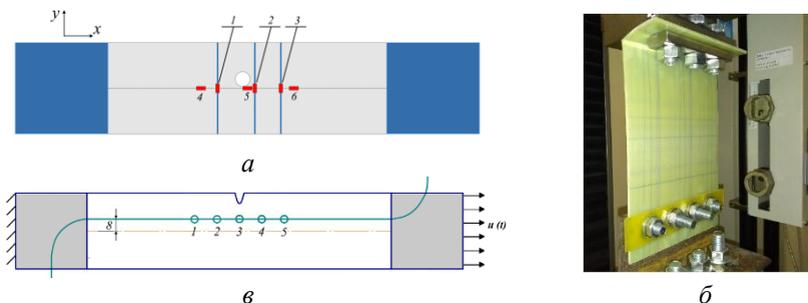


Рисунок 12 — Образцы для регистрации появления дефектов при нагружении

В следующем примере конструктивно-подобный образец из стеклопластика в форме уголка подвергался растяжению (Рисунок 12б). При достижении растягивающих усилий 5000 Н регистрируется появление дефекта в зоне ребра. Следует отметить, что, несмотря на симметрию образца относительно среднего сечения, алгоритм позволил зарегистрировать асимметрию дефекта вдоль ребра уголка.

Наряду с квазистатическими вариантами нагрузки рассмотрен пример с циклическими нагрузками. На Рисунке 12в приведена пластина из стеклопластика с вырезом на боковой поверхности, которая подвергается циклическим растягивающим усилиям. В пластину встроены ВОД в

соответствии с рекомендацией об их размещении в зонах с концентрацией и без концентрации напряжений. На основе рассматриваемой методики зафиксированы момент появления (~2000 циклов) и развитие дефектов.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработан алгоритм, обеспечивающий измерение деформаций распределенными волоконно-оптическими датчиками на основе рэлеевского рассеяния на всей длине оптического волокна при наличии в измерительном волокне одной или нескольких ВБР с высокой отражательной способностью.

2. Выполнены эксперименты, демонстрирующие стабильность показаний волоконно-оптических датчиков деформаций при различной влажности (от 45% до 95%) и различных температурах (от  $-43^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ ) в течение длительного времени.

3. Продемонстрирована возможность измерения деформаций и достоверность результатов измерений точечными и распределенными волоконно-оптическими датчиками, встроенными в полимерные композиционные материалы, изготавливаемые методами прямого прессования и вакуумной инфузии, полимерные материалы, изготавливаемые по аддитивным технологиям, и ряд других материалов.

4. Разработаны модели и алгоритмы для расчета напряженно-деформированного состояния и оценки концентрации напряжений в окрестности оптического волокна, встроенного в слоистые полимерные композиционные материалы.

5. Разработана численная методика оценки погрешности вычисления деформаций на основе физических величин, регистрируемых волоконно-оптическими датчиками на брэгговских решетках, встроенными в материал или располагаемыми на его поверхности, при использовании допущения об одноосном напряжённом состоянии в зоне датчика.

6. Для тестирования точечных и распределенных волоконно-оптических датчиков деформаций разработана серия образцов, обеспечивающих различные варианты градиентного распределения деформаций при простых вариантах нагружения: одноосное растяжение, изгиб.

7. Разработаны рекомендации по выбору параметров распределенных волоконно-оптических датчиков деформаций при измерении градиентных полей деформаций.

8. Приведены варианты решения прикладных задач, демонстрирующие преимущества ВОД деформаций для: регистрации технологических деформаций в различных материалах; регистрации появления и развития дефектов в конструкциях при внешних воздействиях, подобных в различные моменты времени.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Сероваев Г.С., Кошелева Н.А. Исследование стабильности показаний волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках при различных климатических условиях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 4. – С. 101–109.
2. Matveenko V., Serovaev G. Distributed Strain Measurements Based on Rayleigh Scattering in the Presence of Fiber Bragg Gratings in an Optical Fiber // Photonics. – 2023. – Vol. 10. – No. 8. – Art. id. № 868.
3. Matveenko V., Serovaev G., Kosheleva N., Fedorov A. Numerical and experimental analysis of the reliability of strain measured by surface-mounted fiber-optic sensors based on Bragg gratings // Struct. Control Health Monit. – 2022. – Vol. 29. – No. 12. – Art. id. e3142.
4. Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G., Fedorov A. Measurement of Gradient Strain Fields with Fiber-Optic Sensors // Sensors. – 2022. – Vol. 23. – No. 1. – Art. id. 410.
5. Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G. Damage detection in materials based on strain measurements // Acta Mech. – 2021. – Vol. 232. – No. 5. – P. 1841–1851.
6. Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G., Fedorov A. Analysis of Reliability of Strain Measurements Made with the Fiber Bragg Grating Sensor Rosettes Embedded in a Polymer Composite Material // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – No. 15. – Art. id. 5050.
7. Serovaev G.S., Kosheleva N.A. The study of internal structure of woven glass and carbon fiber reinforced composite materials with embedded fiber-optic sensors // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2020. – Vol. 14 – No. 51. – P. 225–235.
8. Fedorov A.Y., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S. Strain measurement and stress analysis in the vicinity of a fiber Bragg grating sensor embedded in a composite material // Composite Structures. – 2020. – Vol. 239. – Art. id. 111844.
9. Matveenko V.P., Kosheleva N.A., Serovaev G.S., Fedorov A.Yu. Numerical analysis of the strain values obtained by FBG embedded in a composite material using assumptions about uniaxial stress state of the optical fiber and capillary on the Bragg grating // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2019. – Vol. 13. – No. 49. – P. 177–189.
10. Matveenko 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. – 2018. – Vol. 25. – No. 3. – Art. id. e2118.
11. Матвеевко В.П., Кошелева Н.А., Сероваев Г.С. Экспериментальные и теоретические результаты, связанные с измерением деформаций, встроенными в материал волоконно-оптическими датчиками на брэгговских решетках // Изв.

РАН. МТТ. – 2021. – № 6. – С. 3–15.

12. 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 // Изв. РАН. МТТ. – 2016. – № 5. – С. 42–51.