

«ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД УРО РАН» – ФИЛИАЛ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ПЕРМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



Сероваев Григорий Сергеевич

МЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ТОЧЕЧНЫМИ И  
РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
академик РАН  
Матвеев Валерий Павлович

Пермь — 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ТОЧЕЧНЫМИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ.</b>	22
1.1. Измерение деформаций точечными ВОД на основе брэгговских решёток.....	22
1.2. Измерение деформаций распределёнными ВОД на основе рэлеевского рассеяния.....	28
1.3. Измерение деформаций точечными и распределёнными ВОД, расположенными на одном оптическом волокне .....	38
1.4. Исследование стабильности показаний волоконно-оптических датчиков при разных температурах и влажности.....	46
<b>ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВСТРАИВАНИИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В МАТЕРИАЛ</b> .....	50
2.1. Экспериментальный анализ структуры материала в окрестности оптического волокна, встроенного в материал .....	50
2.2. Оценка работоспособности оптического волокна, встроенного в материал ...	59
2.3. Моделирование НДС в окрестности оптического волокна, встроенного в материал .....	60
<b>ГЛАВА 3. ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ, ВСТРОЕННЫМИ В МАТЕРИАЛ ИЛИ ФИКСИРОВАННЫМИ НА ПОВЕРХНОСТИ</b> .....	74
3.1. Численный и экспериментальный анализ результатов измерения деформаций волоконно-оптическими датчиками на брэгговских решётках, встроенными в материал или фиксированными клеевым соединением на его поверхности.....	74
3.2. Численный и экспериментальный анализ результатов измерения деформаций встроенными в материал розетками из ВОД на брэгговских решётках.....	87
3.3. Измерение градиентных полей деформаций при помощи ВОД .....	101

<b>ГЛАВА 4. ВАРИАНТЫ ПРИЛОЖЕНИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И РЕГИСТРАЦИИ ДЕФЕКТОВ .....</b>	<b>117</b>
4.1. Измерение технологических и остаточных деформаций.....	117
4.2. Вариант регистрации повреждений с помощью ВОД.....	123
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>137</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>139</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы, степень ее разработанности.** Измерение деформаций является одной из ключевых задач при мониторинге механического состояния машин, конструкций и сооружений. Для измерения деформаций получили распространение механические, гидравлические, оптические, тензорезистивные и пьезоэлектрические датчики, контактные и бесконтактные экстензометры. С 80-х годов XX века одним из результатов волоконной оптики является появление нового класса чувствительных элементов — волоконно-оптических датчиков (ВОД), в том числе ВОД деформаций. История волоконной оптики тесно связана с разработкой и появлением лазеров в начале 1960-х годов [1]. В работе [2] были сформулированы основные концепции работы оптических волокон и теоретически продемонстрировано их потенциальное преимущество при передаче информации по сравнению с медным кабелем, заключающееся в существенно большей пропускной способности оптоволокна. На тот момент главной проблемой на пути к реализации данной концепции являлось наличие примесей в стекле, а следовательно, высокий уровень затухания сигнала в стеклянных волноводах. Преодолеть данное ограничение удалось к 1970 году, когда было продемонстрировано кварцевое оптическое волокно с низким уровнем затухания и пропускной способностью, превышающей медный провод в 65000 раз [3]. Далее происходило все более широкое внедрение и активный рост количества научных исследований в области фотоники и волоконной оптики. Постепенно начали появляться исследования, посвященные использованию оптических волокон не только в качестве эффективного канала передачи информации, но и в качестве чувствительного элемента, позволяющего регистрировать различные параметры [4].

Волоконно-оптические датчики можно разделить на две основные группы по протяженности измерительного участка: точечные и распределенные. Появлению точечных ВОД способствовало открытие в 1978 году явления

фоточувствительности кварцевых оптических волокон, легированных германием, которое заключается в изменении показателя преломления сердцевинного оптического волокна при интенсивном воздействии ультрафиолетового (УФ) излучения на некоторую область оптического волокна [5]. Данное открытие носило во многом случайный характер и оставалось незамеченным на протяжении целого десятилетия в силу того, что описанный процесс изменения показателя преломления не позволял обеспечивать должный контроль параметров записи и давал слабый уровень отраженного сигнала, затухающий со временем. Однако данное открытие является ключевым в истории появления структуры в сердцевине оптического волокна, получившей название волоконной брэгговской решетки (ВБР) и являющейся основой наиболее распространенного типа ВОД. Впоследствии был предложен более совершенный способ записи ВБР через боковую поверхность оптического волокна с помощью двух пересекающихся пучков УФ-излучения [6].

ВБР представляет собой периодическое изменение показателя преломления на определенной области сердцевинного оптического волокна. Такая решетка работает как узкополосный отражающий оптический фильтр. Источник света запускает по волоконному световоду широкополосный оптический сигнал. Большая часть света проходит через решетку без отражения, и лишь в определенном узком диапазоне длин волн свет отражается от решетки. Центральная длина волны отраженного спектра пропорциональна эффективному показателю преломления сердцевинного оптического волокна в области решетки и геометрической длине периода решетки [7,8].

Помимо чувствительного элемента, брэгговская решетка находит широкое применение в качестве фильтра в каналах связи и в волоконно-оптических лазерах [9]. ВОД на основе брэгговской решетки позволяют производить измерения деформаций и температуры, а также других, «производных» параметров (давление, сила, влажность и т.д.) [7]. К точечным ВОД можно также отнести датчики Фабри-Перо, длиннопериодные решетки и др.

В отличие от точечных ВОД, где чувствительностью к изменениям деформации и температуры обладает только малая область оптического волокна, в распределённом ВОД в качестве чувствительного элемента используется вся длина оптического волокна. Таким образом, не требуется предварительного воздействия на оптическое волокно с целью изменения показателя преломления. В основе распределённых ВОД лежит измерение оптического рассеяния, возникающего в результате взаимодействия света с материалом в световоде оптического волокна. Выделяют три основных вида рассеяния, используемых в распределённых ВОД: рэлеевское (упругое), бриллюэновское и рамановское (комбинированное) рассеяния [10].

Среди распределённых ВОД наилучшим пространственным разрешением обладает метод, основанный на измерении спектрального сдвига в обратном рэлеевском рассеянии методом оптической рефлектометрии в частотной области (OFDR) с добавлением поляризационных измерений, который позволяет проводить распределённые измерения деформаций и температуры при помощи стандартного одномодового оптического волокна [11]. В настоящей диссертационной работе приводятся исследования, связанные с применением точечных ВОД на основе брэгговской решетки и распределённых ВОД на основе рэлеевского рассеяния.

Несмотря на очевидные преимущества распределённых систем измерения деформаций методом OFDR на основе рэлеевского рассеяния, данные системы значительно уступают традиционным интеррогаторам ВБР датчиков, использующим мультиплексирование по длине волны в скорости опроса датчиков (сотни Гц против нескольких кГц) [12].

В контексте практического использования любого типа чувствительных элементов и, в частности ВОД, следует подчеркнуть особую важность обеспечения точности измерений и валидации результатов. В работе [13] на примере испытаний на усталость и рост трещины приводятся результаты демонстрирующие, что измерения деформаций, проводимые с помощью распределённых ВОД на основе рэлеевского рассеяния находятся в хорошем соответствии с показаниями точечных ВБР датчиков и классических тензорезисторных датчиков (Electrical Strain Gauge,

ESG) в зонах с умеренным градиентом деформаций. Измерение деформаций в областях с высоким градиентом деформаций с помощью распределённых ВОД осложнено и может приводить к потере информации в силу сложности кросс-корреляционного анализа. В работе [14] предложен подход по калибровке показаний распределённых ВОД по показаниям конечного числа точечных ВБР датчиков. Как правило, сравнение точечных и распределённых ВОД проводится на разных оптических волокнах, расположенных вблизи друг друга, но не в одном месте, в результате чего напряженно-деформированное состояние (НДС) в области расположения сравниваемых датчиков может отличаться. Более достоверным было бы сравнение двух измерительных систем на одном оптическом волокне, обеспечивающем полное соответствие НДС в области расположения ВОД. В работе [15] исследуется точность измерения деформаций точечными ВОД на основе ВБР и распределёнными ВОД на основе рэлеевского рассеяния при помощи калибровочных экспериментов на балке равного сопротивления. Помимо ВОД в эксперименте задействованы традиционные тензорезистивные датчики. Результаты исследования говорят о высоком уровне соответствия показаний всех чувствительных элементов и находятся в пределах 5% погрешности относительно результатов численного моделирования методом конечных элементов. При этом ВОД демонстрируют линейное поведение в процессе нагружения и разгрузки и более высокую стабильность показаний по сравнению с тензорезисторами при циклическом нагружении.

ВОД имеют ряд преимуществ по сравнению с другими датчиками: они 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 [10,16].

Малые размеры оптического волокна позволяют фиксировать ВОД как на поверхности конструкции, так и внедрять их в структуру материала, открывая возможности по регистрации механического состояния на этапе изготовления [17–20]. ВОД находят применение в аэрокосмической [12,21,22], геотехнической [23–

25], строительной [26–29] и других областях [30]. Стоит отметить рост числа исследований связанных с применением ВОД в области медицины, обусловленный высокой чувствительностью данных датчиков [31–33] и разработкам в области определения изогнутой формы оптического волокна [34–36] с использованием нескольких коаксиальных оптоволокон или многосердцевинных оптических волокон [37–39].

Исследования по применению встраиваемых ВОД достигли наибольшего прогресса в авиационной промышленности, что напрямую связано с постоянным увеличением доли использования полимерных композитных материалов (ПКМ) в конструкциях летательных аппаратов. Если самолеты Boeing 777 и Airbus 380 состояли из композитных материалов на 12% и 25%, соответственно, доля использования композитов в Boeing 787 Dreamliner и Airbus A350XWB по приблизительным оценкам достигает 50% [40–42]. При производстве отечественного среднемагистрального узкофюзеляжного самолета МС-21 доля композитных материалов составляет 30% [43].

Потенциал использования ВОД охватывает широкий диапазон компонентов авиационных конструкций. Ведутся исследования по применению ВОД в качестве чувствительного элемента системы защиты летательных аппаратов от обледенения [44], системы мониторинга механического состояния шасси, в которой применяются как одиночные ВБР, так и розетки из точечных ВОД на основе ВБР [45,46]. Крыло самолета является одним из ключевых конструктивных элементов в авиационной промышленности, где активно изучается потенциал применения ВОД: для контроля прогиба лонжерона крыла [47], мониторинга деформированной формы и нагрузок, действующих на крыло [48–50]. В статье [51] описывается использование ВОД на брэгговских решетках для измерения динамических деформаций при испытаниях крыла в аэродинамической трубе. При стендовых испытаниях наблюдалась хорошая сходимость трех систем датчиков: ВОД, электрических тензодатчиков и пьезоэлектрических датчиков. Авторами работы [52] были представлены и обобщены экспериментальные результаты, полученные с датчиков, встроенных в композитные элементы вертолета. Приведены результаты



показаний ВОД при динамической нагрузке испытательного образца вертолетного лонжерона с дефектом в виде расслоения. Работы [53] и [54] представляют особый интерес, так как в них показано применение ВОД для регистрации деформированного состояния крыла в естественных условиях полета — на беспилотном летательном аппарате и на среднемагистральном пассажирском самолете.

Перспективным является направление разработки смарт-материалов или «умных материалов» и конструкций, обладающих не только возможностью регистрации своего механического состояния с помощью датчиков, но и способностью изменять свои свойства под действием внешних факторов. Для реализации данной концепции необходимо совместное использование датчиков и актуаторов. Одним из вариантов данной концепции является система активной волновой диагностики повреждений, особенно актуальная для композитных материалов, для которых свойственно образование внутренних визуально неразличимых повреждений при низкоэнергетических ударах [55–59]. В таких системах генерация волн осуществляется с помощью пьезоэлементов, а регистрация отклика конструкции после отражения волны от дефекта производится с помощью сети ВОД на основе ВБР [60–62].

Наблюдается интерес к созданию умных композитов с применением сплавов с памятью формы в качестве актуаторов, позволяющих контролировать геометрию и жесткость конструкции. Комбинирование возможностей данных материалов с измерением деформированной формы конструкции с помощью точечных и распределённых ВОД позволяет реализовать концепцию адаптивного крыла и других подобных конструктивных элементов [63,64].

Внедрение оптических волокон в структуру ПКМ открывает принципиально новые возможности для контроля состояния конструкций в процессе их эксплуатации. Тем не менее, при использовании ВОД на брэгговских решётках, встроенных в ПКМ, возникает ряд проблем. Одна из них связана с анализом перераспределения напряжённо-деформированного состояния, вызванного встраиванием в материал оптического волокна. В качестве примера можно

рассмотреть работу [65], в которой аналитическими методами исследуются напряжения и деформации в окрестности оптического волокна при изотропных свойствах композиционного материала.

Можно выделить цикл работ, в которых экспериментальными и численными методами анализируется геометрия смоляного кармана, которая является одним из ключевых факторов, определяющих перераспределение напряжений при встраивании оптического волокна в ПКМ. В одной из первых работ, где уделяется внимание данному вопросу [66] рассмотрен алгоритм минимизации полной потенциальной энергии с неизвестным распределением сил в слоях ПКМ и неизвестной длиной смоляного кармана. Результатом расчётов является оценка геометрии смоляного кармана в зависимости от последовательности укладки слоёв, давления при изготовлении и диаметра оптического волокна. Результаты численного анализа находятся в хорошем согласовании с экспериментальными наблюдениями. В [67] приведены результаты конечно-элементного моделирования геометрии смоляного кармана, окружающего оптическое волокно в однонаправленных композиционных материалах на основе препрегов, при расположении оптического волокна перпендикулярно армирующим волокнам. Результаты численного моделирования подтверждаются изображениями срезов образцов однонаправленных композиционных материалов со встроенным оптическим волокном. На основе экспериментальных данных в работе [68] даётся оценка геометрических размеров смоляного кармана в слоистом композиционном материале с однонаправленным армированием и оптическим волокном, встроенным перпендикулярно направлению армирования. В частности приводится, что длина смоляного кармана может в 16 раз превышать диаметр волокна. Представляет интерес работа [69], в которой приводятся экспериментальные данные о форме смоляного кармана при расположении оптического волокна под различными углами к направлению армирующих волокон. Отмечается, что при нулевом угле смоляной карман отсутствует, при  $90^\circ$  он близок к классической симметричной форме, а при других углах наблюдаются отличия в размерах смоляного кармана и нарушение его симметрии.

В обзорной работе [70] отмечается, что внедрение оптического волокна в ПКМ неизбежно приводит к концентрации напряжений и деформаций вокруг датчиков. В [65] рассмотрена задача о плоско-деформированном состоянии для оптического волокна, встроенного в однородный трансверсально-изотропный материал. Полученные результаты могут быть полезны при тестировании численных алгоритмов. Одним из примеров приложения численных методов для оценки напряжённого состояния в окрестности оптического волокна является работа [68], в которой рассматривается слоистый композиционный материал с однонаправленным армированием и оптическим волокном, встроенным перпендикулярно армирующим волокнам и окружённым смоляным карманом, имеющим классическую форму в виде глаза. При численном моделировании материал рассматривается как однородная среда. Отмечается, что при нагружении вдоль армирующих волокон имеет место концентрация напряжений в устье смоляного кармана. Приводятся результаты, имитирующие разрушение в рамках критерия максимальных напряжений. Следует отметить, что приведённые результаты применимы только для композитов с одним направлением армирования. С точки зрения моделирования практически идентичная задача с аналогичными выводами рассмотрена в [71,72] для ПКМ с микрососудными каналами. Отличие от предыдущей работы состоит в том, что вместо оптического волокна имеется полость, незаполненная материалом. В работе [73] рассмотрена задача определения поля перемещений для образцов из композиционного материала на основе углеродных волокон со встроенным волокном. Наличие смоляного кармана не рассматривается. Отмечается наличие больших градиентов деформаций.

Представляет интерес сравнительный анализ конечно-элементных результатов и экспериментальных данных на основе муаровой интерферометрии, показывающий количественное согласование между экспериментом и расчётом. Численное моделирование позволило [74] определить оптимальные свойства покрытия для датчиков, минимизирующие уровень концентрации напряжений вокруг датчиков. Примером исследования о влиянии внедрения оптических

волокон в материал является работа [75], в которой даётся оценка изменения механических свойств при статическом деформировании углепластикового композита, произведённого по препреговой технологии. В обзоре следует отметить работу [76], в которой оценивается влияние встроенных оптических волокон на механические характеристики композита при различных видах механических испытаний: ударных, статических испытаний на изгиб и усталостных испытаний. Приведённые данные представляют ценность для интерпретации численных результатов.

При использовании встроенных ВОД возникает ряд наиболее сложных проблем, связанных с оценкой и поиском вариантов обеспечения достоверности значений деформаций, вычисленных на основе регистрируемой датчиком физической величины — резонансной длины волны отраженного сигнала. Основная суть проблемы состоит в том, что известные соотношения между сдвигом резонансной длины волны отраженного сигнала и компонентами тензора деформаций в зоне брэгговской решетки имеют единственное решение относительно значения деформации вдоль волокна только при условии одноосного напряженного состояния в оптическом волокне. Во встроенном в материал оптическом волокне, как правило, имеет место сложноподвиженное состояние. Для обоснованного использования ВОД необходимо обеспечить совпадение деформаций вдоль оптического волокна в материале и в зоне брэгговской решётки. В [77] рассматриваются особенности передачи деформации от материала к оптоволоконному датчику, встроенному в данный материал. Приводятся экспериментальные данные демонстрирующие, что при определенных типах нагружения наблюдаются сильные эффекты двойного лучепреломления. Показано, что передача деформаций зависит от механических свойств как принимающего материала, так и датчика, от укладки композитного материала и положения датчика в определенном слое. В [78] представлен всесторонний обзор проблемы передачи деформаций для распределённых ВОД, внедрённых в материал. Обсуждаются фундаментальные механизмы передачи деформаций

между конструкцией и оптическим волокном, аналитические модели и решения для произвольных полей деформаций, а также факторы, влияющие на эффективность передачи деформаций, такие как материалы датчиков и способы их размещения. Авторы подчеркивают, что в отличие от точечных датчиков, распределённые ВОД требуют учета изменяющегося распределения деформации вдоль длины волокна. Рассматриваются последние достижения в методах обратного анализа для определения фактического поля деформаций в конструкции по результатам измерений распределённых ВОД.

В обзорной работе [79] отмечается, что встроенная ВБР находится в условиях сложнонапряжённого состояния и, следовательно, необходимо вводить калибровочные коэффициенты для соответствующих деформаций. Известные исследования показывают, что калибровку поперечных деформаций трудно контролировать, и что сдвиги резонансных длин волн трудно связать с возникающими деформациями. Проблемы калибровки подробно рассматриваются в работах [12,80]. В работе [81] отмечается, что при значительных радиальных деформациях показания встроенных ВБР существенно отклоняются от фактических деформаций в материале. Отмечается, что после встраивания в материал каждый датчик должен быть откалиброван или для встроенного датчика должен иметь место тензор деформаций с преобладающей по величине компонентой вдоль оси волокна.

Отраженный оптический спектр ВБР демонстрирует зависимость как от продольных деформаций, так и от поперечных, а также от распределения деформаций вдоль длины датчика [82,83]. Известно, что наличие значительных поперечных деформаций приводит к изменению формы спектра, его раздвоению. Помимо потенциального источника погрешности измерений, данная особенность может быть использована для одновременного измерения продольных и поперечных деформаций [84,85]. Чтобы исключить влияние поперечных деформаций на показания ВОД, внедрённого в композитный материал, авторы работы [86] используют капилляр в области расположения брэгговской решетки. Данная схема приводит к одноосному напряженному состоянию в области решетки

и взаимосвязи между продольной и поперечными компонентами тензора деформаций через коэффициент Пуассона. Для того, чтобы обеспечить чувствительность ВБР к сжимающим деформациям проводится предварительное натяжение оптического волокна. Заключение брэгговской решетки в капилляр обеспечивает сохранение единственного пика на отраженном спектре после осуществления технологического процесса производства композитного материала. Демонстрируются результаты измерений поля деформаций в углепластиковых образцах.

В качестве конструктивных решений в работах [87,88], для получения достоверной информации о продольной и поперечных компонентах тензора деформации, предлагается использование пары микроструктурированных оптических волокон с ВБР, определённым образом ориентированных относительно друг друга. Приводятся аналитическая и численная модели датчика, которые экспериментально апробированы на слоистых композитах.

Еще одним примером использования капилляра в области расположения брэгговской решетки является работа [89], в которой капилляр необходим для увеличения температурной чувствительности ВОД. Авторы демонстрируют применимость предложенного подхода на различных ВБР, заключенных в капилляр из цинка с разными материалами связующего. Примером использования передаточной матрицы является работа [90], в которой приводятся результаты на основе численных и экспериментальных данных. Демонстрируется важность перевода измеренных деформаций в реальные деформации материала контролируемого объекта, которые могут значительно различаться друг от друга.

Еще одним важным фактором, влияющим на форму отраженного спектра ВБР является наличие градиента деформаций вдоль длины решетки. В работе [91] с помощью численного моделирования спектра ВБР на основе теории связанных мод продемонстрировано влияние градиента деформаций на форму спектра ВБР, заключающееся в его уширении с ростом градиента. В [92] проведен анализ эффективности различных алгоритмов определения сдвига отраженного спектра ВБР. Рассмотрены разные сценарии изменения формы спектра ВБР.

Экспериментальное исследование отраженных спектров ВБР длиной 2, 5, 10 мм, записанных с помощью фазовой маски находящихся в условиях градиента деформаций приведено в работе [83]. Авторы делают вывод об увеличении ширины спектра при росте градиента деформаций и возможности снизить влияние градиента деформаций с помощью использования ВБР меньшей длины. Результаты измерений деформаций композитного элемента парусной лодки при изгибе с помощью внедрённых ВБР приведены в работе [93]. Авторы связывают наблюдаемую погрешность измерений ВБР датчиками с наличием градиента деформаций вдоль ВБР длиной 10 мм.

Градиент деформаций в зоне расположения ВБР может возникать как в результате особенностей геометрии конструкции или наличия дефектов, например в виде трещин [94], так и вследствие особенностей структуры материала. Наиболее ярко влияние структуры материала на возникновение локальных неоднородностей деформаций проявляется для композитных материалов. В работе [82] исследуется влияние неоднородного распределения деформаций в композитном материале с саржевым плетением на отраженный спектр ВБР разной длины. Неоднородное поле деформаций, возникающее за счет особенностей структуры материала, измерялось с помощью метода цифровой корреляции изображений. Показано, что форма отраженного спектра ВБР длиной 1 мм мало зависит от градиента деформаций в единичной ячейке материала, однако показания такой ВБР являются локальными и не отражают осредненной картины деформаций материала. Увеличение длины ВБР позволяет получить усредненные показания деформаций материала, тем не менее для таких датчиков более ярко сказывается наличие неоднородного распределения деформаций вдоль длины решетки.

При наличии градиентов деформаций, вызванных структурными неоднородностями и трёхмерного характером деформаций в зоне брэгговской решетки, отражённый спектр не всегда содержит отчётливые пики, и происходит расширение полосы отражения, что приводит к погрешностям при вычислении деформаций на основе регистрируемых физических величин [95]. В работе [96] описана методика определения распределения деформаций, основанная на

результатах измерения отраженного оптического спектра ВБР. Разработанная методика позволяет рассчитывать влияние полей деформаций на спектры отражения брэгговских решеток. Авторами работы [97] этот метод был проверен экспериментально и усовершенствован для приложений с высокими градиентами деформаций. В статье [98] обсуждается погрешность измерений распределённых ВОД, основанных на бриллюэновской оптической рефлектометрии во временной области. Показана взаимосвязь между градиентом деформаций и погрешностью их измерения. Предлагается метод секционного сдвига для минимизации погрешности. Результаты лабораторных исследований показывают, что метод позволяет снизить погрешность измерения деформаций на ~50% при наличии большого градиента деформации. При использовании приклеенных к поверхности исследуемого объекта распределённых ВОД отмечается влияние на точность результатов измерения сочетания свойств клея и защитного покрытия [99]. Аналогичные исследования были выполнены в [100] при измерении деформаций распределёнными ВОД с полиамидным покрытием, встроенными в железобетонные балки и приклеенными к поверхности бетона. В результате исследований предложено крепить датчики к арматурным стержням с помощью цианоакрилатного клея.

Создание систем мониторинга на основе ВОД, внедрённых в конструкцию, для регистрации процесса дефектообразования в материалах, позволяет осуществлять своевременный контроль их целостности [101,102]. Эти исследования основаны на анализе изменения формы спектра отражённого сигнала при появлении и развитии дефекта. Однако следует отметить, что такой подход может быть реализован только при расположении датчика в зоне дефекта. Кроме этого, даже при расположении датчика в зоне дефекта, заключение о появлении дефекта только на основе информации о величине деформации не является достоверным, так как эти изменения могут быть следствием как появления дефектов, так и изменений внешних воздействий на объект мониторинга. Наиболее перспективным направлением для анализа дефектов на основе значений деформаций является использование результатов измерений конечным числом



датчиков. Один из вариантов таких методов представлен в работе [103]. Используя численный алгоритм, который выстраивает эталонную структуру, состоящую из серии корреляций между деформациями, измеренными в различных точках, можно увидеть изменения в композиционном материале. Именно изменения эталонной структуры характеризуют в этом методе изменения в композиционном материале. Метод апробирован на экспериментальном образце с внесенными повреждениями.

Анализ литературы позволяет сделать заключение о новых уникальных возможностях при измерении деформаций ВОД, в частности датчиками, встроенными в материалы на технологических этапах их изготовления. Однако результаты, представленные в работах двух последних десятилетий, не дают полных ответов на приведенные в обзоре проблемы. Актуальность выбранной темы обусловлена необходимостью комплексного исследования методами механики деформируемого твёрдого тела задач, результаты решения которых обеспечат обоснованное использование ВОД деформаций.

**Цели и задачи.** Целью работы является развитие методов и оценка результатов измерения деформаций точечными и распределёнными 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 распределённых 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 решётках и распределёнными 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 напряжённно-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 решётках, 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 распределённых 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 решётках и ВОД на основе обратного рэлеевского рассеяния с использованием интеррогаторов ASTRO A322 и HYPERION si255 и рефлектометра обратного рассеяния OBR 4600.

**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.

**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 и практическая значимость:** Теоретическая значимость заключается в разработке моделей, алгоритмов и методик, обеспечивающих оценку напряжённого 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 решётках и распределёнными 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 напряжённно-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 решётках, 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 распределённых ВОД на основе рэлеевского рассеяния.

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

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

#### **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 распределёнными ВОД, расположенными на одном оптическом волокне; численного моделирования напряжённо-деформированного состояния (НДС) в окрестности оптического волокна, встроенного в ПКМ; численной оценки погрешности измерения деформаций ВОД на брэгговских решётках и розетками из этих датчиков, встроенными в материал или фиксированными на его поверхности клеевым соединением; рекомендации по выбору параметров распределённых 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.

# ГЛАВА 1. ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ТОЧЕЧНЫМИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

Волоконно-оптические датчики обладают чувствительностью к изменению деформаций и/или температуры, а также к связанным с ними физическим величинам (давление, сила, перемещение и т. д.) на определенном участке оптического волокна или на протяжении всего тестируемого волокна. В зависимости от размера чувствительной зоны ВОД принято разделять на точечные и распределённые.

## 1.1. Измерение деформаций точечными ВОД на основе брэгговских решёток

Для изготовления точечных ВОД оптическое волокно подвергается предварительному воздействию на участке, где должен располагаться чувствительный элемент. Например, для записи волоконной брэгговской решётки, которая является наиболее распространённым точечным ВОД для измерения деформаций, с помощью лазерного излучения формируется периодическое изменение показателя преломления на участке сердцевины оптического волокна. В общем случае распределение показателя преломления в зоне решётки может быть описано следующим соотношением [104]:

$$n(z) = n_0 + \Delta n_{uv}(z) = n_0 + \left( f(z) \Delta n_{ac} \left( \cos \frac{2\pi}{\Lambda_0} z + \phi(z) \right) + \Delta n_{dc} \right),$$

где  $n_0$  — показатель преломления сердцевины оптического волокна вне зоны ВБР;  $f(z)$  — функция аподизации, зависящая от продольной координаты  $z$  вдоль оптического волокна;

$\Delta n_{ac}$  — амплитуда модуляции показателя преломления, которая определяет размах изменения показателя преломления в области решётки;

$\Lambda_0$  — период решётки;

$\phi(z)$  — функция чирпирования, описывающая неоднородное распределение периода решётки вдоль длины оптического волокна;

$\Delta n_{dc}$  — среднее изменение показателя преломления, определяющее глобальный сдвиг показателя преломления в области решётки относительно исходного показателя преломления вне области решетки.

Брэгговская решётка работает как узкополосный отражающий оптический фильтр. Источник света запускает по волоконному световоду широкополосный оптический сигнал. Большая часть света проходит через решётку без отражения, и лишь в определенном узком диапазоне длин волн свет отражается от решётки (Рисунок 1.1). Резонансная (брэгговская) длина волны  $\lambda_B$  отраженного сигнала пропорциональна эффективному показателю преломления сердцевины оптического волокна в области решётки  $n$  и геометрической длине периода решётки  $\Lambda$ .

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1.1)$$

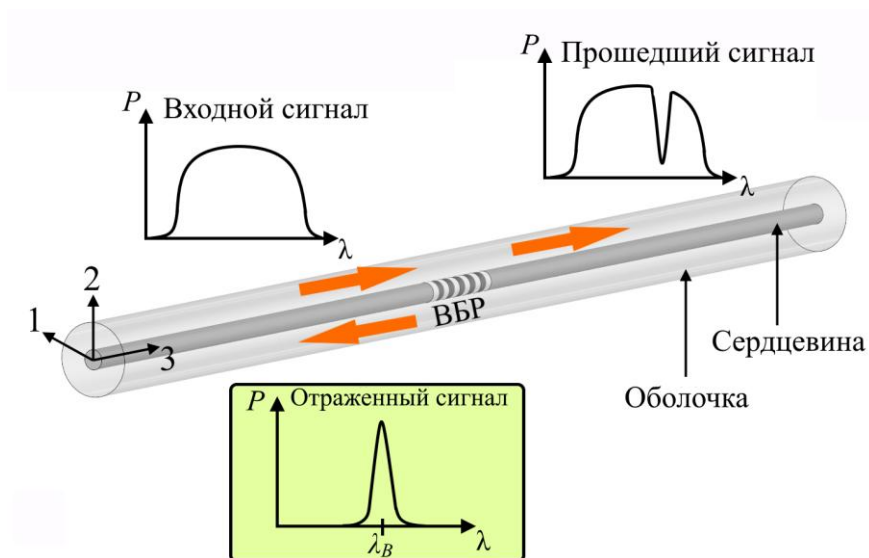


Рисунок 1.1 — Принцип работы ВБР

В общем случае брэгговская длина волны зависит от механических напряжений и температуры, так как оба множителя в уравнении (1.1) зависят от этих параметров. Таким образом, сдвиг или приращение резонансной длины волны относительно исходного состояния можно записать в следующем виде [8]:

$$\Delta\lambda_B(\sigma, T) = \left[ \frac{\partial\lambda_B}{\partial\sigma} \right]_T \Delta\sigma + \left[ \frac{\partial\lambda_B}{\partial T} \right]_{\sigma} \Delta T, \quad (1.2)$$

где первое слагаемое соответствует изменению резонансной длины волны при приращении механических напряжений  $\Delta\sigma$  и постоянной температуре, а второе, при изменении температуры  $\Delta T$  и постоянном уровне механических напряжений.

Для изотермического случая второе слагаемое можно опустить. Подставляя (1.1) в (1.2) и учитывая, что от механических напряжений зависит как эффективный показатель преломления  $n$ , так и период брэгговской решётки  $\Lambda$ , и переходя от напряжений к деформациям с учётом того, что относительное изменение периода ВБР соответствует осевой деформации  $\varepsilon_3$  получаем:

$$\Delta\lambda_B = \left[ 2n \left( \frac{\partial\Lambda}{\partial\sigma} \right) + 2\Lambda \left( \frac{\partial n}{\partial\sigma} \right) \right] \Delta\sigma = 2n\Lambda \left[ \frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} + \left( \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial\varepsilon} \frac{\partial\varepsilon}{\partial\sigma} \right) \Delta\sigma \right] = \lambda_B \left[ \varepsilon_3 + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial\varepsilon} \Delta\varepsilon \right] \quad (1.3)$$

В соответствии с теорией фотоупругости приложение механических деформаций вызывает изменение показателя преломления материала [102]:

$$\Delta \left( \frac{1}{n_i^2} \right) = p_{ij} \varepsilon_j, \quad (i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

При этом:

$$\frac{\partial n}{\partial\varepsilon} \Delta\varepsilon = \Delta n$$

Покомпонентная запись данного уравнения выглядит следующим образом:

$$\Delta n_i = -\frac{n_i^3}{2} p_{ij} \varepsilon_j, \quad (1.4)$$

где  $p_{ij}$  — компоненты тензора фотоупругости.



Для изотропного материала тензор фотоупругости содержит две независимые компоненты  $p_{11}$  и  $p_{12}$ .

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(p_{11} - p_{12})}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(p_{11} - p_{12})}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(p_{11} - p_{12})}{2} \end{bmatrix}$$

Подстановка уравнения (1.4) в уравнение (1.3) позволяет выразить зависимость сдвига резонансной длины волны от компонент тензора деформаций для двух независимых направлений поляризации в плоскости перпендикулярной продольной оси оптического волокна соотношениями:

$$\frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_B} = \varepsilon_3 - \frac{n_i^2}{2} p_{ij} \varepsilon_j$$

или

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_B} &= \varepsilon_3 - \frac{1}{2} n_1^2 (p_{11} \varepsilon_1 + p_{12} (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)) \\ \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_B} &= \varepsilon_3 - \frac{1}{2} n_2^2 (p_{11} \varepsilon_2 + p_{12} (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)) \end{aligned} \quad (1.5)$$

где  $\varepsilon_3$  — главная деформация вдоль оптического волокна;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  — главные деформации в плоскости перпендикулярной оптическому волокну;

$\Delta\lambda_1 = \lambda_1 - \lambda_B$ ,  $\Delta\lambda_2 = \lambda_2 - \lambda_B$  — разница величин резонансных длин волн отраженного спектра в текущий  $\lambda_1, \lambda_2$  и отсчётный  $\lambda_B$  моменты времени;

$p_{11}, p_{12}$  — коэффициенты фотоупругости.

Стоит отметить, что для случая двулучепреломляющего оптического волокна  $n_1 \neq n_2$ . В противном случае, для оптически изотропного материала  $n_1 = n_2 = n$ .

В настоящей работе рассматривается изначально оптически изотропное кварцевое оптическое волокно с параметрами  $n = 1.458$ ,  $p_{11} = 0.113$ ,  $p_{12} = 0.252$  [102].

Наиболее распространено использование соотношений связи резонансной длины волны с компонентами тензора деформаций для случая одноосного напряженного состояния, при котором  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\nu\varepsilon_3$ , где  $\nu$  — коэффициент Пуассона оптического волокна. В этом случае  $\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2 = \Delta\lambda$  и вместо двух уравнений с тремя неизвестными, получается одно уравнение с одной неизвестной  $\varepsilon_3$ :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = \left( 1 - \frac{n^2}{2} (p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})) \right) \varepsilon_3 \quad (1.6)$$

или

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{k} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_B}$$

Для используемых кварцевых оптических волокон  $k = 0.78$ .

При изменении температуры в процессе измерения деформаций необходимо учитывать ее влияние на сдвиг резонансной длины волны ВБР. Соотношение (1.6) для неизотермического случая, выглядит следующим образом:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = (\alpha + \beta)\Delta T + \left( 1 - \frac{n^2}{2} (p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})) \right) \varepsilon_3, \quad (1.7)$$

где  $\Delta T = T_1 - T_0$ ;

$T_1$  — температура в окрестности датчика в текущий момент времени;

$T_0$  — температура в окрестности датчика в отсчётный момент времени;

$\alpha$  — коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР);

$\beta$  — термооптический коэффициент.

Для измерения температурного перепада  $\Delta T = T_1 - T_0$ , может быть использован ВОД на основе ВБР, если он свободен от внешнего механического воздействия. В этом случае для определения  $\Delta T$  справедливо следующее соотношение:

$$\Delta T = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_B (\alpha + \beta)} \quad (1.8)$$

Такой датчик может быть использован для проведения температурной компенсации показаний датчика деформаций, при условии, что они находятся в одинаковых температурных условиях. В данном случае уравнение для вычисления деформации по показаниям деформационного ВОД с учетом температурной компенсации имеет вид:

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{k} \left( \frac{\Delta \lambda}{\lambda_B} - \frac{\Delta \lambda^T}{\lambda_B^T} \right), \quad (1.9)$$

где  $\Delta \lambda^T$  — разница между резонансной длиной волны ВБР в текущем  $\lambda^T$  и исходном  $\lambda_B^T$  состояниях для термокомпенсационного датчика.

Экспериментальный метод температурной компенсации предъявляет строгие требования к однородности температурного поля в окрестности расположения датчиков (как основного, так и компенсационного), что, в свою очередь, определяется скоростями изменения температурных полей в окрестности расположения датчиков. Данный метод требует использования компенсационного датчика в паре с каждым из основных ВОД, то есть в этом случае требуется удвоенное число датчиков.

Одним из преимуществ точечных ВОД на основе ВБР является возможность размещения нескольких решёток с различной резонансной длиной волны на одном оптическом волокне и проведения их одновременного опроса методом мультиплексирования по длине волны. Такой подход обеспечивает возможность регистрации деформации в разных точках конструкции при фиксации оптического волокна на ее поверхности или внедрении в структуру материала. Максимальное количество точек измерения ограничено спектральным диапазоном длин волн системы опроса ВБР датчиков (интеррогатор). Увеличение количества ВБР в оптическом волокне приводит к снижению диапазона измерения деформаций каждого датчика. Для интеррогатора со спектральным диапазоном 100 нм, оптимальное максимальное количество ВБР на один канал составляет 10–15 шт.

Данное количество ВБР в оптическом волокне обеспечивает диапазон измерения деформаций  $\pm 4140 \mu\epsilon$  при использовании 10 ВБР и  $\pm 2755 \mu\epsilon$  для каждого датчика при использовании 15 ВБР. Здесь  $1 \mu\epsilon$  (микрострейн, мкм/м) соответствует относительной деформации  $1 \times 10^{-6}$ .

## 1.2. Измерение деформаций распределёнными ВОД на основе рэлеевского рассеяния

В основе распределённых ВОД лежит измерение оптического рассеяния, возникающего в результате взаимодействия света с материалом в световоде оптического волокна. Выделяют три основных вида рассеяния: рэлеевское (упругое), бриллюэновское и рамановское (комбинированное). Рэлеевское рассеяние обусловлено рассеянием света на флуктуациях показателя преломления, вызванных различными неоднородностями, возникающими при производстве оптического волокна. Частота (длина волны) рэлеевского рассеяния совпадает с частотой вводимого оптического излучения. При этом спектр обратного рассеяния содержит дополнительные смещённые пики, обусловленные бриллюэновским и рамановским рассеяниями, вызванными, соответственно, тепловыми колебаниями плотности среды и внутримолекулярными колебаниями [105] (Рисунок 1.2).

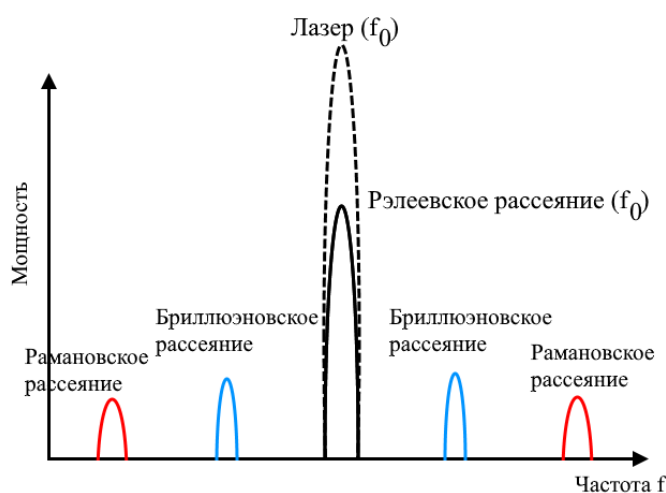


Рисунок 1.2 — Спектр рассеянного света

Рэлеевское и бриллюэновское рассеяния используются в системах распределённого измерения как деформаций, так и температуры. Системы, основанные на бриллюэновском рассеянии, обеспечивают измерения на длине оптического волокна до нескольких десятков километров, однако обладают более низким пространственным разрешением по сравнению с системами на основе рэлеевского рассеяния. Последние, в свою очередь, обеспечивают значительно более высокое пространственное разрешение, но ограничены по длине тестируемого волокна — от нескольких десятков до сотен метров. Устройства на основе рамановского рассеяния используются для распределённого измерения температуры и имеют характеристики пространственного разрешения и максимальной длины тестируемого волокна сопоставимые с устройствами на основе бриллюэновского рассеяния.

Помимо рассеяния света, вклад в формирование обратного сигнала вносят также отражения Френеля, возникающие на границах сред с различными показателями преломления — например, при изгибе оптического волокна или в местах сварного соединения при несоосности оптических волокон.

Для проведения распределённых измерений с помощью оптического волокна используются методы оптической рефлектометрии, позволяющие измерять потери на отражение (обратные оптические потери, *Return Loss*) вдоль длины оптического волокна. Обратные потери на отражение определяются как отношение мощности излучения, отражённого назад от участка оптического волокна ( $P_R$ ), к мощности излучения, вводимого в этот участок ( $P_{in}$ ) [106].

$$RL = 10 \log \left( \frac{P_R}{P_{in}} \right)$$

Среди основных методов оптической рефлектометрии можно выделить рефлектометрию во временной области (OTDR) и рефлектометрию в частотной области (OFDR). Метод рефлектометрии во временной области (OTDR) заключается во введении оптических импульсов в оптическое волокно с помощью

импульсного лазера и детектировании интенсивности отраженного и рассеянного света в зависимости от времени задержки между введенным и отраженным сигналами. Основными параметрами данного подхода являются амплитуда и ширина вводимого импульса, так как от них зависят пространственное разрешение получаемой рефлектограммы и максимальная измеряемая длина оптического волокна. Для увеличения пространственного разрешения необходимо уменьшать ширину импульса, что в свою очередь уменьшает расстояние, на котором возможно проведение измерений. Еще одним фактором, ограничивающим пространственное разрешение данного метода, является наличие мертвых зон между событиями отражения.

В методе оптической рефлектометрии в частотной области (OFDR) используется лазерный источник с перестраиваемой длиной волны и в основе измерительных систем данного метода лежит интерферометр, по двум плечам которого посылается оптический сигнал. Одно плечо является опорным, а второе, тестируемым волокном. В измерительной системе с помощью преобразования Фурье анализируется интерференционная картина, возникающая при смешивании оптических сигналов опорного и тестируемого волокна. Это позволяет получить рефлектограмму, представляющую собой распределение уровня отражённого сигнала в зависимости от расстояния вдоль тестируемого оптического волокна [107]. Данный метод обладает наилучшим пространственным разрешением, но имеет ограничения по длине тестируемого волокна.

Среди распределённых ВОД наилучшим пространственным разрешением обладает метод измерения, основанный на измерении спектрального сдвига в обратном рэлеевском рассеянии методом оптической рефлектометрии в частотной области (OFDR) с добавлением поляризационных измерений, который позволяет проводить распределённые измерения деформаций и температуры при помощи стандартного одномодового оптического волокна. Реализация данного метода представлена в рефлектометре обратного рассеяния OBR 4600 компании Luna inc. Упрощенная схема измерительной системы OBR 4600 представлена на рисунке 1.3.

OBR 4600 позволяет получать распределение амплитуды отражённого сигнала (рефлектограмма) с субмиллиметровым пространственным разрешением, на котором с высокой чувствительностью фиксируются местоположения различных отражающих событий (перегиб оптоволокна, ВБР, места соединения оптических волокон и т.д.).

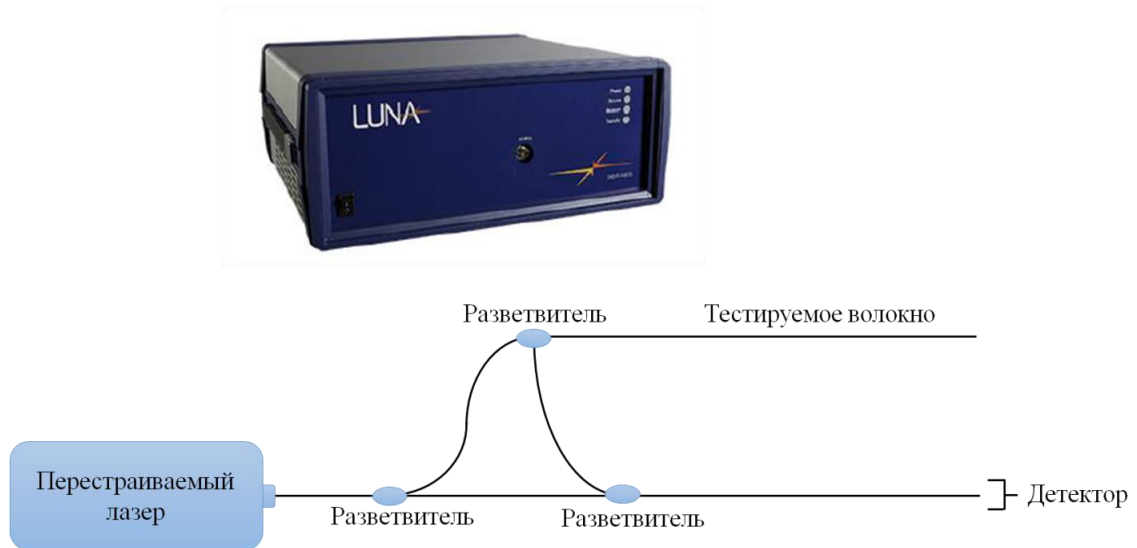


Рисунок 1.3 — Схема измерительной системы OBR 4600 [108]

Такая рефлектограмма является основой для проведения распределённых измерений деформаций и температуры. Пример рефлектограммы оптического волокна длиной 3 м, полученной с помощью OBR 4600 представлен на рисунке 1.4. На данном графике можно определить местоположение изгиба оптического волокна на расстоянии 1.2 м от начала и наличие трех ВБР, так как на данных участках возникают значительные потери на отражение. На нижнем графике представлен увеличенный вид области расположения ВБР. Высокое пространственное разрешение данного метода позволяет точно определить местоположение ВБР и длину каждой решетки.

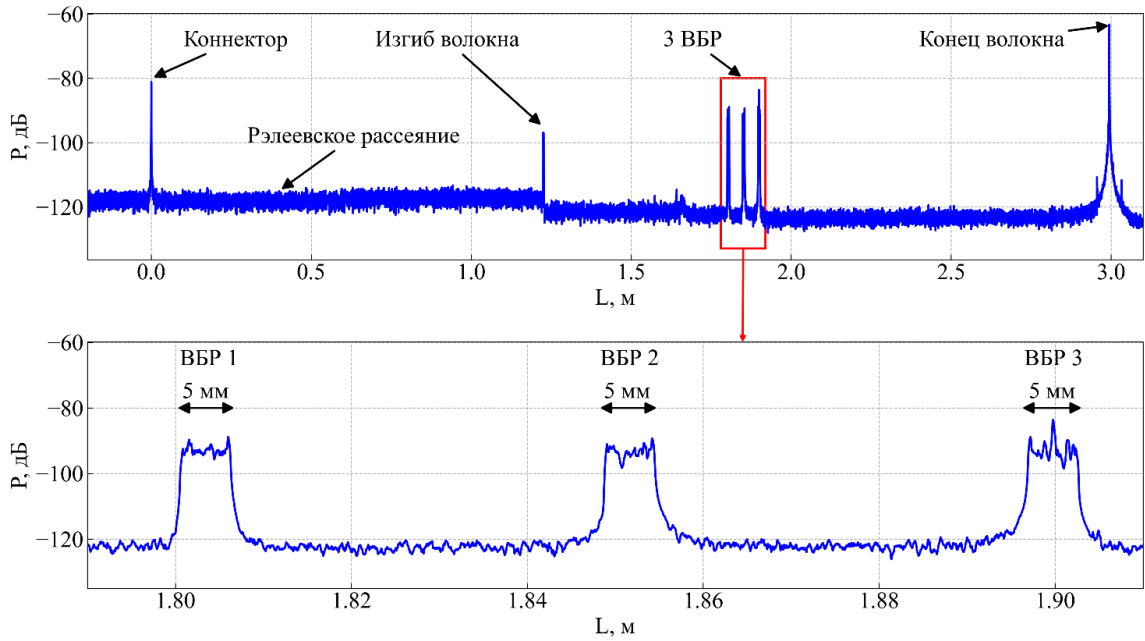


Рисунок 1.4 — Рефлектограмма оптического волокна, полученная с помощью OBR 4600

При распределённом измерении деформаций и температуры все тестируемое оптическое волокно является чувствительным элементом, в отличие от точечных волоконно-оптических датчиков, для которых чувствительностью к изменениям деформаций и температуры обладают только предварительно обработанные области оптического волокна (Рисунок 1.5).

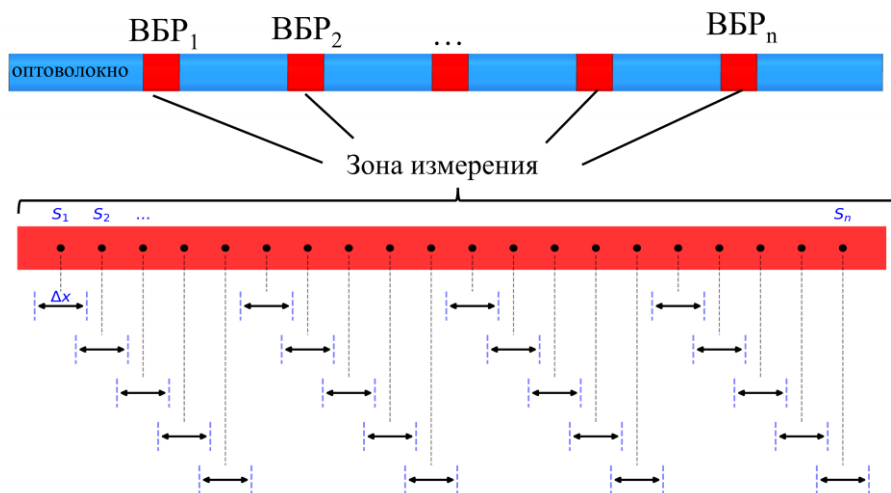


Рисунок 1.5 — Зоны измерения точечных и распределённых ВОД



Данный подход основан на том, что показатель преломления оптического волокна вдоль его длины претерпевает незначительные изменения вследствие наличия неоднородностей структуры материала. Распределение рассеяния, являясь уникальным для каждого тестируемого оптоволокна, остается постоянным от измерения к измерению при условии отсутствия внешнего воздействия. Для проведения измерений с помощью рефлектометра обратного рассеяния на рефлектограмме тестируемого оптического волокна выбирается анализируемый участок волокна. Этот участок разбивается на подобласти заданной длины (база датчика,  $\Delta x$  на рисунке 1.5) с определенным шагом (расстояние между датчиками), которые можно рассматривать как отдельные датчики. При этом подобласти могут пересекаться, а центр каждой подобласти является одной из точек на диаграмме распределённого измерения деформаций или температуры.

При внешнем воздействии на оптическое волокно (изменение деформации и/или температуры) происходит сдвиг спектра обратного рассеяния в частотной области относительно эталонного. Для вычисления деформации или температуры рассчитывается величина спектрального сдвига в анализируемом окне  $\Delta x$  относительно эталонного состояния и умножение данной величины сдвига на коэффициент деформационной или температурной чувствительности оптического волокна.

Сдвиг спектра  $\Delta \nu$  измеряемой области оптического волокна аналогичен сдвигу спектра или сдвигу резонансной длины волны  $\Delta \lambda$  брэгговской решетки и связан с изменением деформации вдоль продольной оси оптического волокна и температуры следующим образом:

$$\Delta \lambda / \lambda = -\Delta \nu / \nu = K_{\varepsilon} \varepsilon_3 + K_T \Delta T \quad (1.10)$$

где  $K_T$  и  $K_{\varepsilon}$  — температурный и деформационный коэффициенты. Для большинства оптических волокон с германосиликатной сердцевиной  $K_T = 6.45 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ ,  $K_{\varepsilon} = 0.78$ .

При постоянной деформации измеряемого участка оптического волокна изменение температуры может быть выражено:

$$\Delta T = -\frac{\bar{\lambda}}{cK_T} \Delta \nu \quad (1.11)$$

где  $\bar{\lambda}$  — центральная длина волны сканирования,  $c$  — скорость света.

Изменение деформации с учетом температурной компенсацией можно выразить:

$$\varepsilon_3 = \frac{\bar{\lambda}}{cK_\varepsilon} (\Delta \nu^T - \Delta \nu) \quad (1.12)$$

где  $\Delta \nu^T$  — спектральный сдвиг, измеренный на участке оптического волокна, не испытывающем изменение деформации и находящемся в таком же температурном поле, как и компенсируемый участок.

Актуальным является вопрос соответствия показаний точечных и распределённых ВОД. Далее приведен демонстрационный пример измерения деформаций точечным ВБР датчиком и распределённым ВОД на основе рэлеевского рассеяния при близком к однородному распределении деформаций. Для реализации данного распределения деформаций использовалась балка равного сопротивления, представленная на рисунке 1.6 с демонстрацией схемы ее нагружения. Балка изготовлена методом 3D-печати из полилактида (PLA). На поверхность балки с помощью цианоакрилатного клея нанесены две линии кварцевого оптического волокна. В работе используется одномодовое оптическое волокно SM1250(9/125)P с полиимидной оболочкой. Диаметр сердцевины составляет 9 мкм, диаметр оптоволокна — 125 мкм, толщина защитной оболочки — 12.5 мкм. Таким образом, внешний диаметр оптического волокна с оболочкой составляет 150 мкм (0.15 мм). Указанный тип волокна используется во всех последующих экспериментальных и численных исследованиях, если не оговорено иное. Одно из приклеенных оптических волокон использовалось для распределённого измерения деформаций. На втором оптическом волокне была записана ВБР длиной 5 мм на расстоянии 17 мм от заделки.

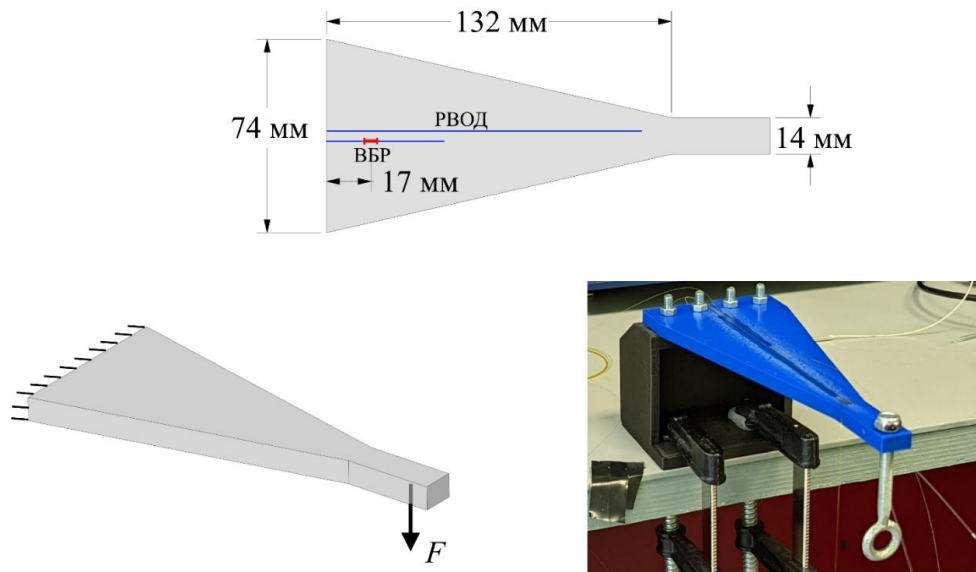


Рисунок 1.6 — Балка равного сопротивления и схема её нагружения

На рисунке 1.7 представлены результаты измерений, полученные с помощью распределённого (РВОД) и точечного ВОД при нагружении балки равного сопротивления [109].

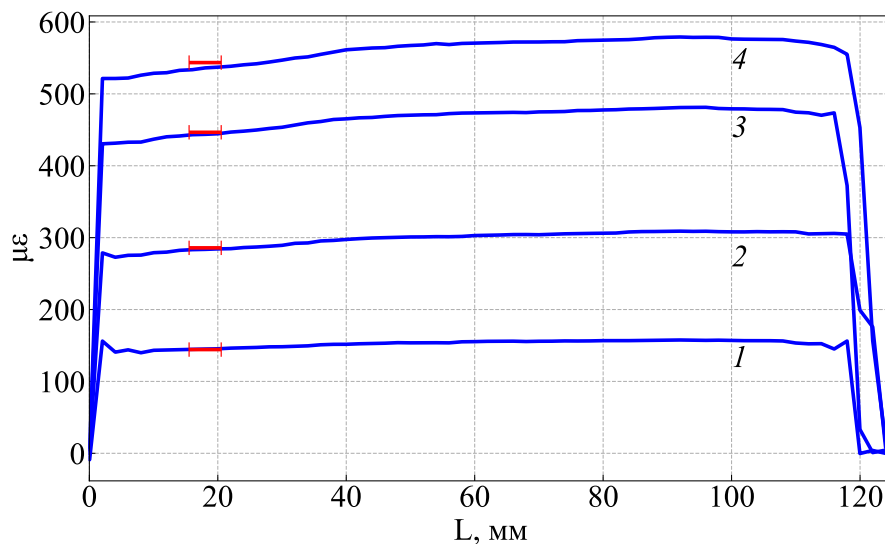


Рисунок 1.7 — Показания точечного (красная линия) и распределённого ВОД (синяя линия) при разных нагрузках: 1 – 1.67 Н, 2 – 3.2 Н, 3 – 5 Н, 4 – 6 Н

На рисунке 1.8 представлен график зависимости деформаций, измеренных точечным ВОД на основе брэгговской решетки и распределённым ВОД от нагрузки. Значения для распределённого ВОД взяты на участке расположения ВБР.

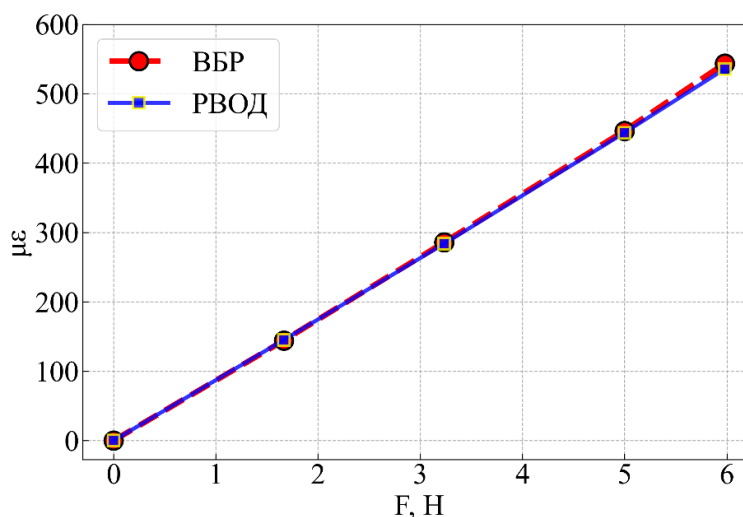


Рисунок 1.8 — Зависимость деформаций, измеренных точечным ВОД на основе брэгговской решетки (ВБР) и распределённым ВОД (РВОД) от нагрузки для балки равного сопротивления

Разница между результатами измерений, полученными с использованием двух типов датчиков, не превышает 1.5%. Распределённый ВОД обеспечил измерение деформаций с пространственным разрешением 2 мм, где каждая точка измерений вычислена на базе 10 мм.

Стоит отметить ряд особенностей, характерных для распределённых систем измерения на основе рэлеевского рассеяния:

- несмотря на очевидные преимущества распределённых систем измерения деформаций методом OFDR на основе рэлеевского рассеяния, данные системы значительно уступают традиционным анализаторам сигналов ВБР датчиков (интеррогатор) в скорости опроса датчиков (десятки Гц против нескольких кГц);

- высокая чувствительность измерительной системы к участкам оптического волокна, в которых наблюдается снижение интенсивности проходящего оптического сигнала. К таким участкам относятся изгибы волокна, зоны

сдавливания, а также некачественные сварные соединения. Проведение распределённых измерений деформаций вдоль волокна после таких участков может быть затруднено;

– высокая чувствительность измерительной системы к зоне окончания оптического волокна. Неровный или повреждённый торец может затруднять проведение распределённых измерений деформаций;

– необходимость выравнивания оптики и повторной калибровки системы измерения на эталонном оптическом волокне при переносе устройства, и значительной смене условий окружающей среды.

В таблице 1.1 представлена информация о современных приборах и приборах, используемых в настоящей работе для регистрации деформаций при помощи ВОД на брэгговских решетках и на основе обратного рэлеевского рассеяния.

Таблица 1.1 — Приборы для измерения деформаций с помощью точечных ВБР датчиков и распределённых ВОД на основе рэлеевского рассеяния

Название	Производитель	Частота опроса	Тип ВОД	Отличительные особенности
Hyperion Si255	Luna innovations	5 кГц	ВБР	До 16 измерительных каналов; статические/динамические измерения
FBG X400	FiSpec	До 200 Гц	ВБР	Компактный размер: 123×68.5×15.3 мм
SmartScan Aero Mini	Smart Fibres	До 25 кГц	ВБР	Компактный размер: 45×135×203 мм; оптимизирован для интеграции в авиационные конструкции
OBR 4600	Luna innovations	0.1–1 Гц	рэлеевское рассеяние	Макс. длина оптического волокна — 2 км; пространственное разрешение ~1 мм
Luna ODiSI 7100	Luna innovations	До 250 Гц	рэлеевское рассеяние	Максимальная длина оптического волокна — 70 м; высокая частота опроса
OSI-D	ETSC	До 100 Гц	рэлеевское рассеяние	Максимальная длина оптического волокна — 80 м; пространственное разрешение ~1 мм

Приборы, используемые в работе				
Название	Производитель	Частота опроса	Тип ВОД	Отличительные особенности
Astro A322	ООО «Инверсия-Сенсор»)	1 Гц	ВБР	До 8 измерительных каналов; высокое спектральное разрешение
Hyperion si255	Micron-optics	До 1 кГц	ВБР	До 16 измерительных каналов; статические/динамических измерения
Hyperion si255	Micron-optics	До 5 кГц	ВБР	До 16 измерительных каналов; статические/динамические измерения
OBR 4600	Luna innovations	0.1–1 Гц	рэлеевское рассеяние	Максимальная длина оптического волокна — 2 км; пространственное разрешение ~1 мм
OSI-D	ETSC	До 100 Гц	рэлеевское рассеяние	Максимальная длина оптического волокна — 80 м; пространственное разрешение ~1 мм

### **1.3. Измерение деформаций точечными и распределёнными ВОД, расположенными на одном оптическом волокне**

Использование оптического волокна с записанными ВБР для измерения деформаций дает возможность совмещения достоинств двух типов волоконно-оптических датчиков: точечных ВОД на основе ВБР, которые благодаря более высокой частоте опроса позволяют проводить измерения деформационного отклика в местах расположения ВБР при динамическом воздействии на конструкцию и распределённых ВОД, позволяющих с высоким пространственным разрешением измерять распределение деформаций при статическом нагружении конструкции.

Проведение распределённых измерений при наличии в оптическом волокне ВБР может быть затруднено в силу высокой отражательной способности рассматриваемых ВБР на длинах волн, входящих в диапазон сканирования рефлектометра обратного рассеяния.

Для иллюстрации проблем, возникающих при измерении деформаций двумя типами датчиков, расположенными на одном оптоволокне, приведены результаты экспериментов по распределённому измерению деформаций при одноосном растяжении оптического волокна с записанными в нем ВБР. Для проведения распределённых измерений деформаций на основе рэлеевского рассеяния использовался рефлектометр OBR4600 компании Luna Innovations.

Практически важен случай распределённого измерения деформаций с помощью оптического волокна со множеством записанных ВБР, так как данный вариант позволяет дополнить информацию о распределении деформаций, полученную с помощью точечных датчиков на участках в окрестности ВБР, а также оценить распределение деформаций на других участках оптического волокна.

Далее приводятся результаты эксперимента по растяжению оптического волокна, в котором два участка находятся вне зоны расположения ВБР, согласно схеме на рисунке 1.9, а один участок включает в себя пять ВБР длиной 5 мм каждая, с расстоянием между центрами 10 мм и резонансными длинами волн 1520.4, 1535.2, 1549.9, 1564.7 и 1579.9 нм соответственно.



Рисунок 1.9 — Схема нагружаемых участков оптического волокна

Важно отметить, что выбор диапазона сканирования длин волн влияет на пространственное разрешение измеряемой рефлектограммы  $\Delta z$ , а также на максимальный диапазон измерения продольных деформаций  $\varepsilon_{range}$ , в соответствии со следующими соотношениями [110]:

$$\Delta z = -\frac{c}{2n\Delta\nu} = \frac{\lambda_{start}\lambda_{end}}{2n(\lambda_{end} - \lambda_{start})},$$

$$\varepsilon_{range} = \frac{\lambda_{end} - \lambda_{start}}{\lambda},$$

где  $\lambda_{start}$  — начальная длина волны сканирования;

$\lambda_{end}$  — конечная длина волны сканирования перестраиваемого источника оптического излучения.

Таким образом, увеличение диапазона сканирования позволяет достичь более высокого пространственного разрешения рефлектограммы и обеспечить возможность измерения больших деформаций.

В связи с этим, при растяжении оптического волокна с пятью ВБР был выбран максимально возможный диапазон длин волн сканирования рефлектометра 1530–1615 нм (красная область на рисунке 1.10).

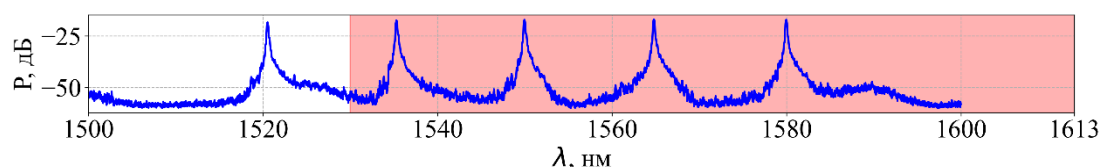


Рисунок 1.10 — Отражённые спектры ВБР в исследуемом волокне (синяя кривая) и диапазон сканирования рефлектометра обратного рассеяния (красная область)

Результат распределённого измерения деформаций для данного эксперимента представлен на рисунке 1.11.

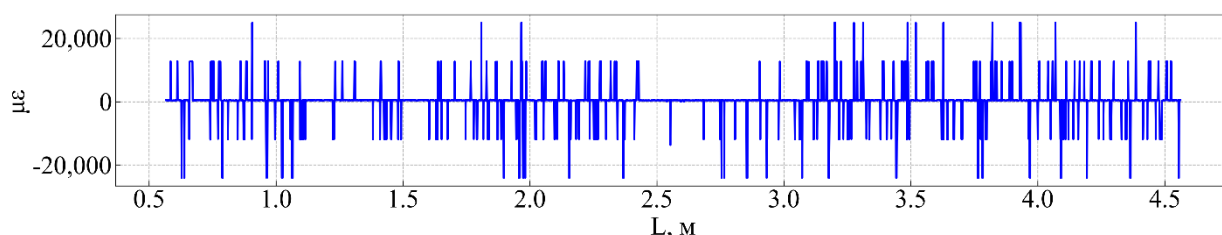


Рисунок 1.11 — Распределение деформаций вдоль оптического волокна с пятью ВБР при диапазоне сканирования, включающем резонансные длины волн ВБР

Включение резонансных длин волн в диапазон сканирования лазерного источника приводит к наличию уровня шумов в получаемом распределении деформаций, не позволяющему выделить полезный сигнал.



Выбор диапазона сканирования 1590–1613 нм, таким образом, чтобы в него не входила ни одна из резонансных длин волн ВБР, согласно схеме на рисунке 1.12, позволяет получить распределение деформаций при растяжении трех участков оптического волокна, приведенное на рисунке 1.13.

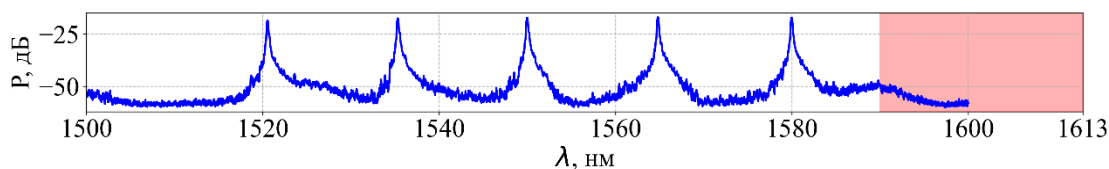


Рисунок 1.12 — Диапазон сканирования рефлектометра обратного рассеяния вне резонансных длин волн ВБР

Важно отметить, что уменьшение диапазона длин волн сканирования приводит к уменьшению диапазона измерения деформаций.

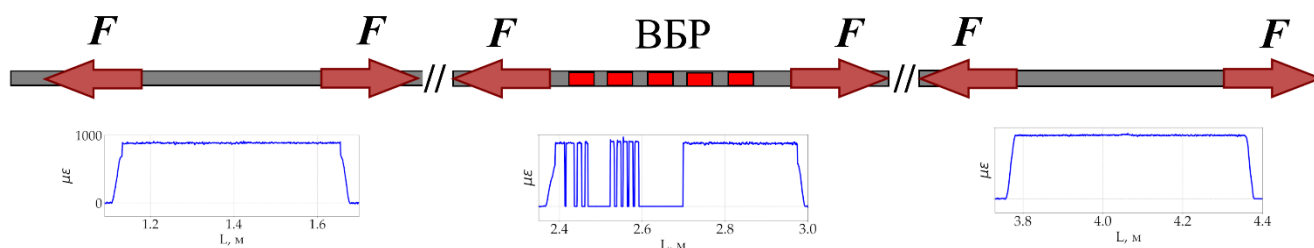


Рисунок 1.13 — Схема нагружения оптического волокна с пятью ВБР и распределение деформаций на растягиваемых участках при диапазоне сканирования рефлектометра обратного рассеяния вне резонансных длин волн ВБР

Распределение деформаций на растягиваемых участках оптического волокна не содержащих ВБР имеет ожидаемый однородный характер. Растягиваемый участок с пятью ВБР содержит нечувствительные зоны в окрестности расположения ВБР. Распределение деформаций на данном участке приведено на рисунке 1.14, где красным обозначены зоны расположения ВБР по длине оптического волокна.

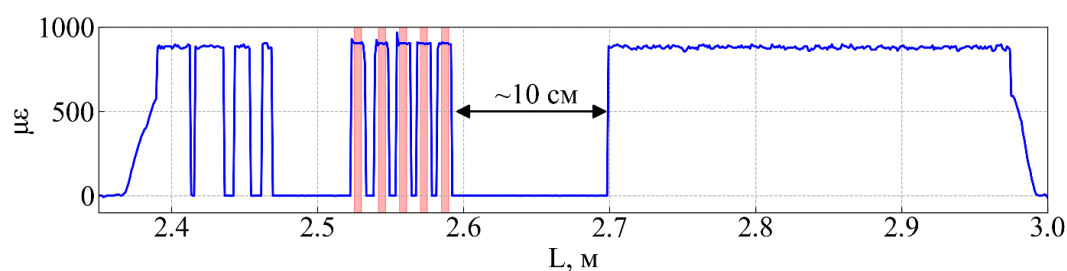


Рисунок 1.14 — Распределение деформаций на растягиваемом участке оптического волокна с пятью ВБР

Максимальная длина нечувствительной зоны составила 10 см, что в значительной степени ограничивает использование оптического волокна с записанными ВБР с рассматриваемыми оптическими характеристиками для измерения неоднородных полей деформаций.

Наличие нечувствительных зон может быть связано с расплыванием сигнала при применении быстрого преобразования Фурье (БПФ). В данном случае на рефлектограмме наблюдается значительный перепад амплитуды между участками френелевского отражения в зоне ВБР и рэлеевского рассеяния, обусловленный высокой отражательной способностью используемых ВБР (Рисунок 1.15).

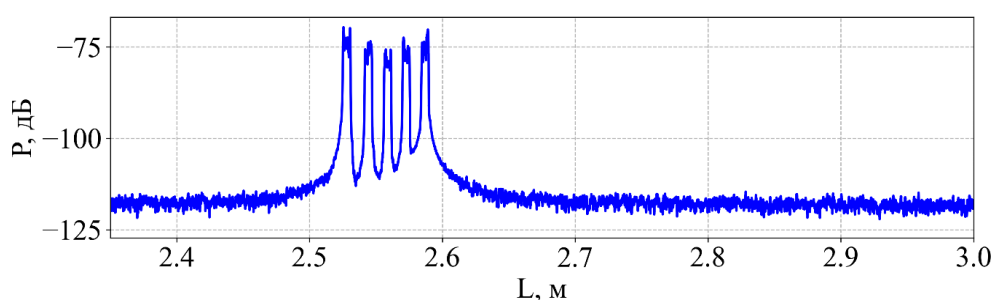


Рисунок 1.15 — Рефлектограмма растягиваемого участка оптического волокна с пятью ВБР

Известно, что применение дискретного преобразования Фурье для сигнала конечной длины приводит к возникновению спектральной утечки, которая выражается уширении спектральных пиков в частотной области. Данное явление

обусловлено тем, что ряд частот сигнала не совпадает с базисными функциями дискретного преобразования Фурье на заданном интервале измерения и вносят свой вклад на всем спектральном диапазоне. В результате спектральной утечки и уширения спектра при дискретном преобразовании Фурье, области рэлеевского рассеяния в окрестности ВБР подавляются и могут содержать нестабильный спектральный состав, затрудняющий корректное вычисление деформаций при кросс-корреляции начального и текущего сигналов.

Для подавления спектральных утечек, связанных с конечным интервалом измерения, предлагается исходный сигнал на данном интервале перед дискретным преобразованием Фурье умножить на оконную функцию, восстанавливающую непрерывность сигнала на границах измерительного интервала [111]. Одной из наиболее распространенных является оконная функция Ханна, описываемая следующим соотношением [112]:

$$w(n) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (1.13)$$

где  $n$  — номер отсчета;

$N$  — количество отсчетов.

Оконное преобразование Фурье сигнала  $x(n)$  с оконной функцией  $w(n)$ , можно записать в виде:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)w(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad 0 \leq k \leq N-1, \quad (1.14)$$

где  $X(k)$  — комплексный преобразованный сигнал, состоящий из амплитуд и фаз базисных функций.

На рисунке 1.16 продемонстрировано влияние применения оконной функции на частотный спектр сигнала, состоящего из суммы двух гармонических колебаний разной амплитуды, но с близкими частотами колебаний.

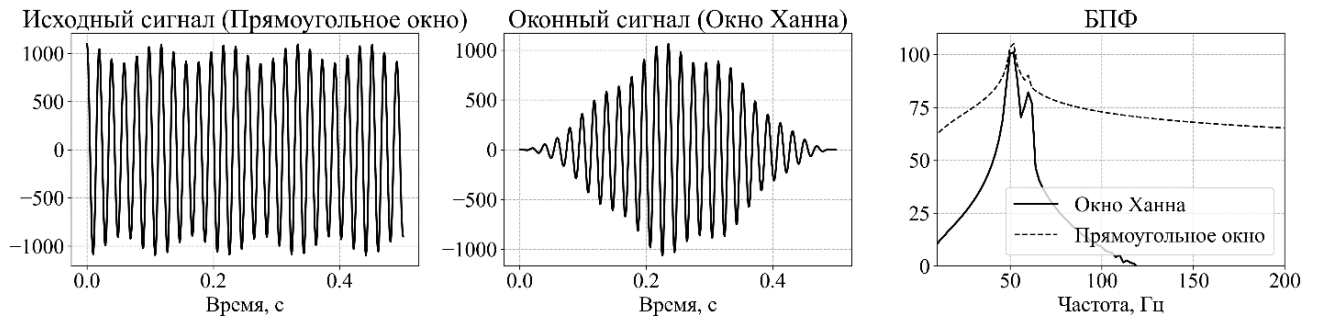


Рисунок 1.16 — Пример оконного преобразования Фурье

Использование оконной функции Ханна при измерении рефлектограммы методом оптической рефлектометрии в частотной области позволяет подавить растекание сигнала в области расположения ВБР. Рефлектограммы в области расположения ВБР, полученные без применения оконной функции (используется стандартное прямоугольное окно) и с применением приведены на рисунке 1.17. Вычисление распределения деформаций на основе рефлектограмм, полученных с помощью оконного преобразования Фурье устраняет нечувствительные зоны (Рисунок 1.18).

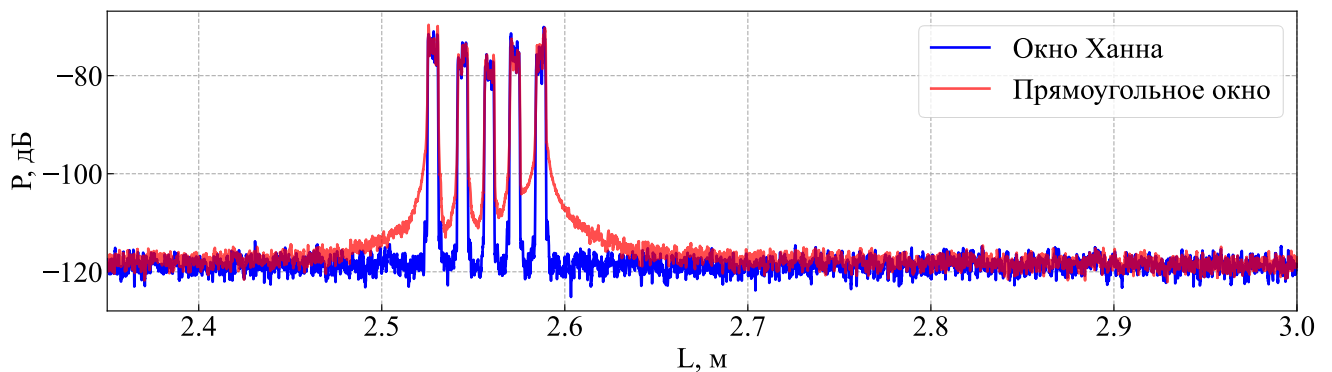


Рисунок 1.17 — Рефлектограммы участка оптического волокна с пятью ВБР, рассчитанные с использованием и без использования оконной функции Ханна

В силу подавления исходного сигнала на начальном и конечном участках интервала измерения применение оконной функции сужает диапазон

сканирования, что негативно сказывается на максимальном диапазоне измерения деформаций  $\varepsilon_{range}$ .

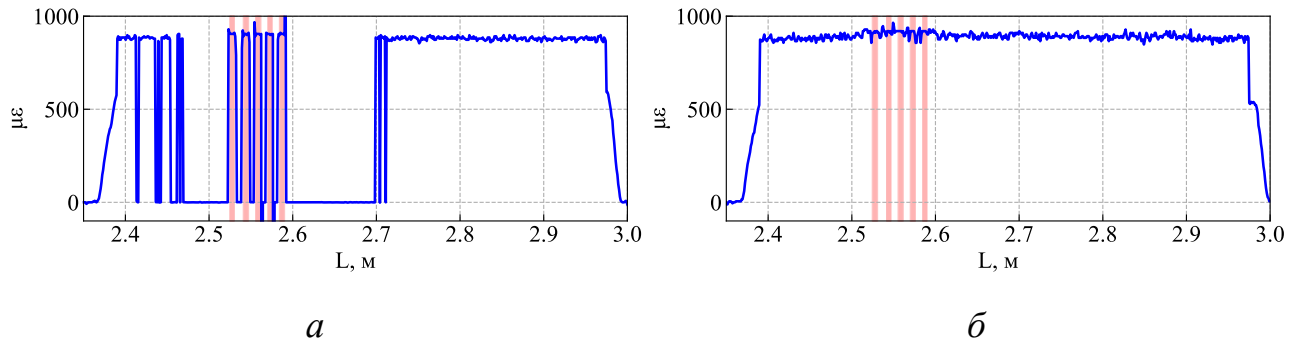


Рисунок 1.18 — Распределение деформаций, полученное на основе рефлектограмм без использования (а) и с использованием (б) оконной функции Ханна

В результате исследований по измерению деформаций с помощью распределённых ВОД на основе рэлеевского рассеяния при наличии в измерительном оптоволокне одной или нескольких ВБР с высокой отражательной способностью, затрудняющей проведение измерений на основе алгоритма кросс-корреляции текущего и отсчетного спектральных сигналов показано, что при использовании диапазона сканирования рефлектометра обратного рассеяния, в который входят резонансные длины волн ВБР, наблюдается высокий уровень шума, не позволяющий выделить полезный сигнал. Сканирование длин волн, вне резонансных длин волн ВБР позволяет устранить данный шум, однако приводит к наличию нечувствительных зон в окрестности ВБР, затрудняющих анализ распределения деформаций. Предлагаемый подход использования оконного преобразования Фурье с оконной функцией Ханна позволяет подавить растекание сигнала в окрестности ВБР и устранить наличие нечувствительных зон. В дальнейшем применение данного подхода будет продемонстрировано на примере образца с внедрённым оптическим волокном и записанными ВБР, в котором при растяжении реализуется градиентное распределение деформаций. Предлагаемый подход может быть полезен для повышения достоверности сопоставления

результатов измерения точечных и распределённых ВОД, а также для получения более подробной информации о деформационном состоянии объектов, на которых установлены точечные ВОД на основе ВБР с высокой отражательной способностью.

#### **1.4. Исследование стабильности показаний волоконно-оптических датчиков при разных температурах и влажности**

Проведено исследование стабильности показаний ВОД при различных температурах и относительной влажности воздуха в течение длительного промежутка времени (550–900 ч). Для исследования выбраны нормальный (45–55%) и повышенный уровни (85–95%) относительной влажности воздуха и уровни отрицательной и положительной температуры, при которых наиболее вероятна эксплуатация рассматриваемых ВОД.

Реализована серия экспериментов по длительному испытанию ВОД на основе брэгговских решеток при постоянном уровне растягивающей нагрузки и при разных уровнях влажности.

При проведении экспериментов использовались одномодовые германосиликатные оптические волокна. Запись волоконных брэгговских решеток производилась посредством ультрафиолетового излучения методом фазовой маски, который включает в себя снятие внешней защитной оболочки оптического волокна в области, где записывается брэгговская решетка с последующим перепокрыванием данного участка внешней поверхности оптического волокна полиимидным материалом. Используемые датчики имеют физическую длину брэгговской решетки 5 мм, коэффициент отражения 75–80% и ширину пика отраженного спектра  $0.25 \pm 0.03$  нм. В каждом из описанных в работе экспериментов использовались уникальные ВБР. Приложение внешней нагрузки к оптическому волокну с ВБР осуществлялось при помощи крепления груза соответствующей массы. В качестве груза использовались стальные цилиндры.

Рассматривались два уровня постоянной нагрузки, составляющие 50% (6 Н) и 70% (8.4 Н) от предельной нагрузки оптического волокна с защитной оболочкой и записанной ВБР (12 Н).

Для проведения экспериментов были изготовлены специальные оснастки, позволяющие реализовать крепление оптического волокна и обеспечить передачу не него нагрузки от подвешенного груза. Схема и фотография оснастки в камере влажности изображены на рисунке 1.19.

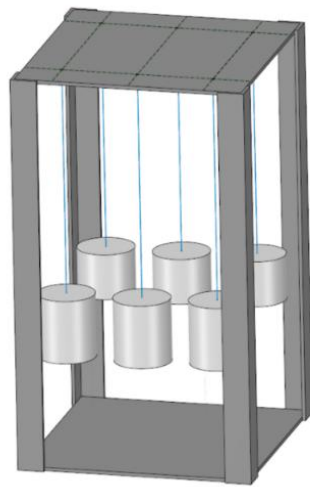


Рисунок 1.19 — Схема оснастки с оптическими волокнами и грузами и вид оснастки, помещенной в экспериментальную установку

При проведении экспериментов были реализованы два уровня относительной влажности воздуха: 45–55% и 85–95% при температуре 25–30°C. Одно оптическое волокно с ВБР размещалось в экспериментальной установке в свободном состоянии без воздействия груза для температурной компенсации показаний волоконно-оптических датчиков деформации. Помимо этого, проводилась регистрация температуры и влажности посредством автономного регистратора температуры и влажности EClerk-M-RHT.

По результатам проведённых испытаний изменение деформаций от их начального значения в течение всего времени наблюдений составило не более

0.25% при влажности 45–55% (800 ч) и не более 0.17% при влажности 85–95% (900 ч).

Схема проведения длительных испытаний датчиков деформации при постоянной температуре аналогична испытаниям при постоянном уровне относительной влажности воздуха. Для обеспечения заданного значения положительной температуры окружающей среды использовалась термокамера ТН2700. В данной камере выдерживались следующие уровни температуры: 50°C (800 ч) и 80°C (800 ч). Фотография термокамеры с размещенной в ней оснасткой представлена на рисунке 1.20.

Для испытаний ВОД при отрицательных температурах оснастка помещалась в морозильную камеру, где были проведены эксперименты по выдерживанию двух уровней температуры окружающей среды, –20°C и –43°C в течение 550 часов.



Рисунок 1.20 — Экспериментальная установка для длительного испытания ВОД при постоянном уровне температуры

При температурах 80°C, 50°C, –20°C, –43°C, средний уровень относительной влажности составил 2%, 12%, 54% и 74% соответственно.

По результатам проведенных испытаний, изменение деформаций относительно их начального значения составило для температуры 50°C не более



0.12%, для температуры 80°C не более 0.16%, для температуры –20°C не более 0.36% и для температуры –43°C не более 0.22% [113].

Результаты испытаний показали, что относительное изменение показаний ВОД при различной влажности и температуре и нагрузках, близких к предельным для испытываемых датчиков находится в пределах 0.36%. Это дает определенные гарантии на использование ВОД на брэгговских решетках в разных климатических условиях.

## **ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВСТРАИВАНИИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В МАТЕРИАЛ**

### **2.1. Экспериментальный анализ структуры материала в окрестности оптического волокна, встроенного в материал**

ВОД подходят для встраивания в структуру большого числа материалов, обладающих как изотропными (бетон/цемент, полимерные материалы), так и анизотропными механическими характеристиками (слоистые композитные материалы) на макромасштабном уровне, а также имеющих различную внутреннюю структуру. При встраивании в материал оптического волокна возможно искажение структуры материала, приводящее к появлению технологических дефектов. Наличие постороннего объекта — оптического волокна в объёме материала приводит к перераспределению НДС, вызывающему концентрацию напряжений и изменение деформаций в окрестности волокна. Появление дополнительного концентратора напряжений может быть источником локального процесса разрушения материала и дальнейшего роста области разрушения. Существенное изменение измеряемой деформации в результате встраивания оптического волокна обесценивает методику измерений.

В рамках диссертационной работы проведены экспериментальные исследования, направленные на демонстрацию возможности внедрения оптического волокна в структуру различных материалов с сохранением целостности оптического волокна и работоспособности волоконно-оптических датчиков. В выполненных экспериментах ВОД встраивались в образцы (Рисунок 2.1) из цементного раствора, эпоксидной смолы, термопластичных материалов, полученных с помощью аддитивных технологий, слоистых полимерных композитных материалов (стеклопластик, углепластик). Изготовление образцов из

полимерных композитных материалов осуществлялось в Научно-образовательном центре авиационных композитных технологий (НОЦ АКТ) ПНИПУ методом прямого прессования и в Центре композитных технологий Казанского национального исследовательского технического университета имени А. Н. Туполева (КНИТУ КАИ) методом вакуумной инфузии.

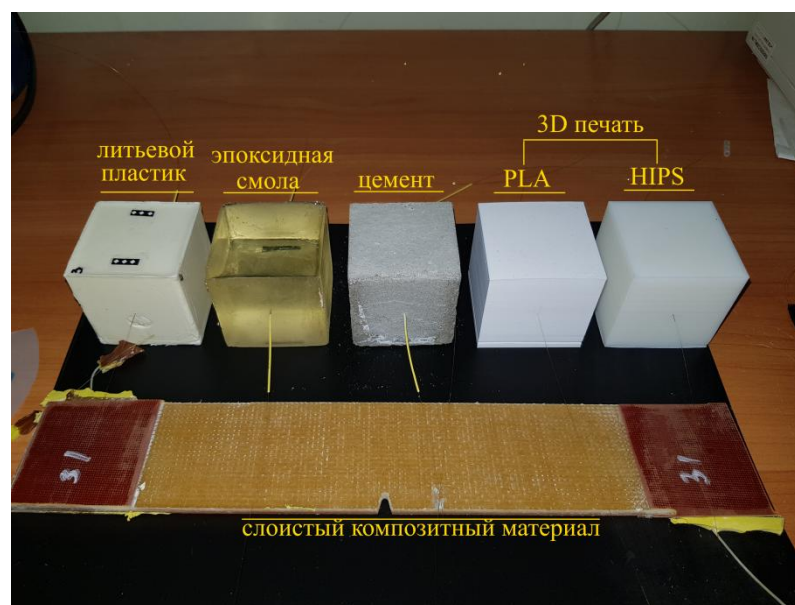


Рисунок 2.1 — Образцы из различных материалов с внедрённым оптическим ВОЛОКНОМ

Во всех экспериментах для внедрения использовались одномодовые германосиликатные оптические волокна с защитной оболочкой из полиимида или акрилата.

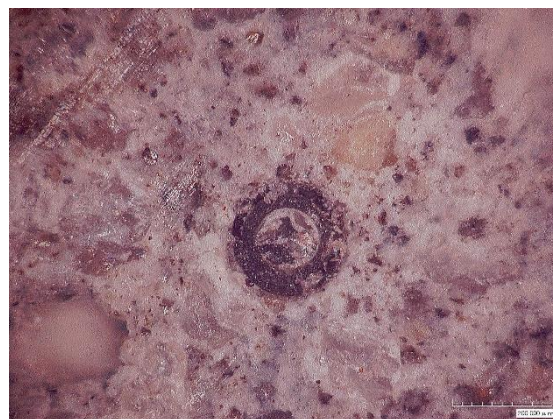
Для изготовления образцов из цементной смеси использовались цилиндрические и призматические формы для заливки. Перед заливкой цементной смеси в форму производилась установка и позиционирование линий оптического волокна. Вертикальное положение линий обеспечивалось посредством прикрепляемого отвеса. Для создания цементных образцов использовались портландцемент 400 и речной песок в соотношении 1:5 [114].

Разрезание цементных образцов (Рисунок 2.2а), предназначенных для исследования внутренней структуры материала в окрестности оптического волокна

на основе микроскопических снимков (Рисунок 2.2б), производилось спустя 28 суток после заливки.



*а*



*б*

Рисунок 2.2 — Образцы из цементного раствора (*а*) и фотография сечения образца в области внедрённого оптоволоконна (*б*)

Анализ снимков полученных сечений образцов позволяет сделать заключение, что в области внедрённого оптического волокна не наблюдается образования дефектов и разрушения материала.

Для изготовления образцов из эпоксидной смолы использовалась разборная форма из полипропилена (Рисунок 2.3а), позволяющая извлекать сформированный образец без сколов и обрывов. Для сохранения целостности оптоволоконной линии в боковых отверстиях формы размещались защитные трубки. В качестве исходного материала использовалась универсальная двухкомпонентная эпоксидная смола. Применялось рекомендуемое изготовителем соотношение смолы к отвердителю — 2:1. Полученный по прошествии 36 часов эпоксидный образец в форме куба с внедрённым оптоволоконном представлен на рисунке 2.3б [115].

Для создания образца из литьевого пластика была использована двухкомпонентная полиуретановая смесь холодного отверждения. Уникальной особенностью данного литьевого пластика является быстрое отверждение при комнатной температуре после смешивания основного компонента с отвердителем. Для изготовления образца применялось рекомендуемое изготовителем

соотношение основного компонента к отвердителю — 100:60. Процесс изготовления и используемая форма для заливки идентичны случаю с образцом из эпоксидной смолы. На рисунке 2.3в приведена фотография полученного образца. Для полученных образцов из эпоксидной смолы и литьевого пластика также не выявлены дефекты в окрестности внедрённого оптического волокна

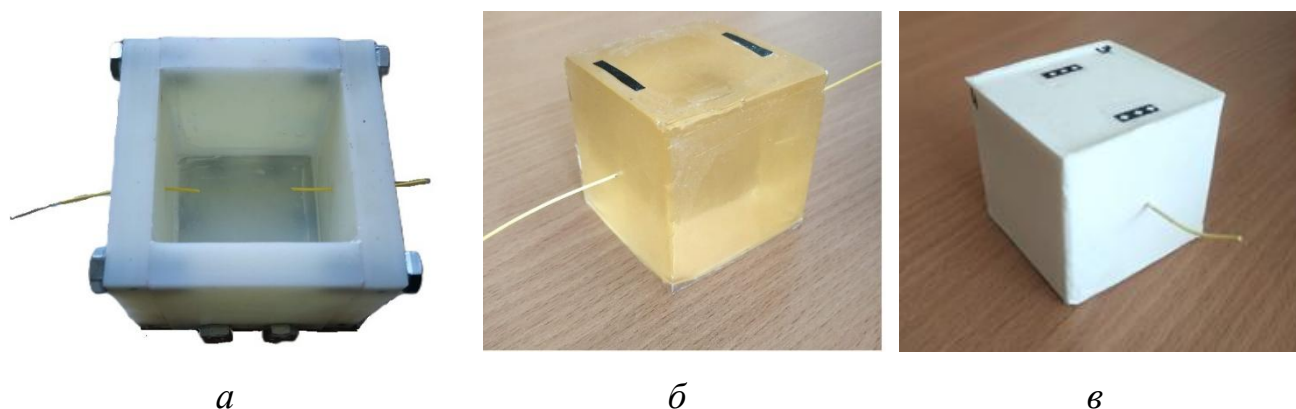


Рисунок 2.3 — Форма для заливки образцов (а), эпоксидный образец (б) и образец из литьевого пластика (в) с внедрённым оптическим волокном

Рассмотрен наиболее распространенный вариант аддитивной технологии — послойное наплавление (Fused Deposition Modeling, FDM). В качестве материала могут выступать любые из распространенных термопластов, применяемых при изготовлении объектов по данной технологии, так как температура их плавления не превышает допустимых значений для оптического волокна. К таким материалам относятся полилактид (PLA), полиэтилентерефталат-гликоль (PET-G), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), ударопрочный полистирол (HIPS) и другие, а также разработанные на основе данных пластиков композитные материалы с угле-, стекловолоконным, арамидным и другими наполнителями.

Процесс 3D-печати изделий с внедрённым оптическим волокном можно разделить на три основных этапа (Рисунок 2.4). На первом этапе производится печать до места расположения оптического волокна. На втором этапе производится приостановка печати, укладка и крепление оптического волокна. Последний этап заключается в возобновлении процесса печати до его завершения.

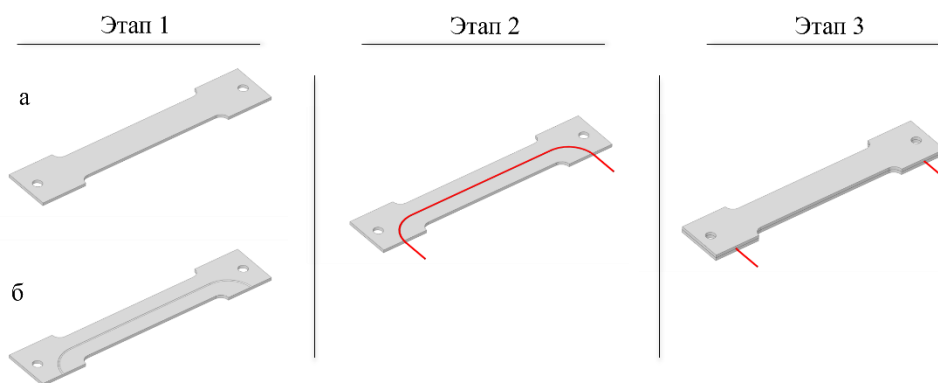


Рисунок 2.4 — Этапы изготовления образца по технологии 3D-печати со встроенными ВОД

Возможны разные способы размещения оптического волокна при встраивании. Один из вариантов заключается в сохранении плоскости сечения по толщине, на которой располагается оптическое волокно (Этап 1а на рисунке 2.4), и фиксации волокна, например, при помощи клеевого соединения (использовался цианоакрилатный клей). Во втором варианте создается специальное углубление на этапе построения геометрической модели, в которое укладывается оптическое волокно (Этап 1б на рисунке 2.4). Размер углубления должен быть сопоставим с диаметром используемого оптического волокна, при этом соблюдение точности данных размеров при печати зависит от характеристик печатающего устройства. Данный подход является более трудоемким, однако позволяет лучше фиксировать оптическое волокно при возобновлении печати.

Анализ внутренней структуры композитных материалов в окрестности встроенного оптического волокна проведён для следующих типов армирования (Рисунок 2.5): однонаправленный слоистый композитный материал с направлением армирования вдоль оптического волокна  $[0_3/OF/0_3]$ ; однонаправленный слоистый композитный материал с направлением армирования поперёк оптического волокна  $[90_3/OF/90_3]$ ; композитный материал с плетёной структурой армирования типа твил  $2 \times 2$ .

Анализ появления смоляного кармана в однонаправленных образцах из углепластика с направлениями армирования вдоль и поперёк оптического волокна

проведён в дополнение к имеющимся в литературе данным [12,69,116]. Это обусловлено тем, что возникновение, размер и форма данного технологического дефекта зависят не только от ориентации слоёв относительно оптического волокна, но и от технологии изготовления слоистого композиционного материала (вакуумная инфузия, автоклавное формование, прямое прессование).

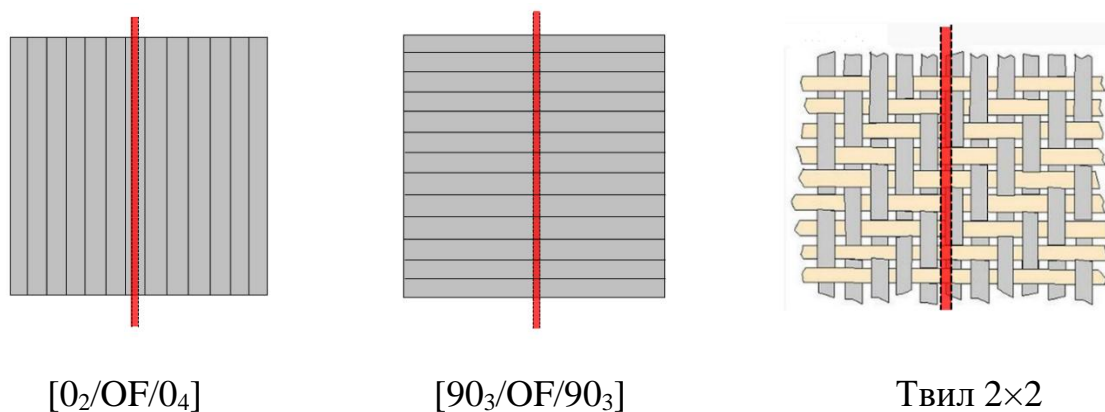


Рисунок 2.5 — Различные схемы армирования слоистого композиционного материала с внедрённым оптическим волокном

При создании полимерного композиционного материала с внедрённым оптоволоком, важной задачей является обеспечение целостности волокна в процессе изготовления материала, а также четкое соблюдение всех параметров технологического процесса: давления, температуры и времени, зависящих от марки материала. Процесс внедрения ВОД в композитный материал включает в себя ряд основных операций. На первом этапе производится раскрой армирующего материала и выкладка на технологическую оснастку необходимого количества слоёв армирующего материала. В процессе выкладки, между заранее определенными слоями укладывается оптическое волокно с небольшим предварительным натяжением, чтобы обеспечить его прямолинейную ориентацию в процессе дальнейшей полимеризации материала. Необходимо отметить, что наиболее опасными участками являются области ввода и вывода оптического волокна из композиционного материала. Для обеспечения целостности волокна



выполнена защита данных областей с помощью тефлоновых трубок. После выполнения всех вышеупомянутых операций проводится режим полимеризации.

Образцы, предназначенные для изучения внутренней структуры в области расположения встроенного оптического волокна, изготавливались методом прямого прессования. Между слоями композитного материала внедрялось стандартное одномодовое оптическое волокно с полиимидной оболочкой, геометрические параметры которого указаны ранее в работе. Полученные методом прямого прессования образцы из стеклопластика и углепластика были разрезаны на отдельные элементы для дальнейшего анализа поперечных сечений с использованием цифрового оптического микроскопа.

На рисунке 2.6 представлены изображения поверхности поперечного сечения образца из углепластика с однонаправленной структурой армирования и оптоволоконном, уложенным вдоль направления армирования. Можно отметить, что при совпадении направления армирования композитного материала с направлением укладки оптического волокна, оно оказывается плотно встроенным в структуру материала. Каких-либо технологических дефектов не обнаружено.

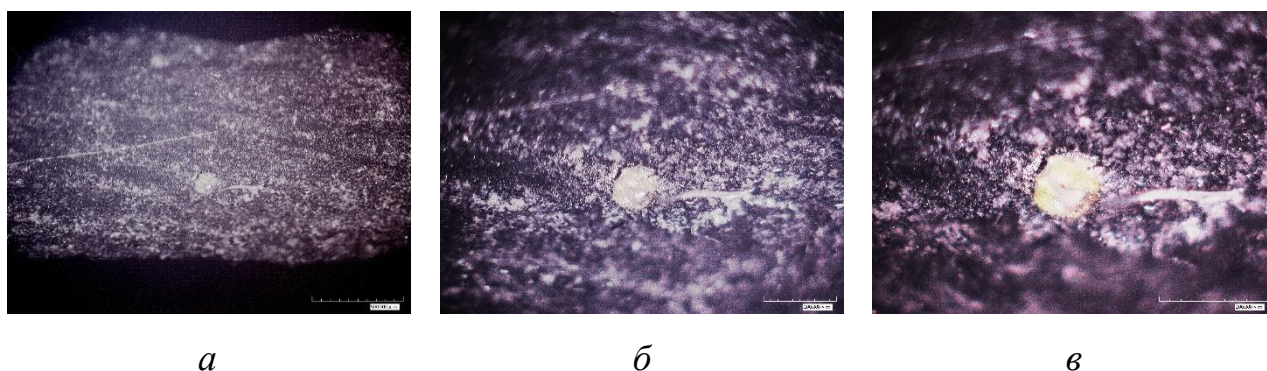


Рисунок 2.6 — Изображения поверхности поперечного сечения композита из углепластика с внедрённым оптическим волокном, ориентированным вдоль направления армирования: увеличение  $\times 140$  (*a*); увеличение  $\times 280$  (*б*); увеличение  $\times 420$  (*в*)



На рисунке 2.7 показаны снимки поверхности сечений композита с однонаправленной структурой армирования и оптическим волокном, внедрённым под углом  $90^\circ$  по отношению к направлению армирования.

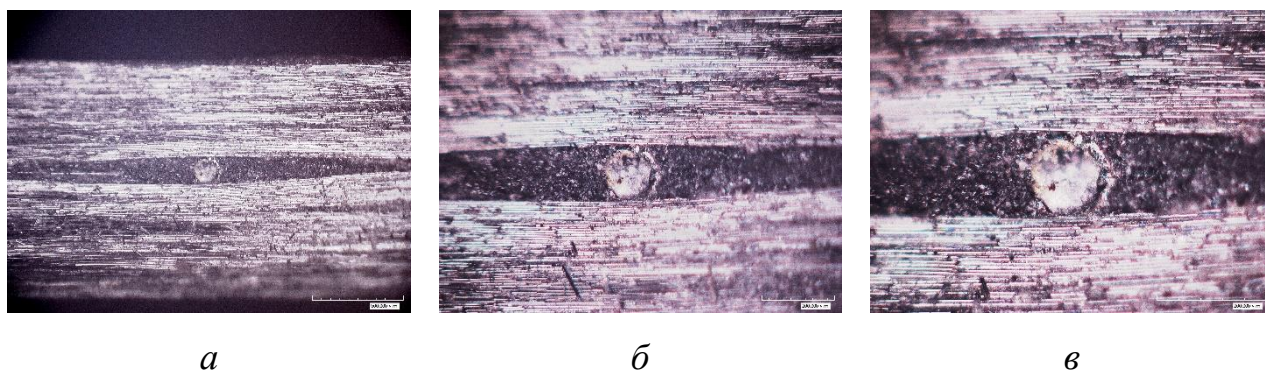


Рисунок 2.7 — Изображения поверхности поперечного сечения композита из углепластика с внедрённым оптическим волокном, ориентированным поперек направления армирования: увеличение  $\times 140$  (а); увеличение  $\times 280$  (б); увеличение  $\times 420$  (в)

На снимках явно виден технологический дефект — смоляной карман, сформировавшийся вокруг внедрённого оптического волокна. Его длина составила порядка 8–10 диаметров оптического волокна. Следует отметить отсутствие зазора между оптическим волокном и слоями композитного материала.

Для композитного материала с плетеной структурой армирования из 20 слоев произведена укладка оптических волокон с описанными ранее геометрическими характеристиками. Часть поперечных сечений образцов с внедрёнными оптическими волокнами была отполирована, а часть оставлена в исходном после разреза состоянии. На рисунке 2.8 приведены изображения полированных и неполированных поперечных сечений образцов из стеклопластика при увеличении  $\times 140$ . Для данного типа материала обработка поверхности обеспечивает лучшую видимость оптического волокна [117].

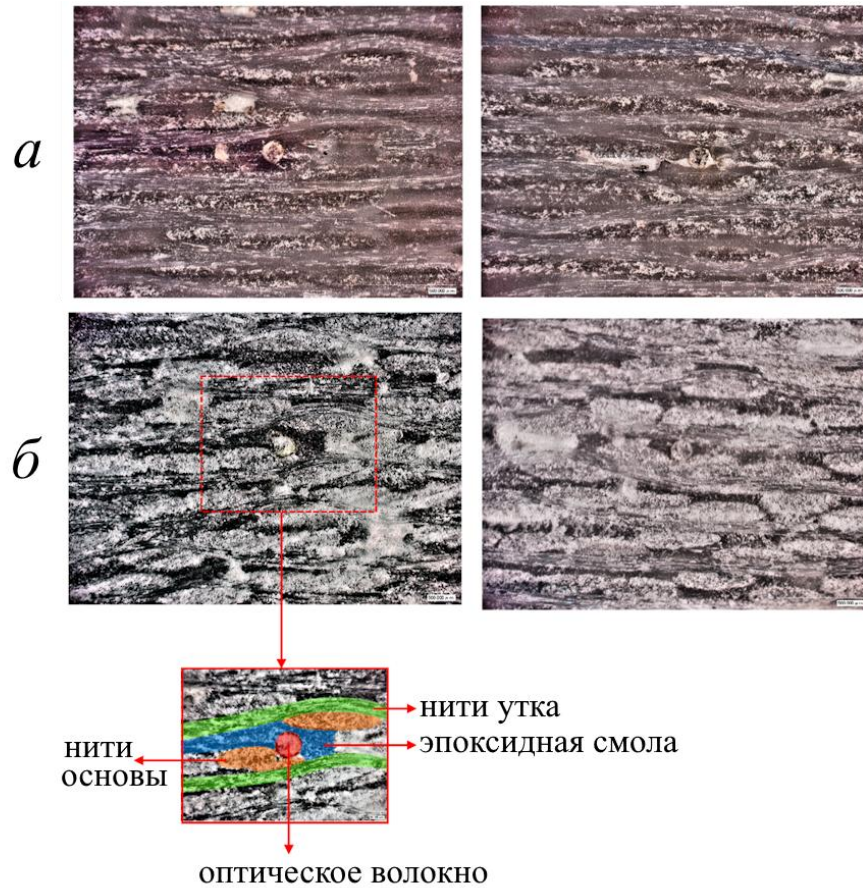


Рисунок 2.8 — Изображения поперечных сечений образцов из стеклопластика с внедрённым оптическим волокном с отполированной поверхностью (а) и в исходном состоянии, без полировки (б)

Анализ полученных изображений показал, что в образцах из стеклопластика различимы отдельные элементы композитного материала, такие как нити (жгуты) основы и утка, а также области, заполненные связующим. Несмотря на то, что оптическое волокно расположено в области, заполненной смолой, наблюдается лишь незначительное искажение структуры композитного материала в его окрестности, без выраженного формирования смоляного кармана.

## 2.2. Оценка работоспособности оптического волокна, встроенного в материал

При использовании ВОД, встроенных в материал, необходимо обеспечить целостность и работоспособность оптического волокна. Для реализации этой задачи была разработана методика, реализованная на образцах из ПКМ длиной 250 мм и шириной 50 мм. Образцы изготавливались на основе углеродного волокна с различной схемой армирования: однонаправленное армирование, саржевое плетение и триаксиальное плетение. Изготовление осуществлялось методом вакуумной инфузии в Центре композитных технологий КНИТУ-КАИ. При выкладке образцов между слоями ПКМ размещалось одномодовое германосиликатное оптическое волокно с защитной полиимидной оболочкой, ориентированное под разными углами относительно продольной оси образца. Параметры изготовленных образцов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 — Параметры изготовленных методом вакуумной инфузии образцов из ПКМ с внедрёнными ВОД

№	Материал	Количество слоёв	Ориентация ВОД относительно продольной оси образца	Размещение ВОД между слоями ПКМ
1	Однонаправленный	20	0°	Между 10 и 11
2	Однонаправленный	20	90°	Между 10 и 11
3	Ткань саржевого плетения	14	0°	Между 7 и 8
4	Ткань саржевого плетения	14	45°	Между 7 и 8
5	Ткань триаксиального плетения	10	0°	Между 5 и 6
6	Ткань триаксиального плетения	10	60°	Между 5 и 6

Целостность внедрённого оптического волокна предлагается оценивать по наличию проходящего через волокно оптического излучения в видимом спектральном диапазоне с помощью анализатора дефектов оптического волокна.

Данный способ широко используется на практике для визуальной идентификации повреждений волоконно-оптических линий связи. В случае разрыва оптического волокна свет перестает распространяться по световоду дальше поврежденного участка, что визуально фиксируется в виде яркого свечения. В случае сохранения целостности оптического волокна свет распространяется по световоду вплоть до конца оптоволокна. Работоспособность оптического волокна как распределённого ВОД на основе обратного рэлеевского рассеяния проверялась по его отклику на температурное воздействие, измеряемое с помощью рефлектометра OBR 4600 при помещении образца на разогретую до 50°C поверхность.

Во всех исследованных образцах, внедрённое оптическое волокно сохранило свою целостность и работоспособность.

### **2.3. Моделирование НДС в окрестности оптического волокна, встроенного в материал**

Для оценки влияния встроенного в материал оптического волокна на напряжённно-деформированное состояние данного материала построены численные модели и выполнены расчеты НДС в окрестности оптического волокна под действием внешней нагрузки.

Для изотропного материала уровень концентрации напряжений оценивается на основе результатов численного моделирования для параллелепипеда со встроенным оптическим волокном (Рисунок 2.9а). В качестве внешней нагрузки рассматривается нормальная однородная нагрузка  $P$ , распределённая по граням параллелепипеда и направленная перпендикулярно оптическому волокну. Данный вариант нагружения является наиболее опасным с точки зрения возникновения концентрации напряжений.

Расчет НДС проводился методом конечных элементов в рамках модели линейной теории упругости. При реализации метода конечных элементов использовалась сетка со сгущением в области включения (Рисунок 2.9б)

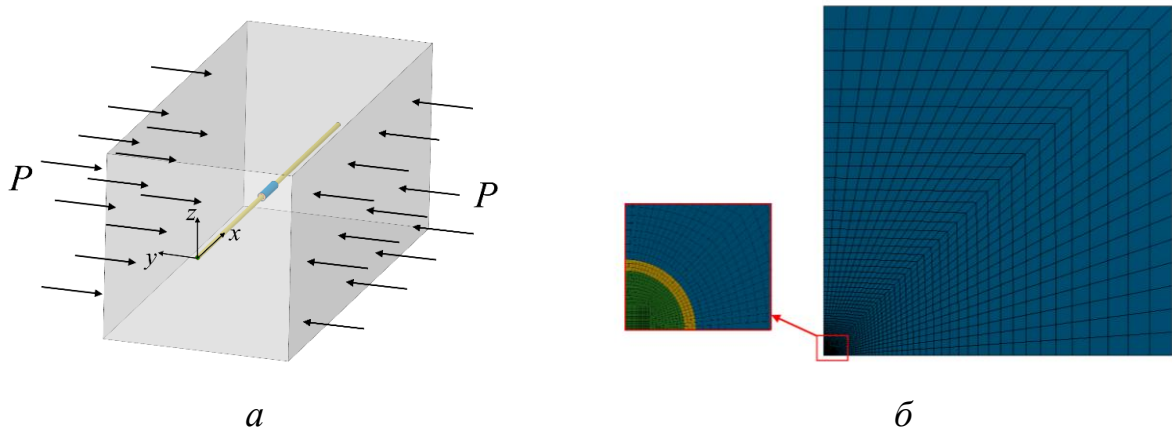


Рисунок 2.9 — Расчётная схема для параллелепипеда со встроенным оптическим волокном в области брэгговской решётки (а) и конечно-элементная дискретизация модели (б)

Основным результатом численного моделирования является величина  $K_y = \sigma_y^{\max} / P$ , которая определяет коэффициент концентрации напряжений. В качестве примера на рисунке 2.10 для материала с механическими характеристиками  $E_h = 30$  ГПа,  $\nu_h = 0.35$ , с параметрами оптического волокна:  $E_o = 71.4$  ГПа,  $\nu_o = 0.14$  и полиимидной оболочки:  $E_c = 2.5$  ГПа,  $\nu_c = 0.35$ , приведено распределение  $\sigma_y / P$ , которое определяет коэффициент концентрации напряжений, равный 1.81.

При моделировании напряжённо-деформированного состояния в окрестности оптического волокна, встроенного в полимерный композиционный материал, одним из ключевых факторов, определяющих достоверность вычисляемых напряжений и деформаций, является выбор подходящей расчётной модели. Эта задача включает выбор модели композиционного материала. Кроме этого, в расчётной модели необходимо учесть особенности, связанные с образованием смоляного кармана в окрестности оптического волокна.

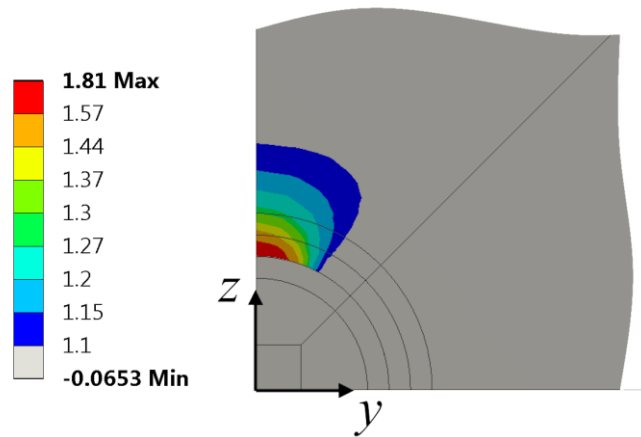


Рисунок 2.10 — Распределение напряжений  $\sigma_y/P$  в окрестности оптического волокна

В настоящей работе рассматриваются наиболее распространённые в конструкциях слоистые композиционные материалы. Для таких материалов существует несколько масштабных уровней моделирования: структурная, слоистая и однородная модели (Рисунок 2.11).

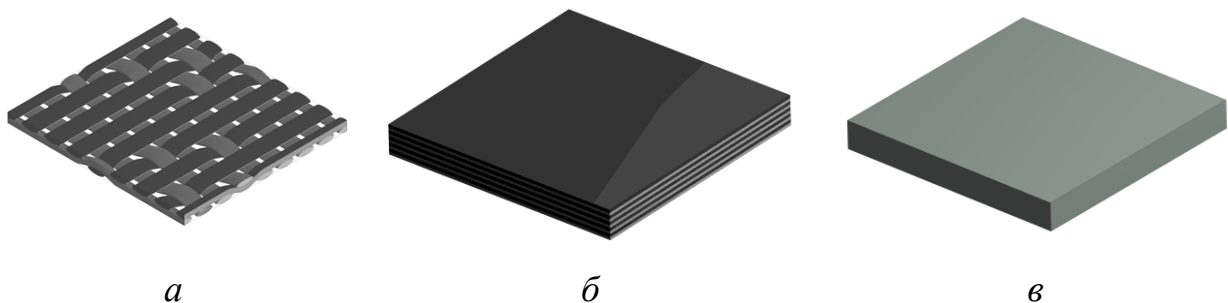


Рисунок 2.11 — Варианты моделирования композитного материала: структурная (*a*), слоистая (*б*) и однородная (*в*) модели

В структурной модели отражается реальная схема армирования, а механические характеристики полученной кусочно-однородной среды представляются свойствами армирующих волокон и связующего. В настоящей работе эта модель не рассматривается. Для композиционных материалов со слоистой структурой, широкое распространение получила слоистая модель, в которой композиционный материал моделируется в виде пакета слоёв, каждый из

которых является однородным анизотропным телом. Данная модель позволяет учесть различную ориентацию слоёв полимерного композиционного материала. Самой крупномасштабной является модель представления полимерного композиционного материала как однородной среды с эффективными механическими характеристиками, полученными для соответствующего материала. Данная модель достаточно адекватно отражает полимерный композиционный материал, сформированный из тканевых препрегов.

Оптические волокна при встраивании между слоями ПКМ и при уровнях нагрузок, возникающих в технологических процессах получения полимерного композиционного материала, сохраняют свою геометрию, а слои препрега в окрестности оптического волокна искривляются, в результате чего происходит образование кармана, который заполняется полимерным связующим. Данная подобласть представляет собой технологический дефект, называемый смоляным карманом. Геометрия смоляного кармана зависит от вида препрегов и вариантов их укладки.

Для однонаправленных препрегов могут иметь место различные варианты, связанные с образованием смоляного кармана. В частности, если в пакете слоёв имеются два слоя  $[0/0]$  и волокно укладывается между слоями параллельно направлению армирования слоя, то для такого варианта смоляной карман практически не образуется. Вариант с наличием в слоистом композиционном материале двух слоёв  $[90/90]$  и оптическим волокном, встроенным между этими слоями перпендикулярно направлению армирующих волокон, приводит к образованию максимального смоляного кармана при прочих равных условиях. Геометрия такого кармана (Рисунок 2.12) достаточно хорошо подтверждена теоретическими и экспериментальными результатами [67–69,72].

В данном случае форма смоляного кармана имеет две оси симметрии, а основные геометрические характеристики включают: максимальную ширину —  $a$ , длину —  $2b$  и угол  $\gamma$  в устье смоляного кармана. В работе [68] отмечается, что длина



смоляного кармана составляет  $12 \div 16R_1$  ( $R_1$  — радиус оптического волокна с защитной оболочкой).

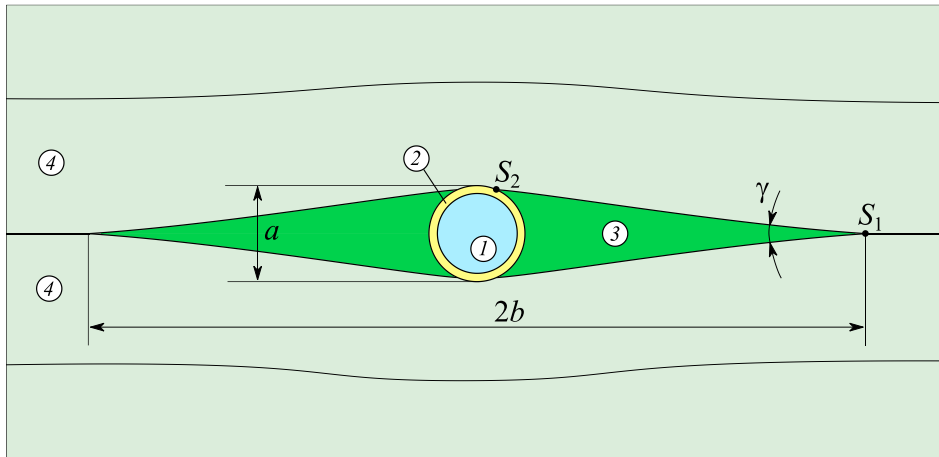


Рисунок 2.12 — Полимерный композитный материал с оптическим волокном и смоляным карманом: оптическое волокно (1); оболочка оптического волокна (2); смоляной карман (3); слой полимерного композитного материала (4)

Следует отметить, что в известных работах, как правило,  $a = 2R_1$ , хотя вариант  $a > 2R_1$  вполне возможен и должен быть исследован при численном моделировании. Наряду с приведёнными крайними вариантами расположения оптического волокна в пакете из однонаправленных препрегов, возможны другие многочисленные варианты, когда оптическое волокно может находиться между слоями  $[0/0]$ ,  $[90/90]$ ,  $[0/90]$  под различными углами относительно направления армирования слоёв. Для этих вариантов геометрия смоляного кармана не будет обладать симметрией, а её конкретная форма может быть определена путём экспериментальных измерений различными методами. Данная задача далеко не тривиальна. Однако при численном моделировании напряжённого состояния в окрестности оптического волокна, есть возможность перебора вариантов геометрий смоляного кармана и получения оценок самых неблагоприятных вариантов.

В литературе отсутствует информация о формировании смоляного кармана и его геометрии для слоистых композиционных материалов на основе тканевых



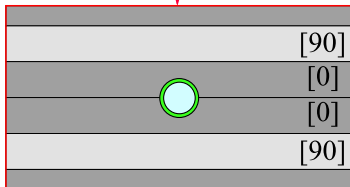
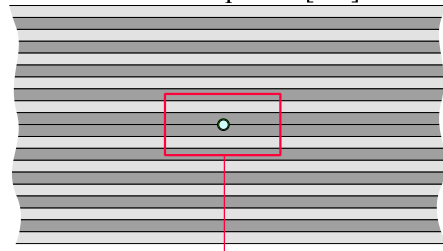
препрегов. Геометрия численной модели построена на основе анализа снимков внутренней структуры, описанных ранее. Полученные результаты позволяют сделать заключение, что в окрестности оптического волокна происходят изменения в распределении клеевого слоя, но выраженная картина, связанная с образованием смоляного кармана отсутствует.

В настоящей работе при анализе напряжённого состояния в окрестности встроенного в композиционный материал оптического волокна рассмотрено несколько вариантов расчётных схем (Рисунок 2.13) с целью их сопоставления: однородная ортотропная упругая среда со встроенным оптическим волокном с образованием и без образования смоляного кармана; слоистая модель полимерного композитного материала, в которой волокно встроено между слоями  $[0/0]$ , что не приводит к образованию смоляного кармана; слоистая модель полимерного композитного материала, в которой волокно встроено между слоями  $[0/90]$  или  $[90/90]$ , что приводит к учёту в расчётной схеме смоляного кармана.

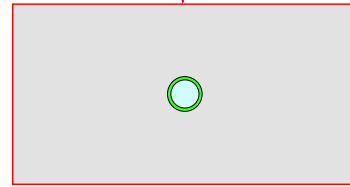
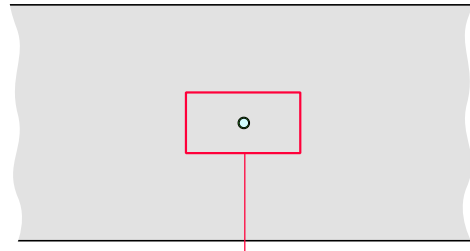
В этих вариантах принята геометрия смоляного кармана с двумя осями симметрии (Рисунок 2.12), а его длина  $2b$ , определяется величиной  $b = 8R_1$ .

Для всех вариантов представления полимерного композиционного материала моделирование напряжённо-деформированного состояния проводится на элементе в виде параллелепипеда со встроенным оптическим волокном при разных вариантах нагружения нормальными однородными нагрузками на боковых гранях параллелепипеда (Рисунок 2.14). Размер  $h = 4$  мм соответствует пакету из 20 слоёв препрегов. Размер  $w$  в 7 раз превышает длину смоляного кармана  $2b$  и обеспечивает в модели однородного композиционного материала на достаточном удалении от волокна ( $\sim 5b$ ) однородное напряженное состояние. Моделирование проводилось с использованием моделей линейно-упругого поведения рассматриваемых материалов.

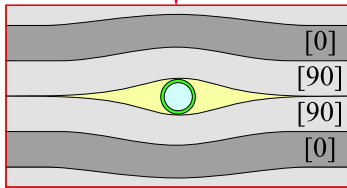
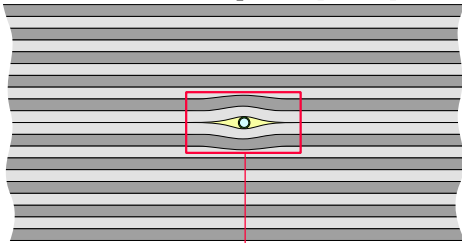
Слоистая модель без образования смоляного кармана [0/0]



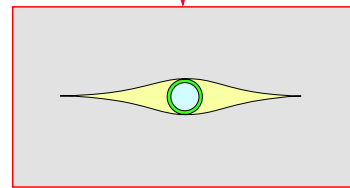
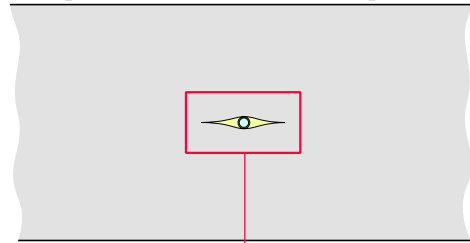
Однородная модель без образования смоляного кармана



Слоистая модель с образованием смоляного кармана [90/90]



Однородная модель с образованием смоляного кармана



Слоистая модель с образованием смоляного кармана [0/90]

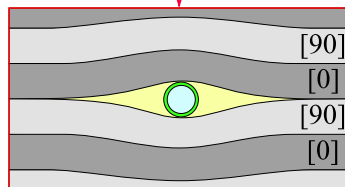
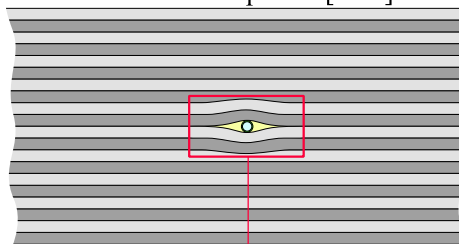


Рисунок 2.13 — Варианты представления полимерного композиционного материала со встроенным оптическим волокном

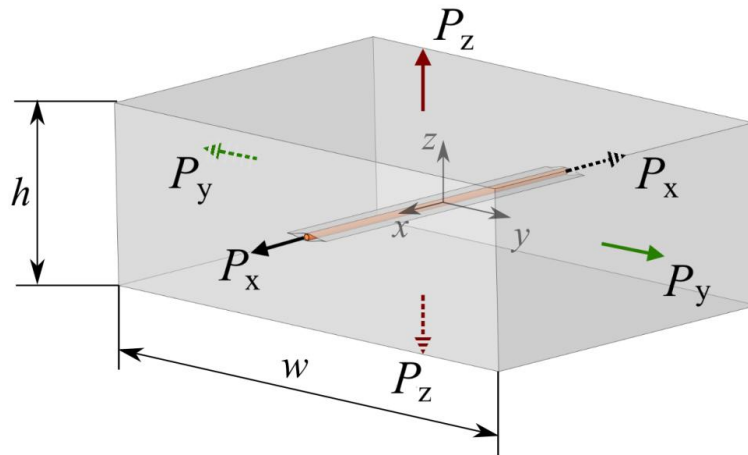


Рисунок 2.14 — Расчётная схема элемента полимерного композитного материала со встроенным оптическим волокном

Расчёты проводились методом конечных элементов в трёхмерной постановке с использованием сеток, сгущающихся в зоне концентрации напряжений (Рисунок 2.15). Точность вычислений оценивалась на основе сравнения решений с различными дискретизациями и анализом сходимости решения при увеличении числа элементов.

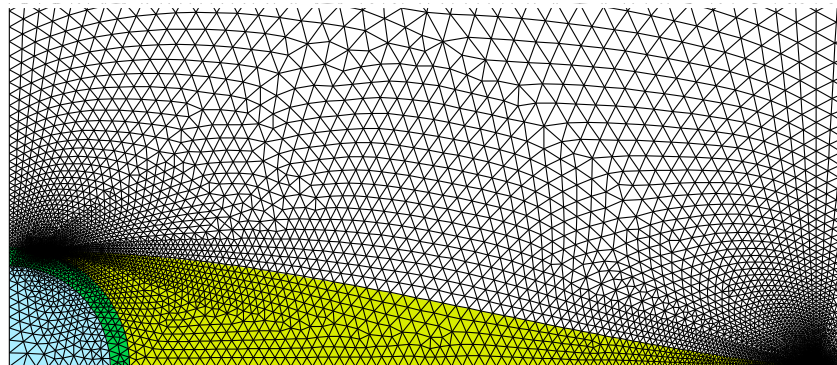


Рисунок 2.15 — Вид конечно-элементной сетки модели с внедрённым оптическим волокном и смоляным карманом

Моделирование проводилось для полимерного композиционного материала, состоящего из 20 слоёв однонаправленных препрегов. В таблице 2.2 приведены механические характеристики однонаправленного препрега и эффективные

механические характеристики пакета слоев. В таблице 2.3 приведены механические характеристики оптического волокна и связующего материала.

Таблица 2.2 — Механические свойства однонаправленного препрега и эффективные механические характеристики пакета слоёв

Материал	$E_x$ , ГПа	$E_y$ , ГПа	$E_z$ , ГПа	$\nu_{xy}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{xz}$	$G_{xy}$ , ГПа	$G_{yz}$ , ГПа	$G_{xz}$ , ГПа
Однонаправленный препрег	158.5	8.96	8.96	0.32	0.45	0.32	4.6	3.0	4.6
Эффективные свойства пакета слоёв	84.1	84.1	10.7	0.035	0.45	0.45	4.3	3.5	3.5

Таблица 2.3 — Механические характеристики оптического волокна и клея

Материал	$E$ , ГПа	$\nu$
Кварцевое стекло	71.4	0.17
Полиимид	2.5	0.35
Связующее	2.9	0.36

На основе анализа картины полученных сечений слоистого композиционного материала было принято, что вдоль оси  $z$ , при  $|y| > 8R_1$ , все слои имеют одинаковую толщину и параллельны друг другу. Это означает, что в слоях в зоне  $-8R_1 < y < 8R_1$  при прессовании происходит уменьшение толщины слоёв за счёт перетекания смолы из слоёв препрега. Изменение толщины убывает по мере удаления от оптического волокна. При анализе напряжённого состояния элемента композиционного материала со встроенным оптическим волокном были рассмотрены три варианта нагружения  $P_x = P_0, P_y = P_z = 0$ ;  $P_y = P_0, P_x = P_z = 0$ ;  $P_z = P_0, P_x = P_y = 0$ . Самым неблагоприятным с точки зрения уровня концентрации напряжений является вариант  $P_y = P_0, P_x = P_z = 0$  с нагрузкой, действующей параллельно слоям композиционного материала и перпендикулярно оптическому

волокну. Поэтому результаты численного моделирования будут представляться для данного варианта нагружения.

На рисунке 2.16 приведены распределения напряжений  $\sigma_y / P_0$  вдоль оси  $y$  при  $x = z = 0$ , а на рисунке 2.17 — распределение напряжений  $\sigma_y / P_0$  вдоль оси  $z$  при  $x = y = 0$ . Эта компонента тензора напряжений существенно больше других. На всех графиках наряду с результатами для слоистой модели ПКМ, приводятся результаты для однородной модели при наличии или отсутствии смоляного кармана, что определяется надписью на соответствующем графике.

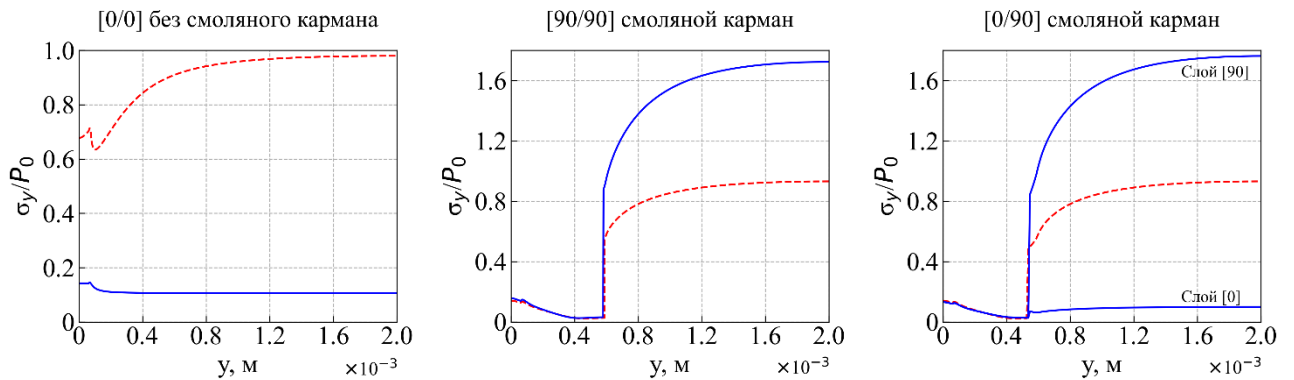


Рисунок 2.16 — Картины распределения напряжений  $\sigma_y / P_0$  в окрестности оптического волокна:

----- однородная модель, — слоистая модель

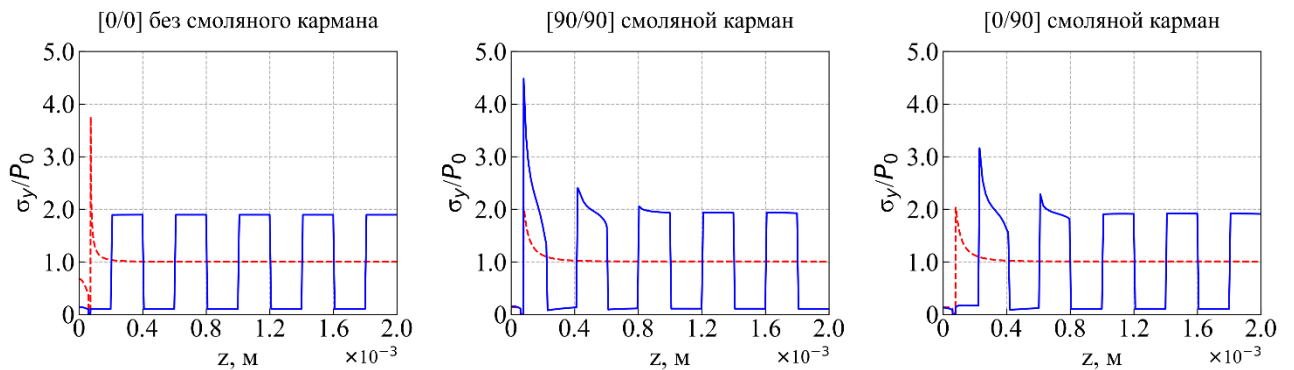


Рисунок 2.17 — Распределение напряжений  $\sigma_y / P_0$  вдоль оси  $z$  при  $y = 0$ :

----- однородная модель, — слоистая модель.

При анализе напряжённого состояния будем использовать величину  $K_y = \sigma_y^{\max} / P_0$ , которая определяет коэффициент концентрации напряжений для соответствующей составляющей компоненты тензора напряжений.

В таблице 2.4 приведены коэффициенты концентрации напряжений при различных вариантах нагружения модельной системы.

Таблица 2.4 — Значения коэффициента концентрации напряжений

Модельная система	Ненулевые компоненты $P_x, P_y, P_z$		
	$P_x = P_0$ ,	$P_y = P_0$ ,	$P_z = P_0$ ,
Слоистая модель без образования смоляного кармана [0/0]	1.91	1.90	1.28
Однородная модель без образования смоляного кармана	1.01	3.78	1.37
Слоистая модель с образованием смоляного кармана [90/90]	1.91	4.55	1.62
Однородная модель с образованием смоляного кармана	1.01	2.10	1.60
Слоистая модель с образованием смоляного кармана [0/90]	1.91	4.33	1.68

Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов. Для слоистых композиционных материалов из однонаправленных препрегов может быть выбран такой вариант компоновки слоёв, при котором не возникает смоляной карман и отсутствует концентрация напряжений в окрестности смоляного кармана. Этот вариант определяется двумя условиями: направления армирования однонаправленных слоёв, между которыми встраивается оптическое волокно, должны совпадать с направлением укладки волокна; диаметр оптического волокна должен быть меньше толщины слоя препрега. Данный вывод следует из результатов, представленных на рисунке 2.17а для слоистой модели ПКМ. Расчёты, полученные на основе однородной модели ПКМ, не позволяют получить этот результат и дают значительную концентрацию напряжений в окрестности

оптического волокна [118]. Среди рассмотренных моделей вариант однородной модели со встроенным оптическим волокном без образования смоляного кармана достаточно полно соответствует слоистому композиционному материалу на основе тканевых препрегов со встроенным оптическим волокном, так как ранее было показано, что при использовании тканевых препрегов смоляной карман не образуется. В этом случае результаты численного моделирования достаточно полно соответствуют реальности и дают для рассмотренных материалов коэффициент концентрации напряжений по наибольшей компоненте тензора напряжений  $\sigma_y$  близкий к четырём.

При рассмотрении композиционных материалов на основе однонаправленных препрегов более достоверной является слоистая модель, так как она отражает, что в зоне концентрации, нагрузку воспринимает слой с наибольшей жёсткостью. При этом чем ближе этот слой к оптическому волокну, тем коэффициент концентрации выше. Это следует из сравнения вариантов компоновки [90/90], [0/90], представленных на рисунке 2.17б и 2.17в. Данный результат и определяет, что у одного и того же материала, рассмотренного в рамках однородной и слоистой моделей, коэффициенты концентрации напряжений выше при использовании для расчётов слоистой модели, в частности, в рассмотренных вариантах 3.78 и 4.55 соответственно. Приведённые расчёты также приводят к выводу, что наличие смоляного кармана снижает коэффициент концентрации напряжений, что следует из сравнения однородной модели с оптическим волокном без смоляного кармана и однородной модели с оптическим волокном со смоляным карманом, для которых коэффициенты концентрации напряжений соответственно равны 3.78 и 2.10.

Для рассматриваемых ПКМ, в отличие от работ, где ПКМ имеет одно направление армирования, в окрестности устья смоляного кармана не возникает концентрации напряжений по компоненте  $\sigma_z$ , которая, как указывается в работе [68], может приводить к разрушению.

Ранее отмечалось, что для слоистых композиционных материалов из однонаправленных препрегов геометрия смоляного кармана существенно зависит от угла ориентации оптического волокна относительно направления армирования. Для оценки влияния геометрии смоляного кармана на уровень концентрации напряжений в окрестности оптического волокна были выполнены расчёты при различных вариантах геометрии смоляного кармана (Рисунок 2.18). Рассматривалось два параметра  $b_1$  и  $b_2$ , определяющие общую длину смоляного кармана. Несовпадение этих размеров имеет место при отличии угла ориентации волокна относительно направления армирования от  $90^\circ$ . Кроме этого, введена величина  $\delta$ , определяющая минимальный заполненный смолой зазор между волокном и композиционным материалом. Расчёты проводились для модели композиционного материала, представляемого однородной анизотропной средой, характеристики которой приведены в таблице 2.2.

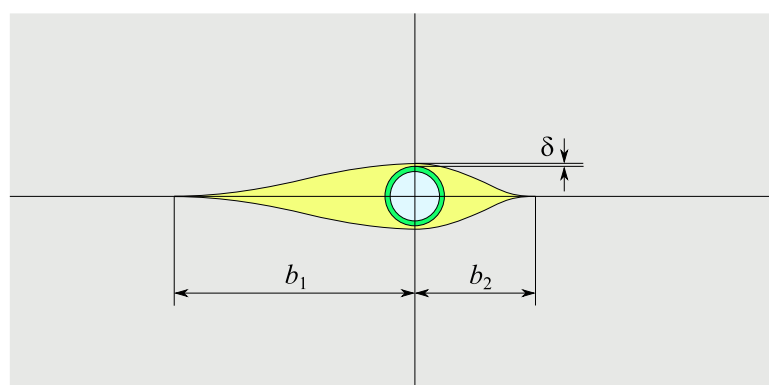


Рисунок 2.18 — Геометрические параметры модели смоляного кармана

В таблице 2.5 приведены коэффициенты концентрации напряжений при различных параметрах геометрии смоляного кармана. Эти результаты позволяют сделать ряд выводов. Для смоляного кармана с двумя осями симметрии ( $b_1 = b_2$ ) увеличение длины смоляного кармана приводит к снижению концентрации напряжений до определённой длины смоляного кармана. Для рассматриваемых механических характеристик модельного объекта при длине смоляного кармана свыше  $b_1/R_1 > 10$  коэффициент концентрации напряжений практически не



меняется. При заданной длине смоляного кармана его асимметрия, связанная с уменьшением одного из размеров  $b_1$  или  $b_2$ , 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  $\delta$ .

Таблица 2.5 — Коэффициенты концентрации напряжений для различных вариантов смоляных карманов

$b_1/R_0$	$b_2/R_0$	$\delta/R_0$	$K_y$
4	4	0.1	2.99
8	8	0.1	2.09
12	12	0.1	1.83
8	4	0.1	2.50
8	8	0	3.32
8	8	0.3	2.33

В численных экспериментах было оценено влияние жёсткости и толщины защитной оболочки оптического волокна на уровень концентрации напряжений. Результаты вычислений показали, что при увеличении или уменьшении жёсткости и толщины защитной оболочки в два раза коэффициент концентрации напряжений изменяется в пределах двух–трёх процентов, что указывает на несущественное влияние параметров защитной оболочки на уровень напряжений в окрестности оптического волокна.

## **ГЛАВА 3. ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ, ВСТРОЕННЫМИ В МАТЕРИАЛ ИЛИ ФИКСИРОВАННЫМИ НА ПОВЕРХНОСТИ**

### **3.1. Численный и экспериментальный анализ результатов измерения деформаций волоконно-оптическими датчиками на брэгговских решётках, встроенными в материал или фиксированными клеевым соединением на его поверхности**

При использовании любых датчиков, в том числе ВОД на основе брэгговских решеток, необходимо иметь оценки достоверности результатов измерений деформаций. Эти оценки зависят от различных факторов. Наиболее важная оценка связана с процедурой вычисления деформаций на основе регистрируемой экспериментальной величины — резонансной длины волны отражённого спектра.

В общем случае компоненты тензора деформации в зоне брэгговской решетки  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ , среди которых деформация вдоль волокна  $\varepsilon_3$  является измеряемой величиной, связаны соотношениями (1.5) с регистрируемыми физическими величинами — сдвигами резонансных длин волн отраженного спектра  $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ , которые возникают при деформировании. Особенность этих соотношений состоит в том, что для определения трех неизвестных  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  имеется два уравнения. Единственное решение этих уравнений имеет место при одноосном напряжённом состоянии в зоне брэгговской решетки. Данный вариант, определяемый соотношением (1.6), наиболее распространён в практических приложениях и конструкциях датчиков на основе волоконных брэгговских решеток.

При встраивании оптоволоконного датчика в материал, или даже его соединении каким-либо образом с поверхностью материала, например, путём приклеивания, в датчике в результате взаимодействия с материалом будет

реализовываться сложноподвиженное состояние, то есть будут иметь место деформации  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ , подлежащие идентификации на основе экспериментальной информации, а именно — значений  $\Delta\lambda_1/\lambda_B$  и  $\Delta\lambda_2/\lambda_B$ . Для определения измеряемой компоненты деформаций  $\varepsilon_3$  возможны два варианта. Первый вариант заключается в конструктивном обеспечении одноосного подвиженное состояние в зоне брэгговской решётки, например, путем формирования капилляра в зоне ВБР [119] (Рисунок 3.1).

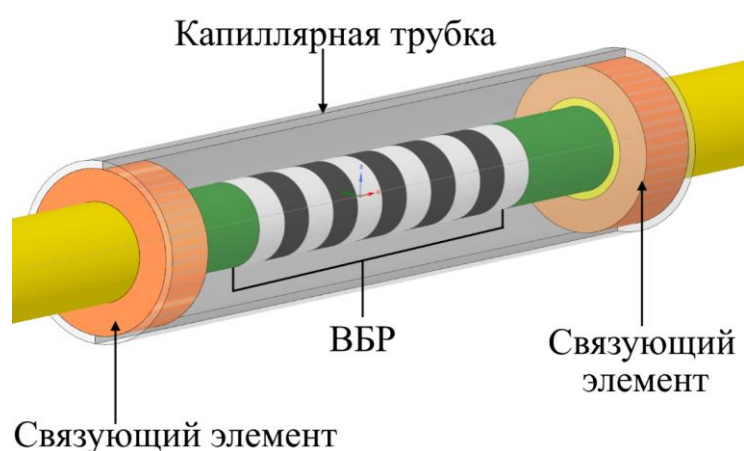


Рисунок 3.1 — Схема оптического волокна с брэгговской решёткой в капилляре

Второй вариант связан с принятием допущения об одноосном подвиженное состояние в зоне брэгговской решётки, встроенной в материал или фиксируемой другим материалом на его поверхности, и, как следствие этого допущения, — с использованием соотношения (1.6) для определения деформаций.

Численные эксперименты позволяют оценить границы применимости соотношения (1.6). В качестве объекта исследования, как и ранее, рассматривается параллелепипед со встроенным оптическим волокном (Рисунок 2.14) при различных вариантах нагружения боковых граней нормальными равномерно распределёнными нагрузками  $P_x = P_0, P_y = P_z = 0; P_y = P_0, P_x = P_z = 0; P_z = P_0, P_x = P_y = 0$ .

При моделировании рассматривается вариант однородной среды с эффективными механическими характеристиками для слоистого композита, приведёнными в таблице 2.2. Рассмотрены варианты со смоляным карманом и без смоляного кармана.

Предлагается следующий алгоритм оценки погрешности вычисления деформаций при использовании соотношения (1.6) [118]. При заданном варианте нагружения вычисляются деформации  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  в зоне брэгговской решётки. Затем на основе соотношений (1.5) вычисляются значения  $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ . При этом в расчётах контролируется совпадение деформации  $\varepsilon_3$  в оптическом волокне и соответствующей деформации в материале в окрестности оптоволокна, которая должна быть измерена ВОД. Далее значения  $\Delta\lambda_1/\lambda_B$  и  $\Delta\lambda_2/\lambda_B$  принимаются за экспериментальные данные для вычисления деформаций вдоль оптического волокна  $\varepsilon_3^{E_1}$  и  $\varepsilon_3^{E_2}$  на основе соотношения (1.6). Затем оцениваются относительные погрешности между величиной деформации  $\varepsilon_3$  и деформациями  $\varepsilon_3^{E_1}$  и  $\varepsilon_3^{E_2}$ , полученными на основе соотношения (1.6) при имитационных экспериментальных данных  $\Delta\lambda_1/\lambda_B$  и  $\Delta\lambda_2/\lambda_B$ . Погрешность вычисления деформаций на основе соотношения (1.6) определяется следующим образом:

$$\delta_1 = \left| \frac{\varepsilon_3^{E_1} - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \right| 100\%, \quad \delta_2 = \left| \frac{\varepsilon_3^{E_2} - \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \right| 100\%,$$

где

$$\varepsilon_3^{E_1} = \frac{1}{k} \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_B}, \quad \varepsilon_3^{E_2} = \frac{1}{k} \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_B}.$$

В таблице 3.1 и таблице 3.2 приведены значения деформаций  $\varepsilon_1^0 = \varepsilon_1/P_0$ ,  $\varepsilon_2^0 = \varepsilon_2/P_0$ ,  $\varepsilon_3^0 = \varepsilon_3/P_0$ , величин  $(\Delta\lambda_1/\lambda_B)^0 = (\Delta\lambda_1/\lambda_B)/P_0$ ,  $(\Delta\lambda_2/\lambda_B)^0 = (\Delta\lambda_2/\lambda_B)/P_0$  и полученные на основе численного моделирования величины погрешностей  $\delta_1$  и  $\delta_2$  для материала с характеристиками приведенными в таблице 2.2.

Таблица 3.1 — Результаты оценки погрешности определения деформаций.

Однородная модель с образованием смоляного кармана

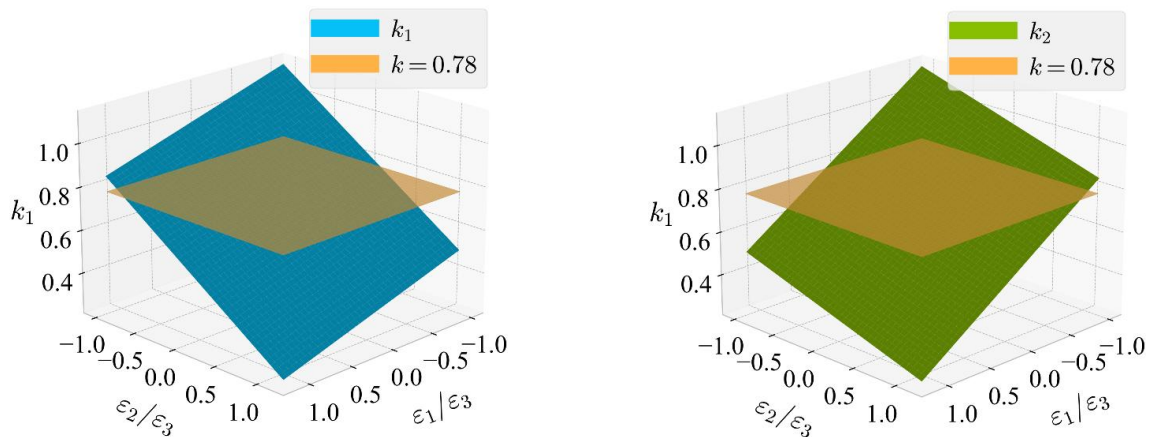
Нагрузка	$\varepsilon_1^0 \times 10^{-12}$	$\varepsilon_2^0 \times 10^{-12}$	$\varepsilon_3^0 \times 10^{-12}$	$(\Delta\lambda_1/\lambda_B)^0 \times 10^{-12}$	$(\Delta\lambda_2/\lambda_B)^0 \times 10^{-12}$	$k_1$	$\delta_1, \%$	$k_2$	$\delta_2, \%$
$P_x = P_0$	-2.2	-1.8	12	9.3	9.4	0.78	0.31	0.79	1.1
$P_y = P_0$	2.2	-1.3	-0.48	-0.81	-0.26	1.68	110	0.55	30
$P_z = P_0$	20	1.9	-5.7	-7.3	-10.2	1.27	62	1.77	130

Таблица 3.2 — Результаты оценки погрешности определения деформаций.

Однородная модель без образования смоляного кармана

Нагрузка	$\varepsilon_1^0 \times 10^{-12}$	$\varepsilon_2^0 \times 10^{-12}$	$\varepsilon_3^0 \times 10^{-12}$	$(\Delta\lambda_1/\lambda_B)^0 \times 10^{-12}$	$(\Delta\lambda_2/\lambda_B)^0 \times 10^{-12}$	$k_1$	$\delta_1, \%$	$k_2$	$\delta_2, \%$
$P_x = P_0$	-2.3	-1.8	12	9.3	9.34	0.78	0.33	0.79	1.2
$P_y = P_0$	-3.5	9.6	-0.44	-2.6	-0.55	5.87	650	1.23	58
$P_z = P_0$	19	-2.6	-5.3	-5.6	-9.0	1.04	-33	1.69	120

В таблице 3.1 и таблице 3.2 приведены значения  $k_1$  и  $k_2$ , которые обеспечивают по формулам  $\Delta\lambda_1/\lambda_B = k_1\varepsilon_3$ ,  $\Delta\lambda_2/\lambda_B = k_2\varepsilon_3$  достоверные значения деформаций. Практический интерес представляют зависимости  $k_1$  и  $k_2$  относительно плоскости  $k = 0.78$  в координатах  $\varepsilon_2/\varepsilon_3$ ,  $\varepsilon_1/\varepsilon_3$ , представленные на рисунке 3.2 [120].

Рисунок 3.2 — Зависимости  $k_1$  и  $k_2$  от компонент тензора деформаций

Полученные результаты позволяют сделать заключение, что при использовании допущения об одноосном напряженном состоянии в зоне встроенной в материал брэгговской решетки, меньшие погрешности при вычислении деформаций на основе экспериментальных данных достигаются при измерении максимальной компоненты тензора деформаций и, соответственно, расположении оптического волокна вдоль этой компоненты.

Данный вывод демонстрируется результатами эксперимента для прямоугольной пластины ( $50 \times 300 \times 5$  мм) из ПКМ с симметричными вырезами в виде полукруга (Рисунок 3.3). В отличие от известных экспериментов, демонстрирующих возможность измерения деформаций встроенными в материал ВОД, данный образец обеспечивает при одноосном нагружении существенную неоднородность распределения деформаций вдоль длины. В образцы встроены оптические волокна, на которых расположены ВОД на брэгговских решётках, имеющих длину 5 мм.

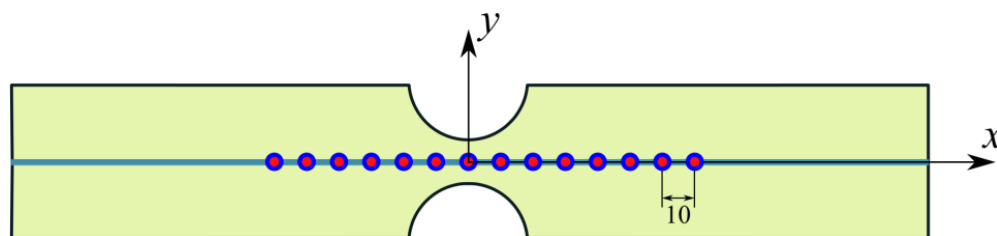


Рисунок 3.3 — Образец с вырезами в виде полукруга с внедрёнными ВОД

ПКМ на основе препрега стеклопластика, имеет следующие механические характеристики: модуль упругости при растяжении по основе  $E_x = 26.5$  ГПа; модуль упругости при растяжении по утку  $E_y = 26.5$  ГПа; модуль упругости при растяжении перпендикулярно плоскости слоя  $E_z = 6$  ГПа; модули сдвига  $G_{xy} = 4$  ГПа,  $G_{xz} = 3$  ГПа,  $G_{yz} = 3$  ГПа; коэффициенты Пуассона:  $\nu_{xy} = 0.14$ ,  $\nu_{xz} = 0.14$ ,  $\nu_{yz} = 0.18$ . Технологический процесс прямого прессования включает следующие основные операции: выкладку на технологическую оснастку 20 слоёв препрега; укладку оптоволоконных датчиков между 10-м и 11-м слоями; сборку

технологического пакета для проведения подпрессовки материала; проведение режима полимеризации; демонтаж технологического пакета. Процесс полимеризации и отверждения пластины из ПКМ с внедрёнными ВОД осуществлялся на прессе Langzauner.

Измерения неоднородных полей деформаций с использованием ВОД, встроенных в ПКМ, проводились при одноосном растяжении образца. Для испытаний на одноосное растяжение была использована универсальная электромеханическая система Instron 5982. Для анализа полученных экспериментальных результатов, в рамках модели линейной теории упругости, выполнен расчет напряжённо-деформированного состояния образцов методом конечных элементов в трёхмерной постановке задачи. Вычисление деформаций на основе полученной с ВОД информации об изменении резонансной длины волны отраженного спектра для каждого датчика проводилось по соотношению (1.6).

На рисунке 3.4 представлены результаты распределения деформаций вдоль осевой линии образца при силе  $F = 7$  кН, полученные на основе показаний ВОД, оптической системы VIC-3D и численного моделирования методом конечных элементов [121]. Отличие результатов измерений, полученных с помощью ВОД, от данных оптической измерительной системы и численного моделирования не превышает 6%.

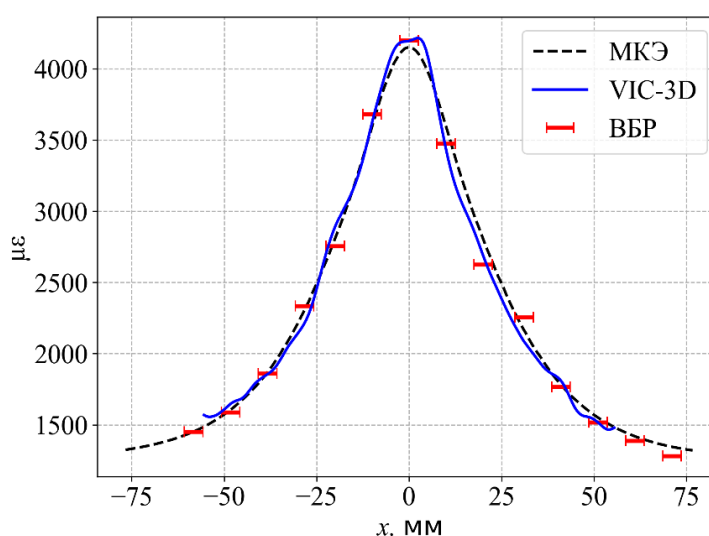


Рисунок 3.4 — Распределение деформаций в образце с вырезами в виде полукруга

В данном эксперименте деформация  $\varepsilon_x$  больше других компонент тензора деформаций, и использование допущения об одноосном напряжённом состоянии в оптическом волокне позволяет получить приемлемые результаты при измерении деформаций ВОД на брэгговских решётках.

Для любых волоконно-оптических датчиков, фиксируемых на поверхности соединительным материалом, при измерении деформаций возникают погрешности от двух факторов. Первый из них связан с различием деформации, которая регистрируется датчиком и измеряемой деформацией на поверхности материала. Это является следствием неоднородности распределения деформаций от сердцевины оптического волокна до поверхности материала или зоны измерения (Рисунок 3.5).

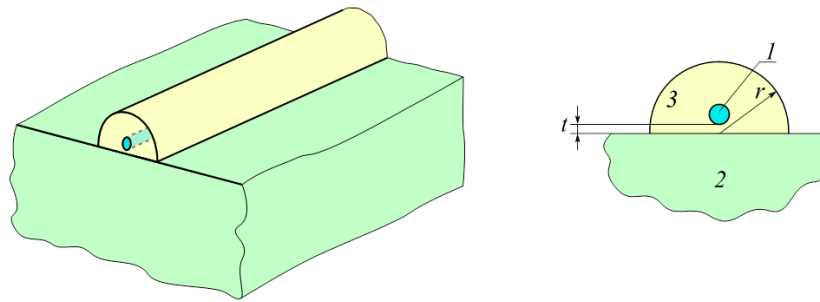


Рисунок 3.5 — Геометрическая модель оптического волокна, фиксированного на поверхности материала: 1 – оптическое волокно; 2 – материал, в котором измеряются деформации; 3 – соединительный материал

Второй фактор связан с изменением деформаций в зоне их измерения, вызванным фиксацией оптического волокна на поверхности материала, и даёт ответ на вопрос, какие деформации измеряются. Для этой оценки необходимо сравнить деформации в зоне измерения без оптического волокна и при его наличии на поверхности материала.

В фиксированном на поверхности материала оптическом волокне будет иметь место сложнапряженное состояние, количественные характеристики которого определяются свойствами материалов в зоне измерения и геометрией



соединения. В связи с этим, для ВОД на брэгговских решетках, также может иметь место погрешность при использовании для вычисления деформаций допущения об одноосном напряженном состоянии в зоне датчика.

Для численного анализа измеряемых деформаций предлагается модель, представленная на рисунке 3.6.

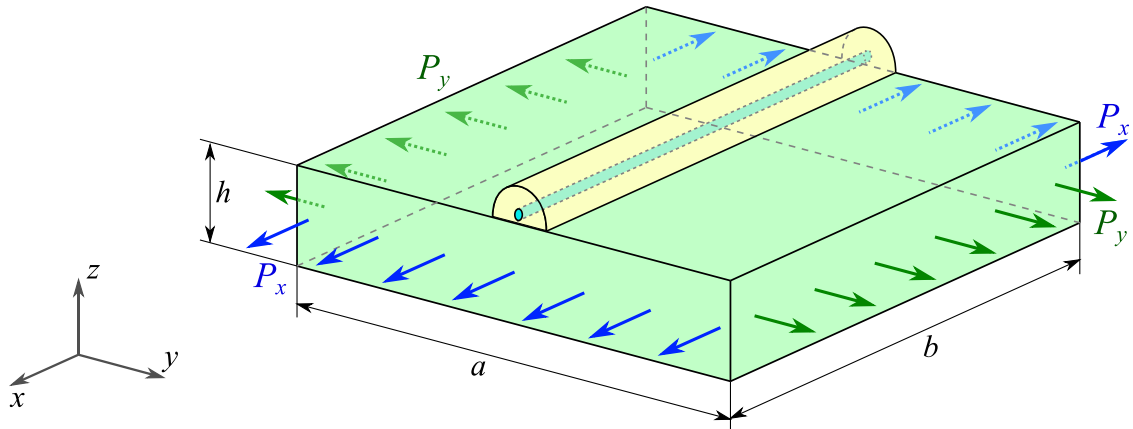


Рисунок 3.6 — Модель пластины, на поверхности которой зафиксировано оптическое волокно с брэгговской решёткой

Модельный образец с размерами  $a = b = 50$  мм,  $h = 5$  мм нагружается по боковым граням поверхностными равномерно распределёнными усилиями  $P_x$  и  $P_y$ . Реализация различных по величине и знаку комбинаций усилий  $P_x$  и  $P_y$  позволяет получить различные варианты комбинаций деформаций  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  в средней части верхней поверхности параллелепипеда, которая является зоной измерения деформаций датчиком на брэгговской решётке.

Моделирование проводилось в рамках модели линейно-упругого материала. Для численных расчётов использовался метод конечных элементов, реализованный в программном пакете ANSYS. Дискретизация рассматриваемой области проводилась на основе трёхмерных конечных элементов тетраэдральной и призматической форм с квадратичной аппроксимацией перемещений и с использованием сгущения конечно-элементной сетки к сердцевине оптического волокна (Рисунок 3.7). Для выбора степени дискретизации расчётной области,

обеспечивающей минимальную погрешность результатов расчёта, был выполнен анализ асимптотической зависимости результатов от размера конечных элементов. Выполненные численные расчеты позволили выбрать конечно-элементные сетки, обеспечивающие погрешность вычисления деформаций в пределах 0.3%.

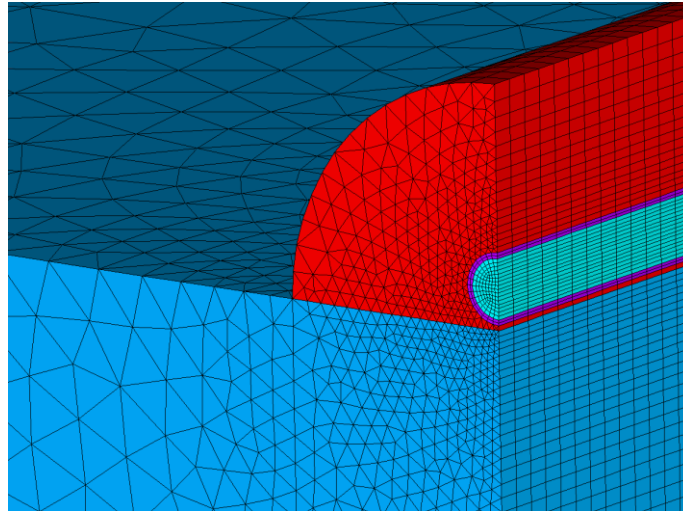


Рисунок 3.7 — Сетка конечных элементов в окрестности зоны крепления оптического волокна

Результаты моделирования позволяют оценить градиент деформаций от сердцевины брэгговской решётки до зоны измеряемой деформации и, как следствие, отличие между деформацией, фиксируемой датчиком, и реальной деформацией. Моделирование также позволяет оценить изменение значений деформаций вследствие размещения оптического волокна и связующего материала на поверхности объекта измерения.

Для оценки погрешности, связанной с использованием при вычислении деформаций допущения об одноосном напряженном состоянии в зоне брэгговской решетки, используется ранее описанный алгоритм оценки погрешности для ВОД, встроенного в материал.

В рамках рассматриваемого алгоритма оценки погрешности вычисления деформаций выполнена серия численных экспериментов при различных механических характеристиках материала, в котором измеряются деформации,

соединительного материала и при различных параметрах геометрии области фиксации оптического волокна —  $t$ ,  $r$ . Каждая из комбинаций механических и геометрических параметров рассматривалась при нагрузках, действующих вдоль волокна ( $P_x = P_0$ ,  $P_y = 0$ ) и при нагрузках, действующих поперек волокна ( $P_x = 0$ ,  $P_y = P_0$ ).

В первой серии расчётов рассматривалось оптическое волокно на поверхности металлического образца с механическими характеристиками  $E = 210$  ГПа,  $\nu = 0.3$  и использование соединительного материала с характеристиками  $E_a = 2.9$  ГПа,  $\nu_a = 0.36$  (эпоксидный клей). Рассмотрены следующие варианты геометрических размеров соединительного материала: варьирование радиуса  $r = 0.25 \div 2.5$  мм при  $t = 0.01$  мм, и варьирование зазора  $t = 0 \div 0.25$  мм при  $r = 0.5$  мм. Для оценки влияния на погрешность вычисления деформаций механических характеристик материала, в котором измеряются деформации, наряду с металлическим образцом рассмотрены варианты варьирования модуля упругости материала  $E = 1 \div 500$  ГПа, при  $\nu = 0.3$  и варианты варьирования коэффициента Пуассона  $\nu = 0.1 \div 0.5$ , при  $E = 210$  ГПа. Рассмотрены примеры фиксации волоконно-оптического датчика на поверхности анизотропных композиционных материалов: стеклопластика — с приведенными ранее в работе механическими характеристиками и углепластика — с эффективными механическими характеристиками, приведёнными в таблице 2.2.

Результаты численных экспериментов позволяют сделать следующие выводы [122]. При измерении деформаций на поверхности изотропного металлического образца для вариантов геометрий соединительного материала  $t = 0.01$  мм,  $r = 0.2 \div 2.5$  мм и  $t = 0.01 \div 0.2$  мм,  $r = 2.5$  мм при нагрузках, направленных вдоль оптического волокна, величины деформаций  $\varepsilon_3^{E_1}$ ,  $\varepsilon_3^{E_2}$  близки друг к другу и погрешности  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  не превышают 1%. При нагрузках, направленных перпендикулярно оптическому волокну, отличия деформаций  $\varepsilon_3^{E_1}$  и  $\varepsilon_3^{E_2}$  и, соответственно, величин  $\delta_1$  и  $\delta_2$  (Рисунок 3.8) более существенны. Для

рассмотренных вариантов  $t$  и  $r$ , величина  $\delta_1$  меньше 1%, а  $\delta_2$  достигает 6%. Это означает, что при достаточно больших нагрузках и, соответственно, больших значениях деформаций, отличие величин  $\Delta\lambda_1/\lambda_B$  и  $\Delta\lambda_2/\lambda_B$  может быть значительным и привести, в реальной экспериментальной информации, к появлению двух пиков на отраженном оптическом спектре. Оценка влияния механических характеристик материала, в котором измеряются деформации, показала, что изменение модуля упругости материала от 1 ГПа до 500 ГПа незначительно отражается на величинах  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . Изменение коэффициента Пуассона при нагрузках, направленных вдоль оптического волокна также незначительно отражается на величинах  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , но при нагрузках, направленных перпендикулярно волокну, при уменьшении коэффициента Пуассона до нуля, величины  $\delta_1$  и  $\delta_2$  начинают нелинейно возрастать. Например, при  $t = 0.01$  мм,  $r = 0.5$  мм,  $E = 210$  ГПа,  $\nu = 0.05$ ,  $\delta_1 = 8\%$ ,  $\delta_2 = 35\%$ . Большие значения  $\delta_1$  и  $\delta_2$  имеют место при коэффициенте Пуассона, близком к нулю и, как следствие, измеряемая компонента тензора деформаций по абсолютной величине существенно меньше других компонент. Поэтому большие величины погрешностей для деформаций, вычисленных по соотношению (1.6), с практической точки зрения не имеют значения.

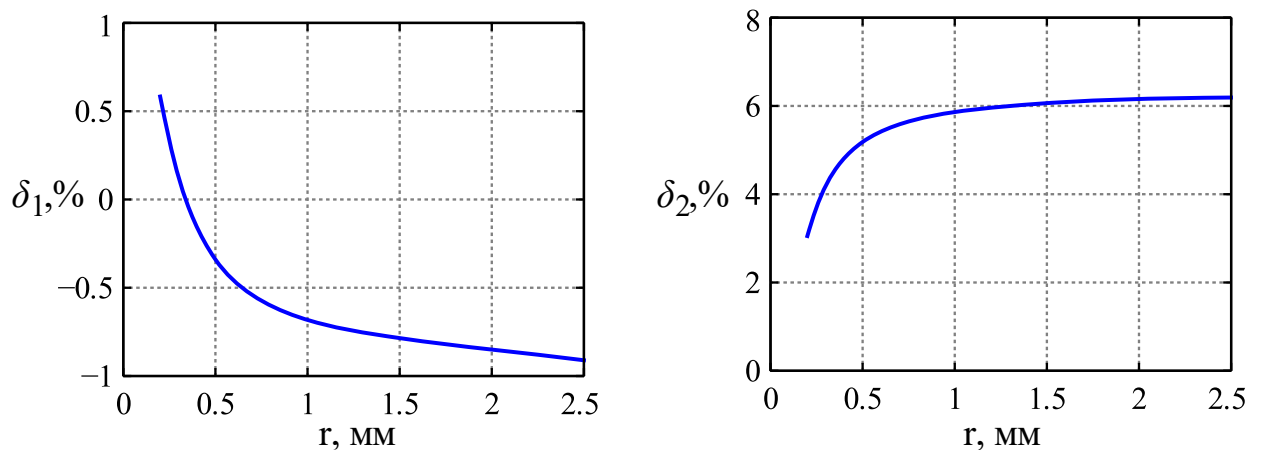


Рисунок 3.8 — Значения  $\delta_1$  и  $\delta_2$  при  $t = 0.01$  мм, нагрузках  $P_x = 0$ ,  $P_y = P_0$  и различных значениях  $r$  для изотропного материала

При измерении деформаций в композиционных материалах с анизотропными свойствами различие между  $\varepsilon_3^{E_1}$  и  $\varepsilon_3^{E_2}$  может проявляться более ярко в зависимости от ориентации нагрузок относительно оптического волокна. Расчёты, выполненные для стеклопластика и углепластика при тех же вариантах геометрии соединения волокна с поверхностью материала, дали следующие численные результаты. При нагрузках, действующих вдоль оптического волокна, погрешности  $\delta_1$  и  $\delta_2$  не превышают одного процента. При нагрузках, действующих перпендикулярно оптическому волокну, для стеклопластика величина  $\delta_1$  не превышает 1%,  $\delta_2$  может достигать 12%, а для углепластика  $\delta_1$  не превышает 6%, а  $\delta_2$  для некоторых рассматриваемых вариантов  $t$  и  $r$  может достигать 45%. Пример одной из зависимостей  $\delta_1$  и  $\delta_2$  от геометрических размеров соединения для углепластика представлен на рисунке 3.9.

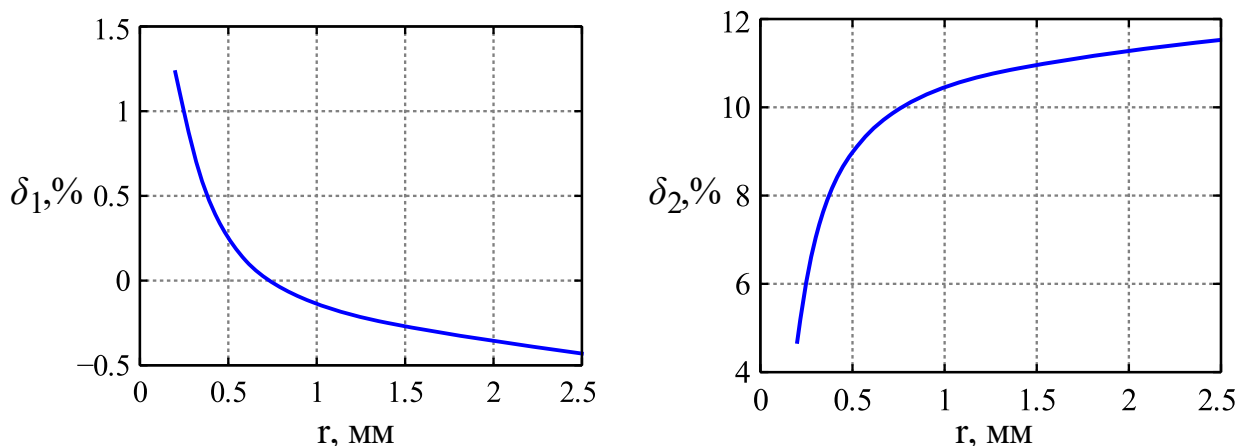


Рисунок 3.9 — Значения  $\delta_1$  и  $\delta_2$  при  $t = 0.01$  мм,  $P_x = 0$ ,  $P_y = P_0$  и различных значениях  $r$  для анизотропного материала

Наряду с соединительным материалом, имеющим в поперечном сечении форму полуокружности, были выполнены расчёты для вариантов с эллиптической и прямоугольной геометрией (Рисунок 3.10).

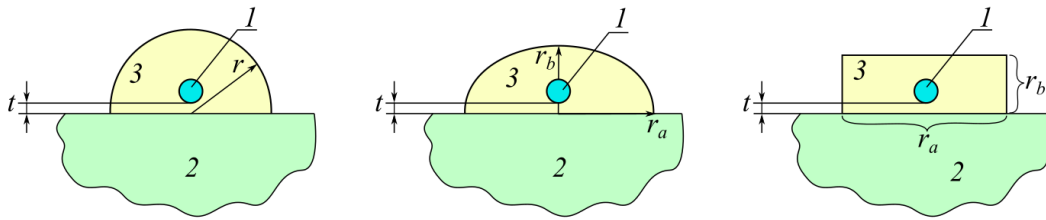


Рисунок 3.10 — Варианты геометрий соединений волокна с поверхностью материала

Сопоставление разных вариантов при одинаковых объёмах соединительного материала показало, что при равных расстояниях волокна от поверхности материала —  $t$ , величины  $\delta_1$  и  $\delta_2$  практически не отличаются. Подтверждением этого заключения являются следующие численные результаты. При равных объёмах соединительного материала были выполнены расчёты при различных геометриях поперечного сечения: в форме полуокружности при  $r = 0.5$  мм, эллиптической с осями эллипса  $r_a/r_b = 0.64 \div 2.56$ , прямоугольной со сторонами  $r_a/r_b = 1 \div 4$  и при  $t = 0.001$  мм. Для всех этих вариантов величины погрешностей изменяются в диапазоне  $\delta_1 = 0.08 \div 1.27\%$ ,  $\delta_2 = 8.16 \div 11.19\%$ .

Анализ полей деформаций при рассмотренных геометриях соединения оптического волокна и материала, а также при заданных характеристиках материала показал, что деформации в зоне брэгговской решётки вдоль её длины отличаются от измеряемой деформации в пределах 2%. Это означает, что для материалов с механическими характеристиками, близкими к рассмотренным в работе, при зазоре между оптическим волокном и материалом меньше 1 мм, можно пренебречь градиентом деформаций от сердцевины волокна до поверхности измерения деформации.

Для оценки изменения измеряемой деформации, возникающего вследствие размещения оптического волокна на поверхности материала, были выполнены расчёты при разных размерах и механических характеристиках соединительного материала. Для модели, представленной на рисунке 3.6, получены значения деформаций  $\varepsilon_x'$  в зоне измерения без оптического волокна и деформаций  $\varepsilon_x''$  с

фиксированным на поверхности волокном при нагрузках, действующих вдоль оптического волокна. На рисунке 3.11а приведены результаты при различных значениях модуля упругости соединительного материала  $E_a$  и при  $\nu_a = 0.36$ ,  $r = 2.5$  мм,  $t = 0.001$  мм, а на рисунке 3.11б — при  $E_a = 2.9$  ГПа,  $\nu_a = 0.36$ ,  $t = 0.001$  мм и различных вариантах  $r$ .

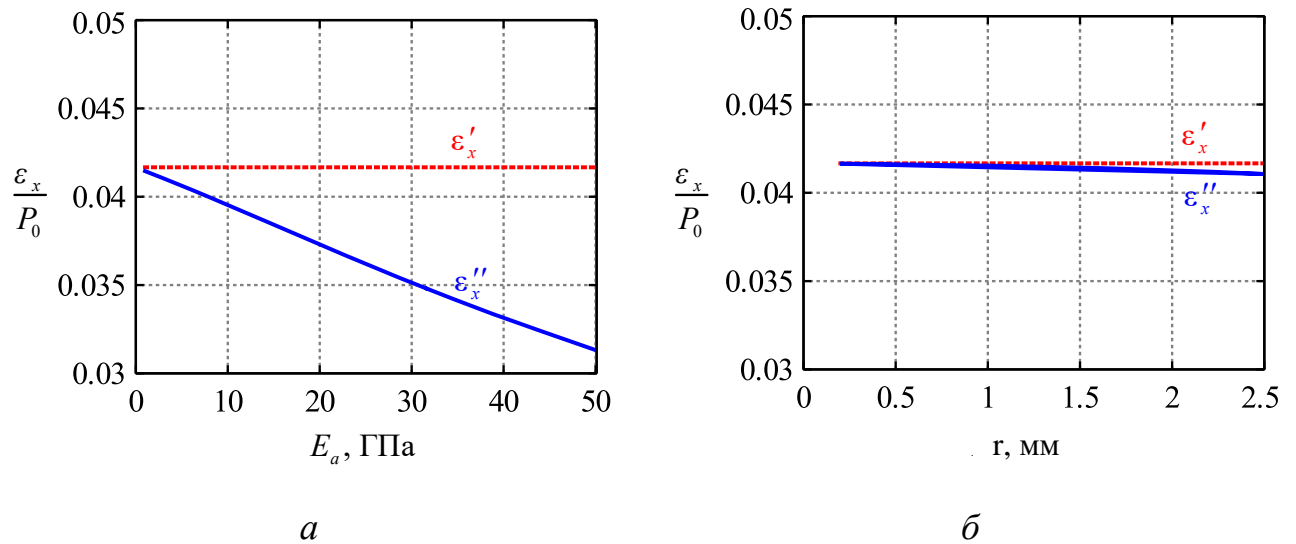


Рисунок 3.11 — Деформации в зоне измерения без оптического волокна ( $\varepsilon'_x$ ) и при фиксированном на поверхности оптическом волокне ( $\varepsilon''_x$ )

Приведенные результаты демонстрируют, что изменение деформаций в зоне измерения вследствие размещения на поверхности оптического волокна может иметь место, но для рассматриваемых материалов эти изменения незначительны.

### 3.2. Численный и экспериментальный анализ результатов измерения деформаций встроенными в материал розетками из ВОД на брэгговских решётках

Датчики деформаций, в том числе ВОД, измеряют одну из компонент тензора деформаций. Для получения более полной информации о тензоре деформаций

наиболее распространены розетки, представляющие собой комбинацию из трех датчиков, расположенных под разными углами друг к другу.

В настоящем подразделе приводятся экспериментальные результаты по измерению деформаций розетками из датчиков на основе ВБР, встроенными в полимерный композиционный материал образца при сложнапряженном состоянии [123]. Рассматриваются схемы и результаты численного моделирования, трактующие эксперимент. Рассмотрен вариант оценки погрешности вычисления деформаций, на основе измеряемых физических величин.

Для экспериментов по измерению деформаций розетками из волоконно-оптических датчиков на основе брэгговских решеток, встроенными в ПКМ, выбран образец в форме креста (Рисунок 3.12). При испытаниях на установке для двухосного растяжения в таком образце реализуется сложнапряжённое состояние. Для получения достоверных значений деформаций в зоне расположения розетки не должно быть больших градиентов деформаций. Результаты численного моделирования напряжённо-деформированного состояния образца методом конечных элементов при различных комбинациях нагрузок  $P_1$  и  $P_2$  позволяют сделать заключение, что при выбранных размерах образца в зоне расположения розетки будет обеспечиваться однородное напряжённое состояние.

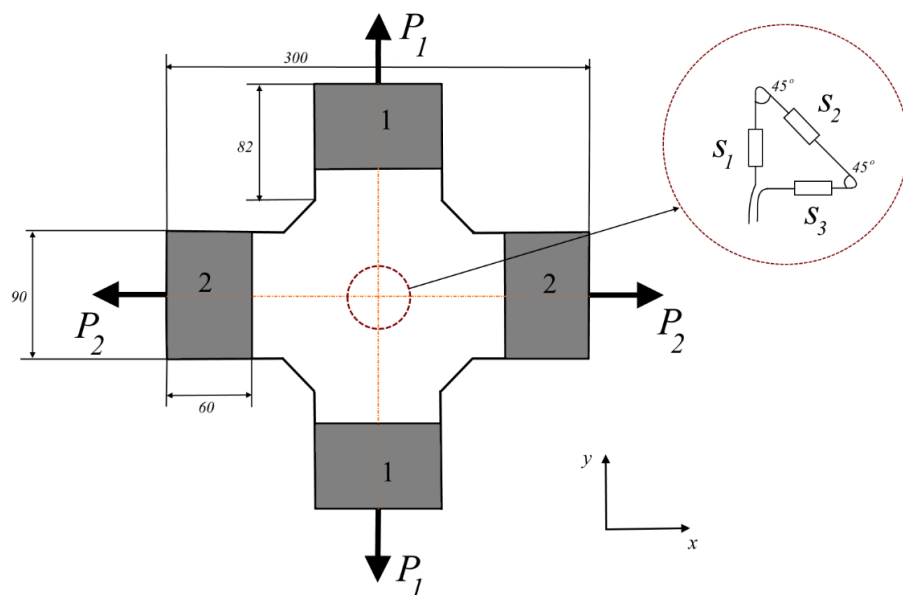


Рисунок 3.12 — Экспериментальный образец в форме креста



Выбранная форма образца, при условии упругого поведения материала в диапазоне испытываемых нагрузок, позволяет получить экспериментальные результаты для сложнапряженного состояния при испытаниях на одноосных машинах растяжения. Этот вариант использовался в настоящей работе. Эквивалентом двухосного растяжения усилиями  $P_1$  и  $P_2$  является сумма двух экспериментов: при захватах зон 1 — нагружение усилиями  $P_1$ , и при захватах зон 2 — нагружение усилиями  $P_2$ .

Образцы из ПКМ были получены методом прямого прессования из двадцати слоёв препрега стеклопластика с ранее указанными механическими характеристиками. Толщина образца при этом составляет 5 мм.

Розетка из трех датчиков на волоконных брэгговских решетках была встроена между вторым и третьим слоями ПКМ при технологическом процессе формирования материала, на этапе выкладки слоев препрега на оснастку. Используемые датчики имеют длину брэгговской решетки 5 мм. Выбранные размеры розетки обеспечивают минимальную зону измерения деформаций, а радиус изгиба для используемого диаметра оптического волокна не искажает пропускаемый через волокно оптический сигнал.

Рассматриваемый в работе образец растягивается при захвате зон 1 (направление 1) и при захвате зон 2 (направление 2). Диаграмма нагружения приведена на рисунке 3.13. При всех уровнях нагрузок в направлении 1 и в направлении 2 на отраженных спектрах ВБР не зафиксировано явно выраженных двух пиков.

В качестве примера на рисунке 3.14 приведены отражённые оптические спектры для первого, второго и третьего датчиков в ненагруженном состоянии и при нагружении в направлениях 1 и 2.

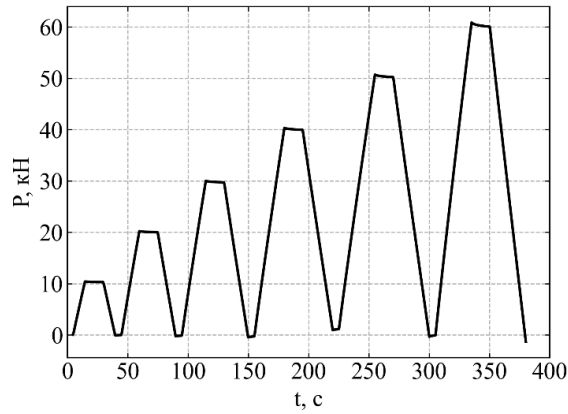


Рисунок 3.13 — Диаграмма нагружения

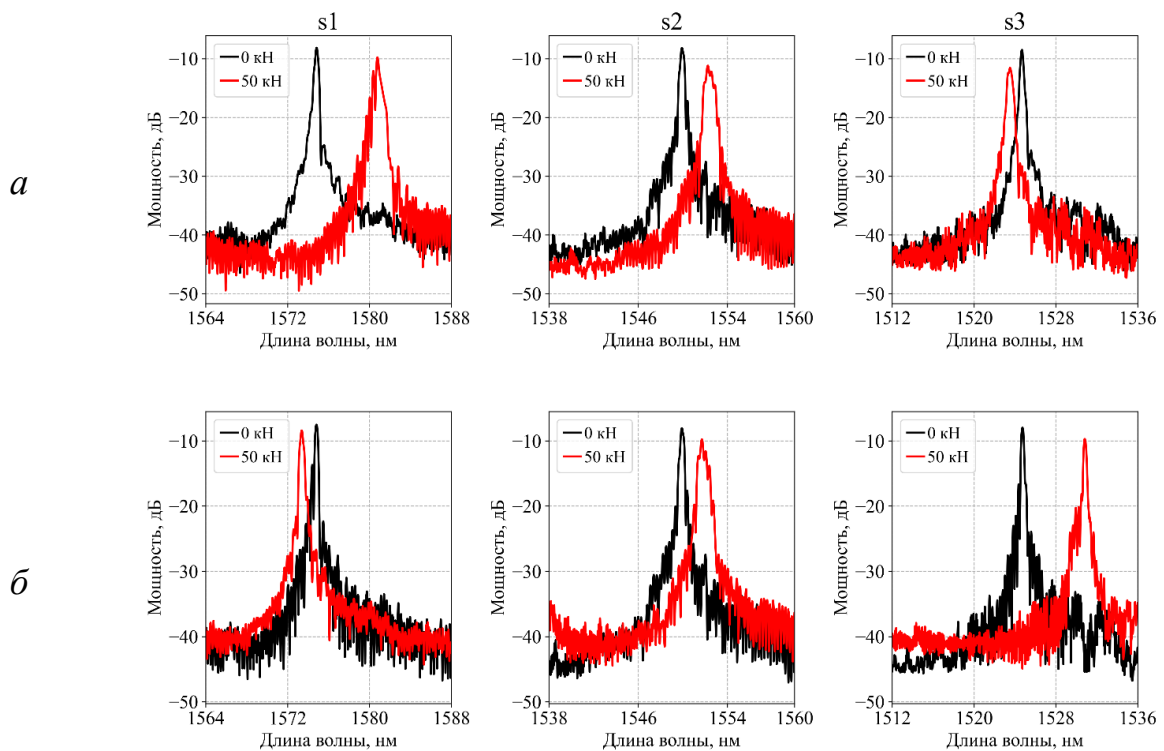


Рисунок 3.14 — Отражённые оптические спектры в ненагруженном состоянии и при нагружениях  $P_1 = 50$  кН в направлении 1 (а) и  $P_2 = 50$  кН направлении 2 (б)

Отсутствие двух пиков на отраженном спектре может быть объяснено результатами следующих численных экспериментов. Рассмотрим элемент из ПКМ, представленный на рисунке 3.15а, который отражает структуру напряжённо-деформированного состояния в зоне образца, где встроена розетка. В элемент

встроено оптическое волокно с брэгговской решеткой, которое идеально контактирует с материалом. Механическое поведение ПКМ описывается моделью упругого ортотропного тела с механическими характеристиками ПКМ из стеклопластика, приведенными ранее в работе. На основе метода конечных элементов в пакете инженерных расчетов ANSYS для элемента со встроенным оптическим волокном выполнены расчеты напряжённно-деформированного состояния при нагрузках, действующих вдоль оптического волокна ( $F_1 = P_0$ ,  $F_2 = 0$ ) и перпендикулярно оптическому волокну ( $F_1 = 0$ ,  $F_2 = P_0$ ). На основе найденных значений деформаций  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  в зоне брэгговской решетки по соотношениям (1.5) находятся теоретические значения величин  $\Delta\lambda_1/\lambda_B$ ,  $\Delta\lambda_2/\lambda_B$ . В таблице 3.3 представлены результаты при величине  $P_0$ , соответствующей нагрузкам  $P_1$  и  $P_2$  в 50 кН.

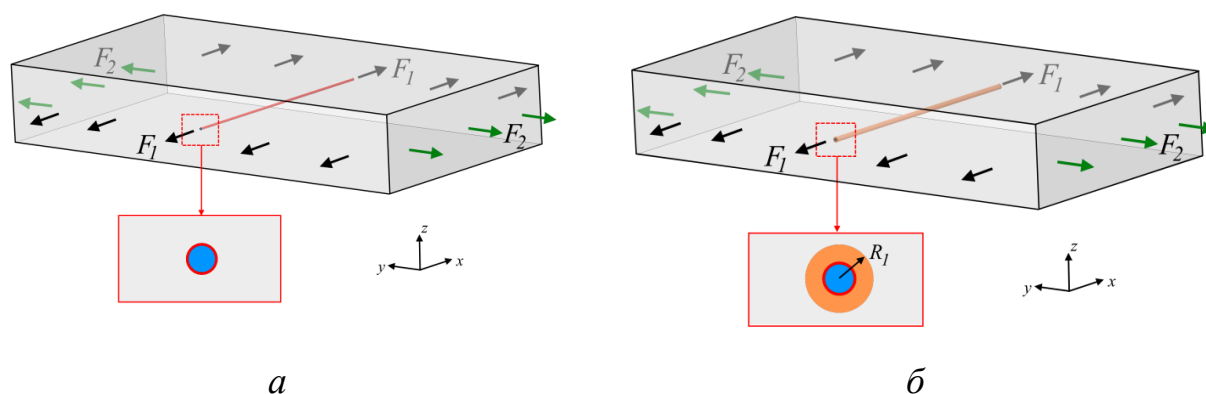


Рисунок 3.15 — Модели ПКМ со встроенным оптическим волокном без смоляного кармана (а), и со смоляным карманом (б)

Таблица 3.3 — Результаты численных расчётов значений деформаций и сдвигов резонансных длин волн для модели ПКМ со встроенным оптическим волокном без смоляного кармана

	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	$\Delta\lambda_1/\lambda_B$	$\Delta\lambda_2/\lambda_B$	$ \Delta\lambda_2 - \Delta\lambda_1 $ , нм
$F_1 = P_0, F_2 = 0$	-0.0007	-0.0007	0.0043	0.0033	0.0033	0.0034
$F_1 = 0, F_2 = P_0$	-0.0004	0.0015	-0.0006	-0.0008	-0.0005	0.47

Известные теоретические и экспериментальные результаты показывают, что при встраивании оптического волокна в ПКМ может возникать технологический дефект, называемый смоляным карманом [72]. Этот дефект представляет собой образование области вокруг оптического волокна, заполненной связующим. Геометрия этой области зависит от схемы армирования ПКМ и ориентации оптического волокна относительно направления армирования. Для оценки структуры материала в окрестности оптического волокна, встроенного в ПКМ с плетёной структурой армирования, были получены шлифы сечений образцов, перпендикулярных оптоволокну. На рисунке 2.8 приведены изображения сечений при 140-кратном увеличении. Анализ изображений позволяют сделать заключение, что вокруг оптического волокна имеется область, заполненная связующим, размеры которой сопоставимы с диаметром оптического волокна. Данный результат являлся основанием для корректировки модели ПКМ со встроенным оптическим волокном, представленной на рисунке 3.15а. На рисунке 3.15б представлен вариант модели, в которой вокруг оптического волокна имеется область, заполненная связующим. Геометрия этой области определяется величиной  $\alpha = R_1/R_0$ , где  $R_0$  — радиус оптического волокна,  $R_1$  — внешний радиус области, заполненной связующим.

Для уточненной модели ПКМ со встроенным оптическим волокном и областью, заполненной связующим, были выполнены расчеты деформаций в зоне брэгговской решетки и получены соответствующие теоретические значения величин  $\Delta\lambda_1/\lambda_B$ ,  $\Delta\lambda_2/\lambda_B$  при разных значениях  $\alpha$ , которые приведены на рисунке 3.16.

Полученные результаты показывают, что при нагружении вдоль оптического волокна  $\Delta\lambda_1/\lambda_B$  и  $\Delta\lambda_2/\lambda_B$  практически не отличаются друг от друга при различных значениях  $\alpha$ , а при нагружении поперек оптического волокна в отраженном спектре наблюдаются два пика, которые сближаются с увеличением размера слоя связующего материала.

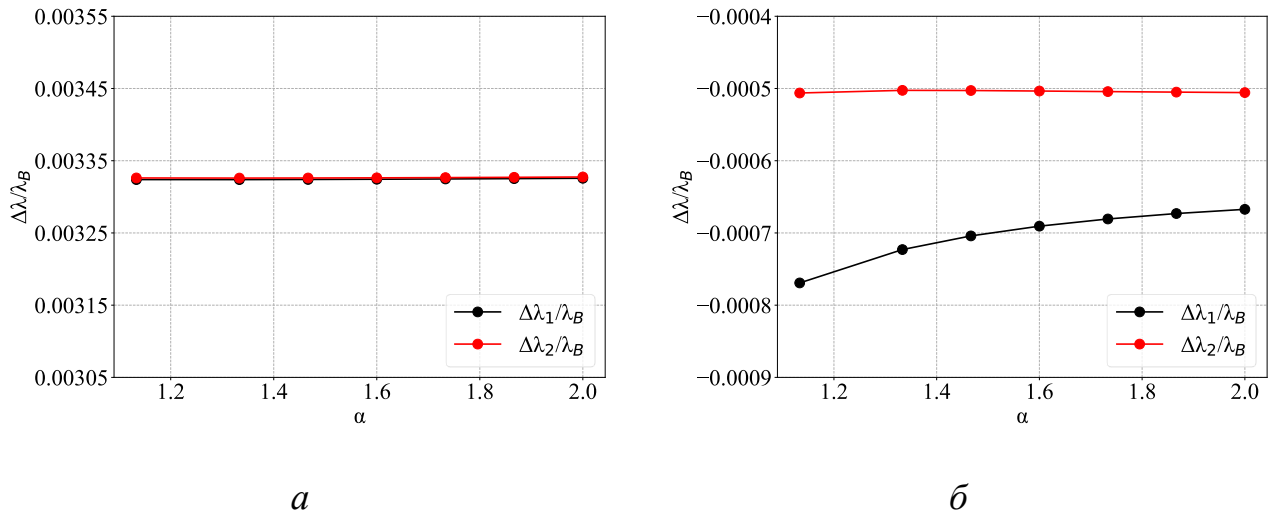


Рисунок 3.16 — Значения  $\Delta\lambda_1/\lambda_B$  и  $\Delta\lambda_2/\lambda_B$  при разных значениях  $\alpha$  и нагрузках  $F_1 = P_0, F_2 = 0$  (а);  $F_1 = 0, F_2 = P_0$  (б)

Количественный анализ величин  $\Delta\lambda_1$  и  $\Delta\lambda_2$  показывает, что  $|\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2|$  при разных вариантах нагрузок остаётся меньше ширины пика отраженного спектра. Данные результаты позволяют сделать вывод о том, что в реализуемом эксперименте на суммарной картине отраженного спектра два пика сливаются вместе.

Различие между величинами  $\Delta\lambda_1/\lambda_B$ ,  $\Delta\lambda_2/\lambda_B$  увеличивается с ростом нагрузки. Для выбранных схем нагружения, при нагрузках, обеспечивающих упругое поведение ПКМ, не удалось получить два пика на отраженном спектре. При другом варианте нагрузки, распределённой по поверхности (Рисунок 3.17), при давлении выше 34 кН на отраженном спектре появляются два пика, расстояние между которыми увеличивается с ростом давления. Данные результаты представлены на рисунке 3.18.



Рисунок 3.17 — Нагружение образца со встроенной розеткой из ВБР

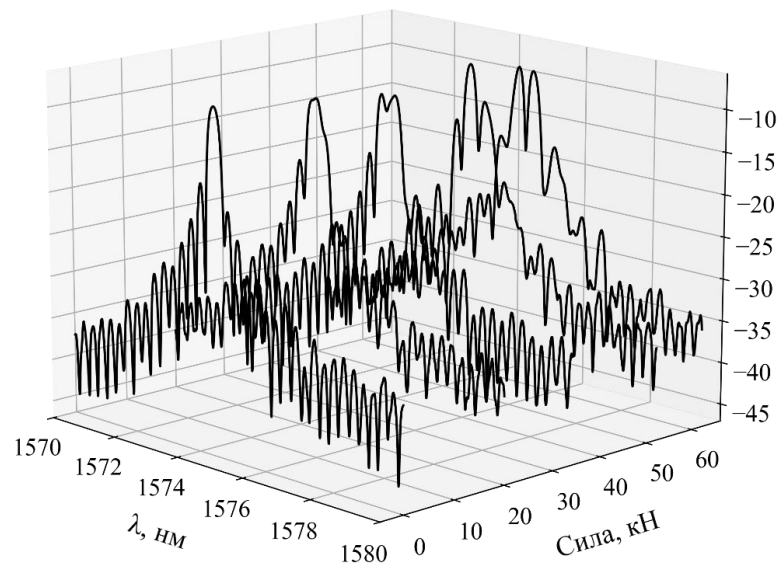


Рисунок 3.18 — Отражённые оптические спектры ВБР при различных по величине нагрузках

Для схемы нагружения, представленной на рисунке 3.12, на рисунке 3.19 приведены значения деформаций, измеренные датчиками  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$  при растяжении образца в направлении 1.

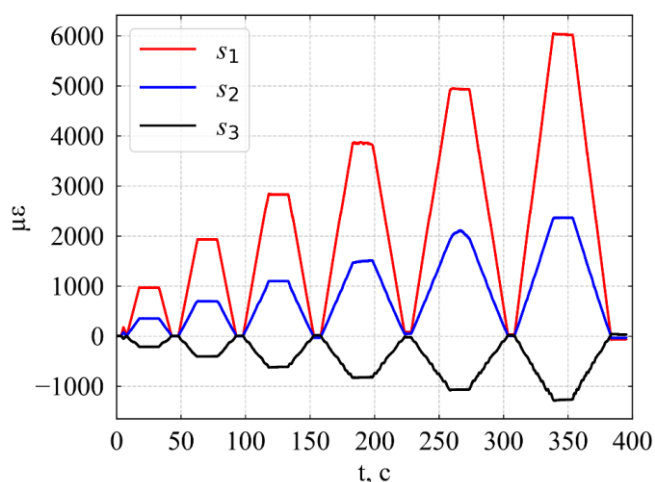


Рисунок 3.19 — Значения деформаций, измеренных датчиками  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$  при растяжении образца в направлении 1

Полученные результаты демонстрируют линейно-упругое поведение материала при заданных уровнях нагрузки. В ходе экспериментов параллельно проводились измерения деформаций с использованием оптической системой VIC-3D. Отличие результатов измерений, полученных двумя методами, не превышало 6%.

На рисунке 3.20 приведены значения деформаций при разных значениях нагрузок и растяжении в направлениях 1 и 2.

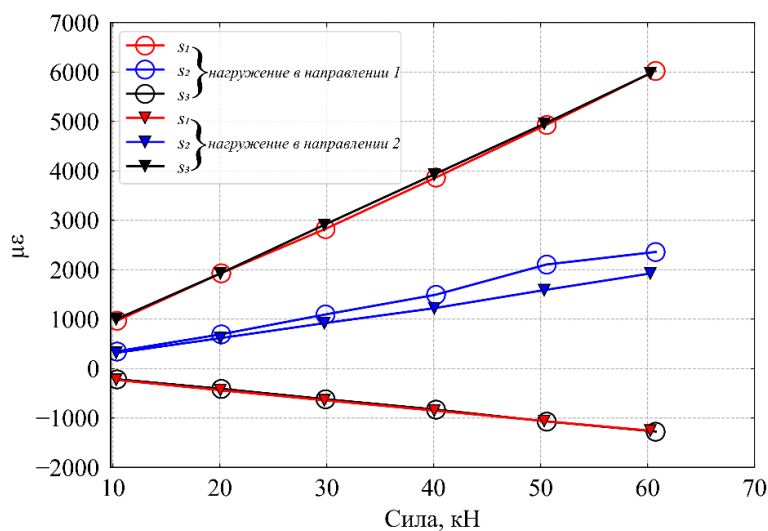


Рисунок 3.20 — Деформации при разных значениях нагрузок и растяжении в направлениях 1 и 2

Для рассматриваемого образца и одинаковых величин нагрузок в направлениях 1 и 2 показания датчиков  $s_1, s_3$  при нагружении вдоль направления 1 должны совпадать с показаниями датчиков  $s_3$  и  $s_1$  при нагружении вдоль направления 2, а показания датчика  $s_2$  должны совпадать при нагружениях вдоль направлений 1 и 2. Анализ полученных результатов показывает, что отличие значений деформаций, полученных на основе показаний датчиков  $s_1$  и  $s_3$  при нагружениях вдоль направлений 1 и 2 находится в пределах 6%, а деформации, полученные на основе показаний датчика  $s_2$  при нагружении вдоль направлений 1 и 2 различаются на 25%. Большие различия деформаций, полученных на основе показаний датчика  $s_2$ , могут быть объяснены тем, что угол ориентации датчика  $s_2$  относительно оси нагружения отличается от  $45^\circ$ . Данное предположение следует из анализа уравнений для розеток:

$$\begin{aligned}\varepsilon_3^1 &= \varepsilon_x \cos^2 \theta_1 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_1 + \gamma_{xy} \sin \theta_1 \cos \theta_1 \\ \varepsilon_3^2 &= \varepsilon_x \cos^2 \theta_2 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_2 + \gamma_{xy} \sin \theta_2 \cos \theta_2 \\ \varepsilon_3^3 &= \varepsilon_x \cos^2 \theta_3 + \varepsilon_y \sin^2 \theta_3 + \gamma_{xy} \sin \theta_3 \cos \theta_3\end{aligned}\quad (3.1)$$

где  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  — угол между осью  $x$  и направлениями ориентации датчиков  $s_1, s_2, s_3$ ;  $\varepsilon_3^1, \varepsilon_3^2, \varepsilon_3^3$  — деформации вдоль оптического волокна для датчиков  $s_1, s_2, s_3$ , соответственно.

Полученные близкие значения деформаций  $\varepsilon_3^1$  и  $\varepsilon_3^3$  при нагружениях вдоль направлений 1 и 2 дают основания считать, что значения углов  $\theta_1 = 90^\circ$  и  $\theta_3 = 0^\circ$  обеспечены при встраивании розетки в материал. Учитывая, что  $\varepsilon_3^1 = \varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_3^3 = \varepsilon_x$  из уравнения (3.1) может быть получено соотношение для угла  $\theta_2$ :

$$\cos^2 \theta_2 = \frac{\varepsilon_3^2 - \varepsilon_3^1}{\varepsilon_3^3 - \varepsilon_3^1}\quad (3.2)$$

Из этого соотношения следует, что величина угла  $\theta_2$ , вычисленная на основе значений деформаций при нагружении вдоль направления 1 составляет  $43^\circ$ , а при



нагружении вдоль направления 2 —  $48^\circ$ . Эти результаты показывают, что величина угла  $\theta_2$  отлична от  $45^\circ$ .

Данные результаты демонстрируют, что при использовании встроенных в материал розеток небольшие погрешности в информации об угле ориентации датчиков приводят к дополнительной погрешности определяемых деформаций.

Соотношения (1.5), определяющие взаимосвязь компонент тензора деформаций в волоконной брэгговской решётке и характеристик отражённого спектра, демонстрируют в общем случае наличие в этом спектре двух пиков. В частном случае, при одноосном напряжённом состоянии в оптическом волокне соотношение (1.6) определяет однозначную связь между деформацией оптического волокна и одной резонансной длиной волны на отражённом оптическом спектре. При использовании допущения об одноосном напряжённом состоянии для вычисления деформаций во встроенном оптическом волокне и наличии в отражённом спектре двух пиков возникает проблема с их выбором для соотношения (1.6).

Численные эксперименты могут дать дополнительную информацию о границах погрешности при вычислении деформаций при использовании в соотношении (1.6) информации о каждом из пиков на отражённом оптическом спектре. В качестве цифровой модели рассматривается пластина со встроенной розеткой (Рисунок 3.21) при различных вариантах нагружения боковых граней нормальными равномерно распределёнными силами. Рассматривается вариант без учёта смоляного кармана. В соответствии с ранее приведёнными результатами моделирование без учёта смоляного кармана приведёт к получению верхней границы погрешности вычисленных деформаций. При моделировании материал представляется однородной средой с эффективными механическими характеристиками рассматриваемого ПКМ. Толщина пластины 5 мм, соответствует экспериментальному образцу. Размеры модели в плоскости определяют зону однородного напряжённого состояния на рисунке 3.12. Геометрические и механические характеристики оптического волокна приведены ранее в работе. На рисунке 3.21 представлены рассмотренные в численных

расчётах варианты розеток с различной ориентацией датчиков относительно внешних нагрузок.

Результатом цифровой модели эксперимента являются вычисленные для датчиков  $s_1, s_2, s_3$  по формулам (1.5) величины характеристик отражённого оптического спектра  $\Delta\lambda_1^i/\lambda_B^i$  и  $\Delta\lambda_2^i/\lambda_B^i$  ( $i = 1, 2, 3$  — соответствует номеру датчика  $s_1, s_2, s_3$ ) при значениях компонент тензора деформаций  $\varepsilon_1^i, \varepsilon_2^i, \varepsilon_3^i$  ( $i = 1, 2, 3$  — номер датчика) в волоконных брэгговских решётках, полученных при расчёте напряжённо-деформированного состояния пластины со встроенным оптическим волокном. Расчёты проводились методом конечных элементов в трёхмерной постановке с использованием сеток, обеспечивающих необходимую точность расчётов в оптическом волокне и его окрестности. Фрагмент конечно-элементной дискретизации со сгущением конечных элементов к оптическому волокну представлен на рисунке 3.21.

Полученные величины  $\Delta\lambda_1^i/\lambda_B^i$  и  $\Delta\lambda_2^i/\lambda_B^i$  используются для вычисления на основе соотношения (1.6) деформаций, измеряемых датчиками  $s_1, s_2, s_3$ . Результатом этих вычислений на основе величин  $\Delta\lambda_1^i/\lambda_B^i$ , соответствующих первому пику на отражённом оптическом спектре, будут деформации  $\varepsilon_3^{11}, \varepsilon_3^{21}, \varepsilon_3^{31}$  и на основе величин  $\Delta\lambda_2^i/\lambda_B^i$  — деформации  $\varepsilon_3^{12}, \varepsilon_3^{22}, \varepsilon_3^{32}$  (первый индекс соответствует номеру датчика, второй — соответствующей резонансной длине волны). В конечном итоге по соотношению для розеток (3.1) вычисляются компоненты тензора деформаций  $\varepsilon_x^1, \varepsilon_y^1, \varepsilon_{xy}^1$ , соответствующие  $\Delta\lambda_1^i/\lambda_B^i$ , и деформации  $\varepsilon_x^2, \varepsilon_y^2, \varepsilon_{xy}^2$ , соответствующие  $\Delta\lambda_2^i/\lambda_B^i$ .

Анализ результатов численных экспериментов показал выполнение одного из основных свойств розеток, а именно, значения деформаций  $\varepsilon_x^1, \varepsilon_y^1, \varepsilon_{xy}^1$  и  $\varepsilon_x^2, \varepsilon_y^2, \varepsilon_{xy}^2$  совпадают для всех вариантов геометрий розеток, представленных на рисунке 3.21. Данный результат является одной из демонстраций достоверности численных расчётов.

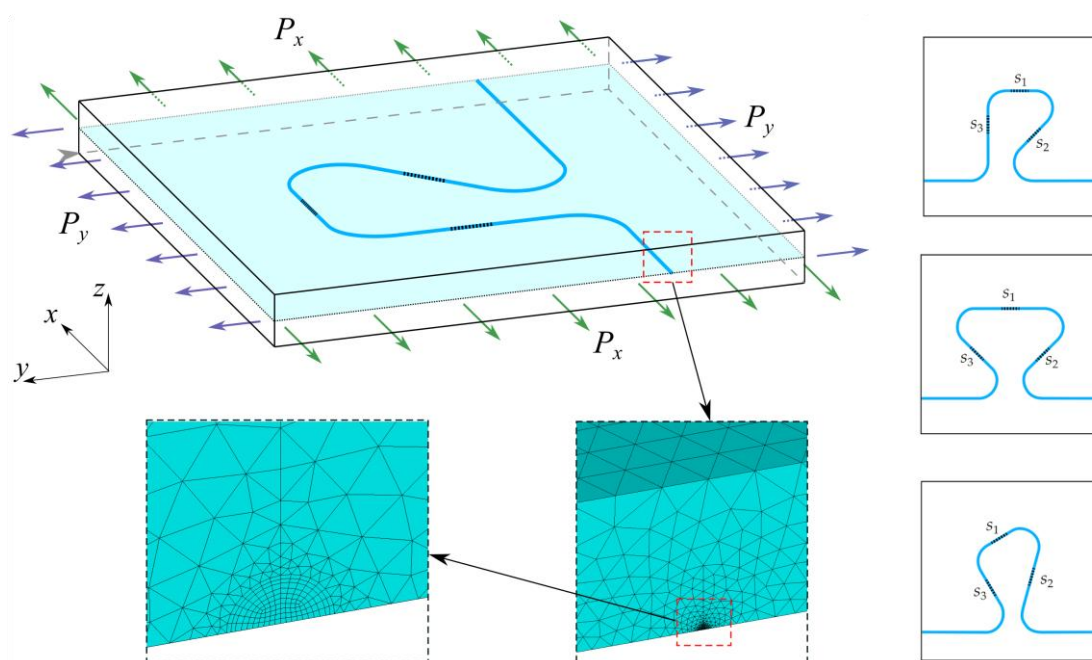


Рисунок 3.21 — Схемы расчёта ПКМ со встроенным оптическим волокном, образующим розетку датчиков, примеры дискретизации конечно-элементной сетки вблизи волокна, варианты расположения датчиков в розетке

Сопоставление значений деформаций  $\varepsilon_x^1, \varepsilon_y^1, \varepsilon_x^2, \varepsilon_y^2$ , полученных в модельном эксперименте, с деформациями материала  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  в зоне расположения розетки позволяет оценить погрешность вычисления деформаций, которая возникает при использовании допущения об одноосном напряжённом состоянии в зоне волоконных брэгговских решёток, образующих розетку. В качестве меры погрешности вводятся величины:

$$\begin{aligned} \delta_x^1 &= \frac{\varepsilon_x^1 - \varepsilon_x}{\varepsilon_0} 100\%, \quad \delta_y^1 = \frac{\varepsilon_y^1 - \varepsilon_y}{\varepsilon_0} 100\%, \\ \delta_x^2 &= \frac{\varepsilon_x^2 - \varepsilon_x}{\varepsilon_0} 100\%, \quad \delta_y^2 = \frac{\varepsilon_y^2 - \varepsilon_y}{\varepsilon_0} 100\% \end{aligned} \quad (3.3)$$

где  $\varepsilon_0$  — деформация материала в зоне расположения розетки при одноосном нагружении силой  $P_0$ .

На рисунке 3.22 представлены значения погрешностей (3.3) при различных значениях нагрузок  $P_x/P_0$  и  $P_y/P_0$  на боковых гранях.

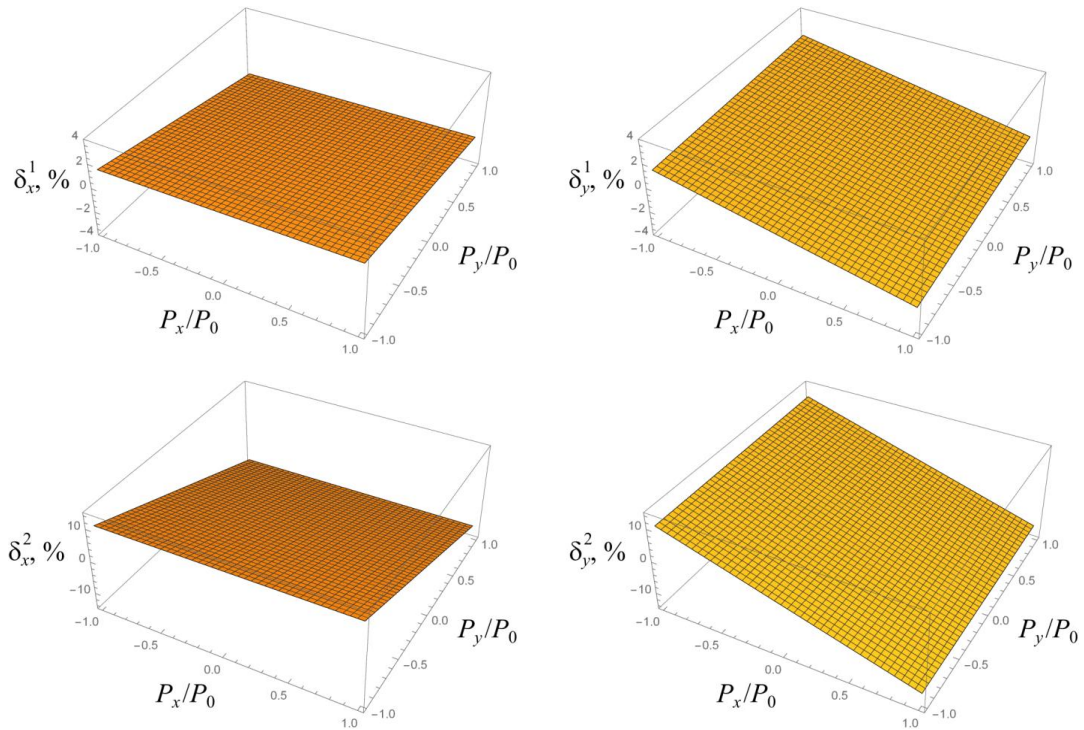


Рисунок 3.22 — Значения погрешностей  $\delta_x^1$ ,  $\delta_y^1$ ,  $\delta_x^2$ ,  $\delta_y^2$  при различных значениях нагрузок  $P_x/P_0$  и  $P_y/P_0$

Из представленных результатов следует, что по мере (3.3) погрешность вычисленных значений деформаций существенно меньше при использовании в соотношении (1.6)  $\Delta\lambda_1^i/\lambda_B^i$ , чем  $\Delta\lambda_2^i/\lambda_B^i$ . Однако методик выбора пика на отражённом спектре, который обеспечит наименьшую погрешность вычисления деформаций на основе соотношения (1.6) пока нет. Анализ полученных результатов позволяет рекомендовать, при наличии двух пиков на отражённом спектре, использовать для соотношений (1.6) среднее арифметическое значение величин  $\Delta\lambda_1^i/\lambda_B^i$  и  $\Delta\lambda_2^i/\lambda_B^i$ . В этом случае при любых вариантах нагрузок погрешность вычисленных деформаций при использовании меры (3.3) не превышает 6%.

### 3.3. Измерение градиентных полей деформаций при помощи ВОД

В настоящем подразделе диссертационной работы приводятся результаты исследования по измерению градиентных полей деформаций точечными ВОД на основе брэгговских решёток и распределёнными ВОД на основе рэлеевского рассеяния, встроенными в объём или фиксированными на поверхности материала образцов из полимерного композиционного материала и образцов, полученных по аддитивной технологии. Одной из отличительных особенностей является измерение градиентных полей деформаций в подобластях, где производная от функции распределения деформаций меняет знак.

Для изготовления образцов используются технологии, репрезентативные для датчиков, встраиваемых в объём материала: получение полимерных композиционных материалов из препрегов методом прямого прессования [124]; получение материалов из полимеров с помощью 3D-печати методом послойного наплавления. Формы выбранных для испытаний образцов являются результатом численных экспериментов, связанных с расчётом напряжённо-деформированного состояния методом конечных элементов различных вариантов образцов и анализом картин распределения деформаций с целью выбора вариантов с приемлемыми для экспериментов градиентными полями деформаций.

Геометрия, размеры образцов и качественные картины распределения деформаций вдоль осевых линий при их растяжении приведены на рисунке 3.23. Образцы *A* и *B* толщиной 5 мм и 4.3 мм соответственно, изготавливались из 20 слоёв препрега стеклопластика методом прямого прессования. Встраиваемые в материал волоконно-оптические датчики укладывались вдоль осевой линии образцов между 10-м и 11-м слоями препрега. Датчики на поверхности материала фиксировались цианоакрилатным клеем после завершения процесса полимеризации и демонтажа технологического пакета.

Образец *C* толщиной 3 мм изготавливался по аддитивной технологии послойного наплавления из полилактида. При изготовлении образцов

использовались следующие технологические параметры: диаметр сопла — 0.4 мм, толщина одного слоя — 0.3 мм, температура стола и сопла 3D принтера — 60°C и 210°C соответственно. Полученный в результате 3D-печати материал имеет модуль упругости  $E = 3.35$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0.32$ . Процесс печати образцов со встроенным в объем материала оптическим волокном включает три этапа. На первом этапе производится печать до плоскости расположения оптического волокна. На втором этапе печать приостанавливается, производится укладка и крепление оптоволокну. На последнем этапе возобновляется печать. Возможны разные варианты укладок волокна. Один из вариантов заключается в сохранении плоскости, на которую укладывается оптическое волокно. При этом фиксация волокна осуществляется клеевым соединением. Во втором варианте, при построении модели для печати, предусматривается углубление, сопоставимое с диаметром укладываемого в него оптического волокна.

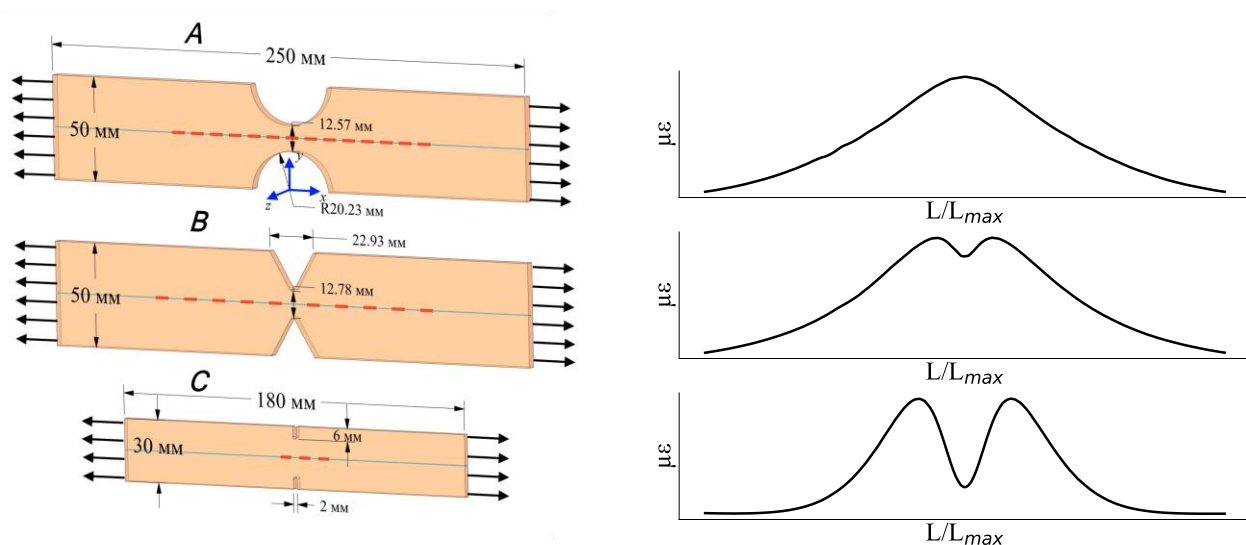


Рисунок 3.23 — Геометрия образцов и распределение деформаций вдоль осевых линий

При испытании на растяжение образцов **A** и **B** измерение деформаций проводилось с использованием ВОД на брэгговских решетках и на основе рэлеевского рассеяния, встроенных в объём материала или фиксированных на его поверхности. На рисунке 3.23 приведены схемы расположения датчиков на

брэгговских решетках, которые имели длину 5 мм. Измерение деформаций распределёнными ВОД проводилось с пространственным разрешением 2 мм, при этом каждая точка вычислялась на базе 10 мм.

Для оценки погрешности, связанной с использованием допущения об одноосном напряжённом состоянии в зоне брэгговских решеток при вычислении деформаций на основе физических величин, регистрируемых датчиками, встроенными в объем материала образцов **A** и **B**, были выполнены расчёты для вышеописанного модельного эксперимента.

Для образца **A** в зоне максимальных деформаций в материале  $\varepsilon_x^{\max} / P = 1.52 \cdot 10^{-10} \text{ Н}^{-1}$ , физические величины модельного эксперимента имеют следующие значения,  $\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_B} = 0.000117$ ,  $\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_B} = 0.000118$ . При этих величинах на основе соотношения (1.6) получены значения деформаций  $\varepsilon_3^{E_1}, \varepsilon_3^{E_2}$ , которые отличаются от измеряемой деформации  $\varepsilon_x^{\max}$  не более чем на 1.3%. Аналогичные по величинам оценки получены для образца **B**. Данные численные результаты демонстрируют небольшую погрешность от использования допущения об одноосном напряженном состоянии в зоне брэгговских решеток.

Полученные численные результаты, демонстрирующие близость величин  $\Delta\lambda_1 / \lambda_B$  и  $\Delta\lambda_2 / \lambda_B$ , подтверждаются картинками отраженных оптических спектров, которые имеют достаточно ярко выраженные одиночные пики. Примеры таких спектров для различных датчиков в образце **B** приведены на рисунке 3.24.

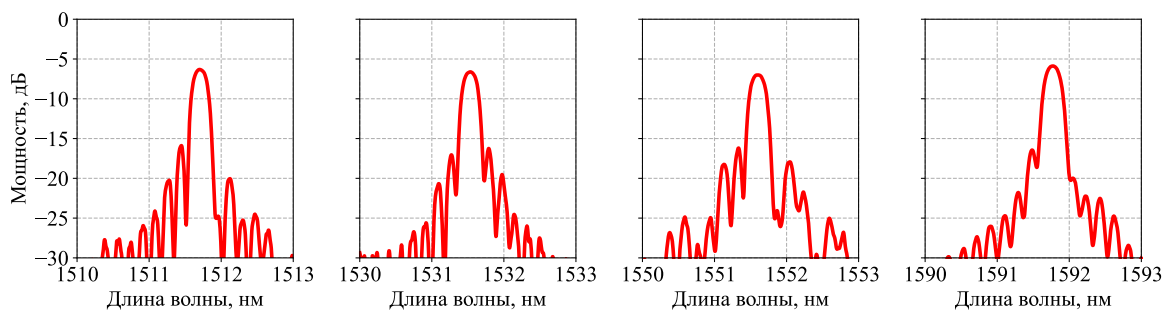


Рисунок 3.24 — Отражённые спектры ВБР, встроенных в образец **B**

На рисунке 3.25 представлены распределения деформаций по длине образцов **A** и **B** при нагрузках  $P = 0.9, 1.8, 2.8$  кН, полученные с использованием датчиков на основе ВБР (показаны красными отрезками, длина которых соответствует длине датчика), датчиков на основе рэлеевского рассеяния (синяя линия) и на основе численного моделирования методом конечных элементов (черная пунктирная линия) [125]. В приведенных результатах ВОД на основе ВБР были встроены в материал, а оптическое волокно, обеспечивающее распределённое измерение деформаций, фиксировалось на поверхности цианоакрилатным клеем.

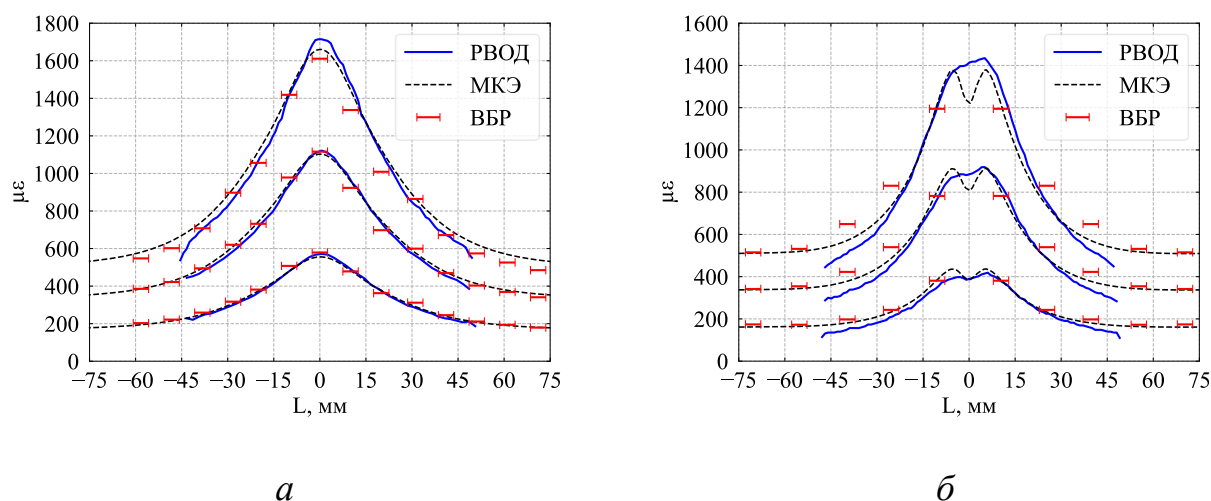


Рисунок 3.25 — Значения деформаций вдоль центральной осевой линии образца, полученные при измерении точечными и распределёнными датчиками и расчетом МКЭ (*a* – образец **A**, *б* – образец **B**)

Результаты демонстрируют хорошее совпадение величин деформаций, полученных распределёнными ВОД и величин, полученных на основе расчета методом конечных элементов. Наибольшее расхождение результатов измерения деформаций распределёнными ВОД с результатами численного анализа имеет место на участках, где производная от функции распределения деформаций изменяет знак.



Результаты измерения деформаций, полученные с помощью ВБР, приводят к погрешностям в пределах 12%. Возможной причиной данной погрешности является градиентное распределение деформаций. Для ВБР, вдоль длины которой распределение деформаций неоднородно, справедливы следующие соотношения для сдвигов резонансной длины волны отраженного спектра:

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_B} = \frac{1}{L} \int_{z=0}^{z=L} \left\{ \varepsilon_3 - \frac{1}{2} n^2 (p_{11} \varepsilon_1 + p_{12} (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)) \right\} dz$$

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_B} = \frac{1}{L} \int_{z=0}^{z=L} \left\{ \varepsilon_3 - \frac{1}{2} n^2 (p_{11} \varepsilon_2 + p_{12} (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)) \right\} dz ,$$

где  $L$  — длина ВБР;

$z$  — координата вдоль длины ВБР.

Структура данного соотношения демонстрирует влияние неоднородного распределения деформаций на величину резонансной длины волны отраженного спектра ВБР.

Одним из ключевых факторов, определяющих точность измерения неоднородного поля деформаций, является величина базы датчика. Для исследования влияния этого фактора были выполнены эксперименты по измерению деформаций точечными и распределёнными ВОД, встроенными в образец *C*. Выбор геометрии образца *C* проводился с учётом того, что наибольшее расхождение между результатами, полученными с помощью распределённых датчиков и численного моделирования для образцов *A* и *B*, наблюдалось в зонах изменения знака производной функции распределения деформаций. На основе численного моделирования методом конечных элементов найден приемлемый для экспериментов вариант, в котором распределение деформаций при растяжении образца имеет два ярко выраженных пика на расстоянии 20 мм. Для этого образца при растяжении нагрузкой 300 Н на рисунке 3.26 представлены результаты измерения деформаций: датчиками на основе ВБР длиной 5 мм (отрезки красного цвета), распределённым ВОД на основе рэлеевского рассеяния с базой датчика 5 мм и пространственным шагом 1 мм (синяя линия) и результаты численного моделирования методом конечных элементов (черная пунктирная линия).

Максимальные отличия результатов измерения деформаций распределённым ВОД и результатов численного моделирования имеют место в зонах, где производная от функции распределения деформаций меняет знак.

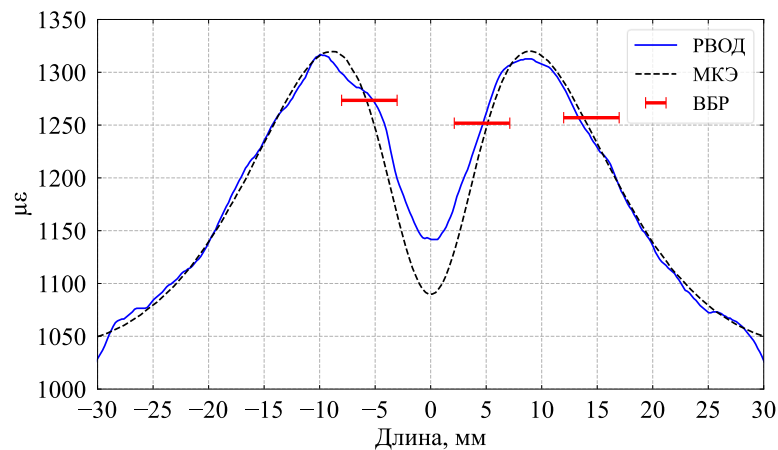


Рисунок 3.26 — Значения деформаций вдоль центральной осевой линии образца, полученные при измерении точечными и распределёнными датчиками и расчетом МКЭ

Распределённое измерение деформаций осуществляется путем регистрации профилей рэлеевского рассеяния в исходный, отсчетный момент времени и в нагруженном состоянии. Затем профили рассеяния разбиваются на фрагменты задаваемой длины вдоль измеряемого участка оптического волокна, которые с помощью преобразования Фурье переводятся в частотную область, где для каждого участка проводится процедура кросс-корреляции для определения спектрального сдвига [126].

Длина фрагментов  $\Delta x$  (база датчика, *gage length*), на которые разбивается профиль рассеяния, влияет на точность показаний при измерении деформаций. При увеличении базы датчика увеличивается количество точек на профиле рассеяния, которые используются для перевода данных из временной в частотную область, а, следовательно, повышается спектральное разрешение. С другой стороны, наличие значительного градиента деформаций вдоль базы датчика затрудняет вычисление кросс-корреляционного пика [108]. Таким образом, оптимальная база датчика

ограничена снизу минимальным количеством точек на профиле рассеяния, которые необходимы для получения спектра в частотной области ( $a$ ), а сверху — предельной длиной фрагмента ( $b$ ), на котором при наличии градиента деформаций возможно проведение алгоритма кросс-корреляции [125]:

$$a \leq \Delta x \leq b.$$

Выход за обозначенные пределы приводит к высокому отношению сигнал/шум, как показано на рисунке 3.27, где приведены графики распределения деформаций вдоль образца, полученные с помощью распределённого ВОД при  $\Delta x = 1 \text{ мм} < a$ ,  $\Delta x = 15 \text{ мм} > b$  и  $a < \Delta x = 7 \text{ мм} < b$ .

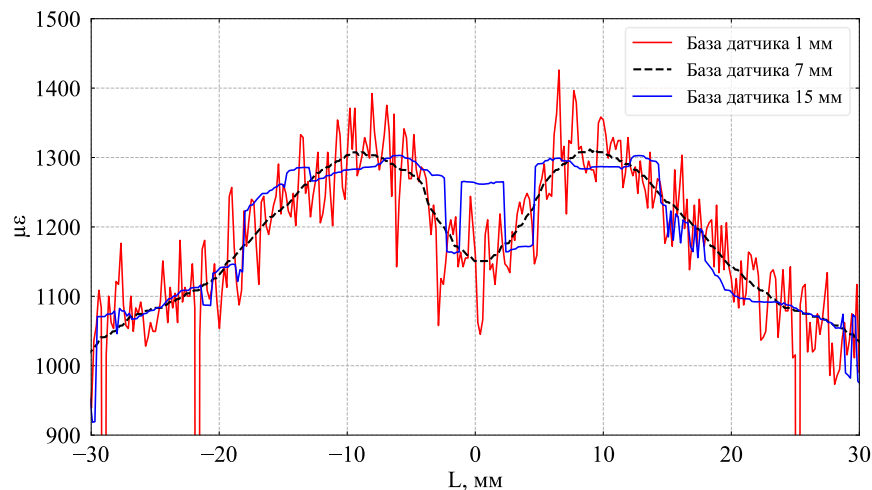


Рисунок 3.27 — Распределения деформаций вдоль центральной осевой линии образца, полученные распределённым ВОД при разных базах датчика

Результаты экспериментов позволяют рекомендовать величины  $a$  в диапазоне 3–5 мм. Для оценки верхнего предельного значения базы датчика возможно использование параметра *Spectral Shift Quality*, применяемого для оценки качества проведенной процедуры кросс-корреляции при вычислении спектрального сдвига [108]:

$$Spectral\ Shift\ Quality = \frac{\max(U_j(\nu) \star U_j(\nu - \Delta\nu_j))}{\sum U_j(\nu)^2},$$

где  $U_j(\nu)$  — спектр заданного фрагмента в отсчетном состоянии;

$U_j(v - \Delta v_j)$  — спектр для данного фрагмента в деформированном состоянии;

★ — оператор кросс-корреляции.

Параметр *Spectral Shift Quality* изменяется в диапазоне [0;1], где значение 1 соответствует идеальной корреляции. На рисунке 3.28 показано, что параметр *Spectral Shift Quality* для базы датчика более 5 мм имеет низкие значения в областях наибольшего градиента деформаций. Учитывая приведённые рекомендации по минимальной базе и полученные значения параметра *Spectral Shift Quality*, можно сделать вывод об оптимальности базы датчика 5 мм для данного распределения деформаций.

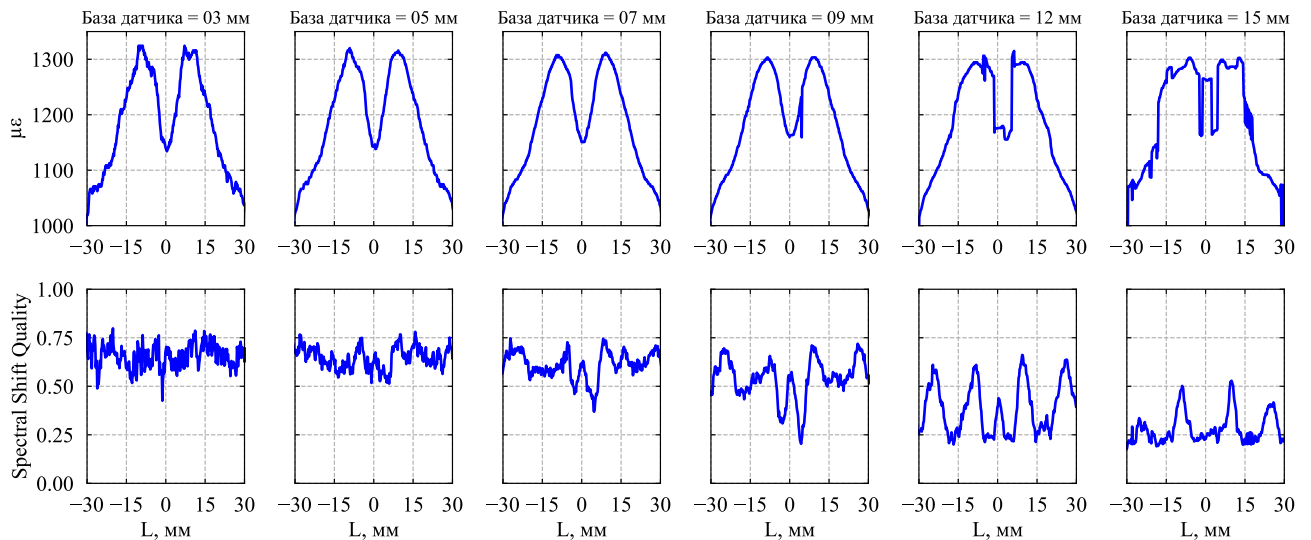


Рисунок 3.28 — Распределение деформаций и качества спектрального сдвига вдоль образца *C* при разных базах датчика

Помимо искажений показаний, связанных с особенностями алгоритма вычисления распределённых деформаций, увеличение базы датчика затрудняет определение локальных неоднородных областей распределения деформаций вследствие осреднения данных на заданной длине датчика.

Возникновение погрешности при измерении деформаций вследствие осреднения показаний демонстрируется на численном примере, в котором в качестве исходных истинных значений используется распределение деформаций

вдоль образца, полученное методом конечных элементов. Значения распределений деформаций при различных базах датчика получаются на основе применения метода простого скользящего среднего с длиной окна, соответствующей базе датчика:

$$SMA_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} p_{t-i} = \frac{p_t + p_{t-1} + \dots + p_{t-i} + \dots + p_{t-n+1}}{n},$$

где  $SMA_t$  — значение простого скользящего среднего в точке  $t$ ;

$n$  — количество точек (размер окна) усреднения;

$p_{t-i}$  — значение исходной функции в точке  $t-i$ .

Полученные численно и экспериментально распределения деформаций при различных базах датчиков представлены на рисунке 3.29.

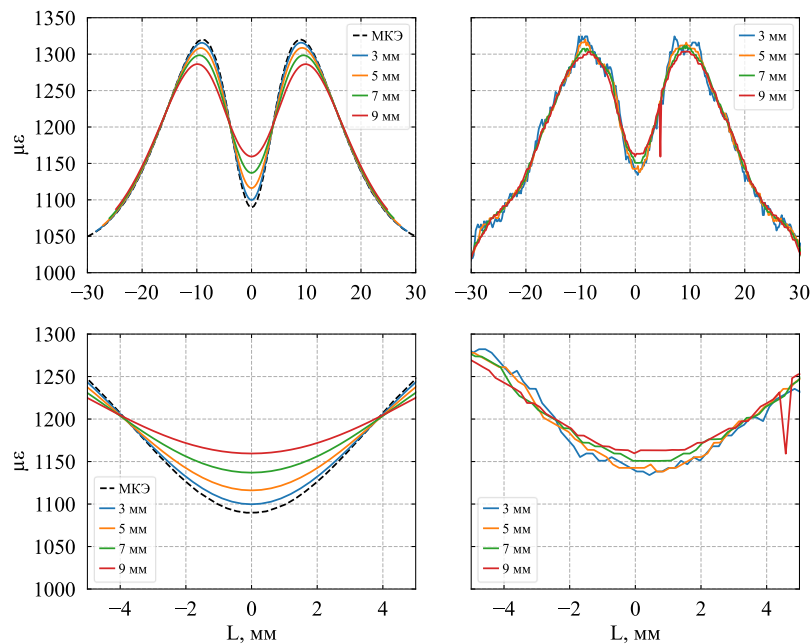


Рисунок 3.29 — Распределения деформаций вдоль центральной осевой линии образца  $S$  при разных базах датчика, полученные с помощью численного моделирования и экспериментально

Эти результаты демонстрируют, что погрешность измерения деформаций зависит от длины датчика и асимптотически уменьшается с уменьшением базы

датчика. Этот вывод наиболее ярко проявляется в зонах, где производная от функции распределения деформаций меняет знак. Результаты численного эксперимента качественно подтверждают полученные экспериментальные данные.

Предложенный в главе 1 подход применения оконного преобразования Фурье продемонстрирован на примере образца с внедрённым оптическим волокном, содержащим три ВБР в области вырезов, как показано на рисунке 3.30. Наличие вырезов в образце приводит к неоднородному распределению деформаций вдоль его длины при одноосном растяжении.

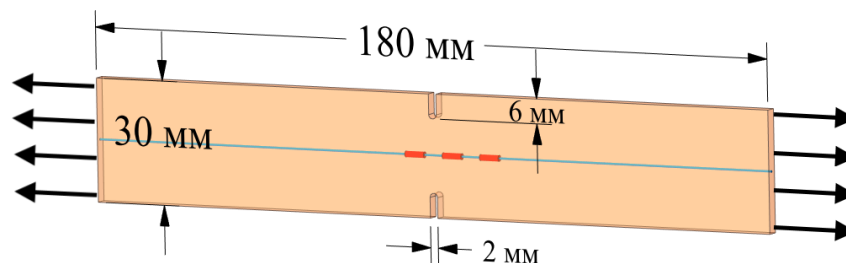


Рисунок 3.30 — Схема образца с внедрённым оптоволоком с тремя ВБР

На рисунке 3.31а приведены распределения деформаций вдоль длины образца, измеренные с помощью ВОД на основе рэлеевского рассеяния при трёх уровнях растягивающего усилия. Для получения данных использовался стандартный алгоритм обработки сигнала без применения оконной функции Ханна при диапазоне сканирования лазерного источника, не включающем резонансные длины волн ВБР. Данные распределения имеют малоинформативный характер в силу наличия нечувствительных зон, не позволяющих оценить неоднородное изменение деформаций по длине образца. На рисунке 3.31б приведены аналогичные распределения деформаций, полученные с использованием оконной функции Ханна при обработке сигнала.

В случае использования оконного преобразования Фурье удастся оценить неоднородный характер распределения деформаций вдоль всей длины исследуемого образца.

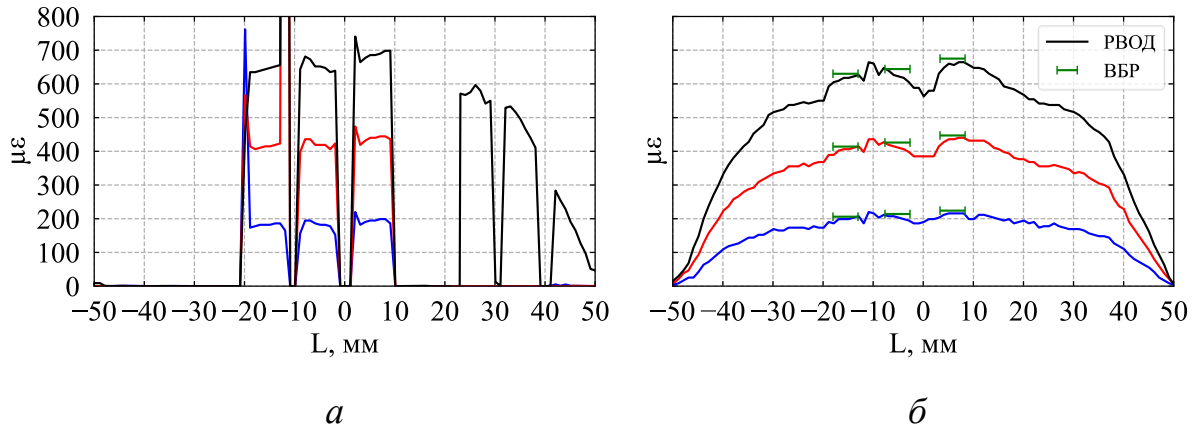


Рисунок 3.31 — Распределение деформаций вдоль образца, полученные с помощью распределённого ВОД с тремя ВБР без применения оконной функции Ханна (а) и с применением оконной функции Ханна (б)

В дополнение к распределённым измерениям деформаций на каждом этапе нагружения проводилось измерение деформаций с помощью точечных ВБР датчиков на основе регистрации сдвига резонансной длины волны ВБР с использованием интеррогатора HYPERION si255. Показания точечных ВОД представлены на рисунке 3.31б в виде отрезков, длина которых соответствует длине используемых ВБР, а местоположение определено на основе рефлектограммы, полученной с помощью рефлектометра обратного рассеяния. Показания двух измерительных систем находятся в близком соответствии друг с другом.

Выполнены исследования, связанные с анализом влияния градиентного распределения деформаций вдоль длины ВБР на отражённый оптический спектр. Рассмотрены ВБР длиной 5, 10 и 15 мм, записанные в одномодовом германосиликатном оптическом волокне [127]. ВБР длиной 5 и 10 мм записаны с помощью ультрафиолетового источника излучения (экспимерного лазера) методом фазовой маски. Данная технология записи ВБР требует снятия защитной оболочки оптического волокна с ее последующим восстановлением. ВБР длиной 15 мм была записана поточечным методом с использованием фемтосекундного лазера. Данный метод записи ВБР не требует удаления защитной оболочки оптического волокна.

При выборе образца для проведения исследований были рассмотрены различные геометрические конфигурации, представленные на рисунке 3.32. В качестве граничных условий задается консольное закрепление с одной из сторон и воздействие изгибающего момента с помощью усилия, приложенного в плоскости, перпендикулярной плоскости образа, с другой стороны.

На рисунке 3.32 приведены распределения деформаций  $\varepsilon_x$  вдоль длины образцов, полученные на основе численных расчетов методом конечных элементов при значениях  $E = 3$  ГПа,  $\nu = 0.35$ .

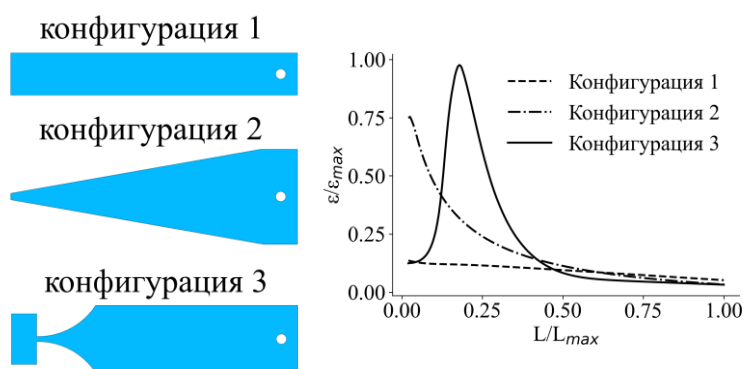


Рисунок 3.32 — Геометрические конфигурации образцов и распределение деформаций вдоль их длины

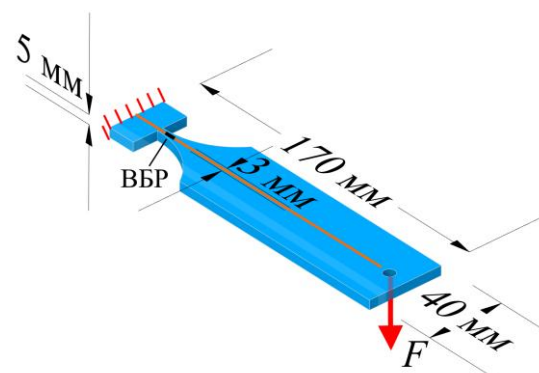


Рисунок 3.33 — Схема образца

Для дальнейших экспериментов была выбрана геометрия третьего образца, которая обеспечивает наибольший градиент деформаций при идентичных уровнях нагрузок (Рисунок 3.33).

Образцы конфигурации 3 были изготовлены из PLA-пластика методом послойного наплавления с помощью 3D-принтера Picaso Designer XL PRO S2. На поверхность изготовленных образцов с помощью цианоакрилатного клея были нанесены оптические волокна с ВБР разной длины таким образом, чтобы брэгговская решётка оказалась в зоне наибольшего градиента деформаций. Нагружение образца осуществлялось с использованием подвешиваемых грузов



различного веса. Формы отражённого спектра при разных уровнях нагрузки для рассматриваемых ВБР представлены на рисунке 3.34.

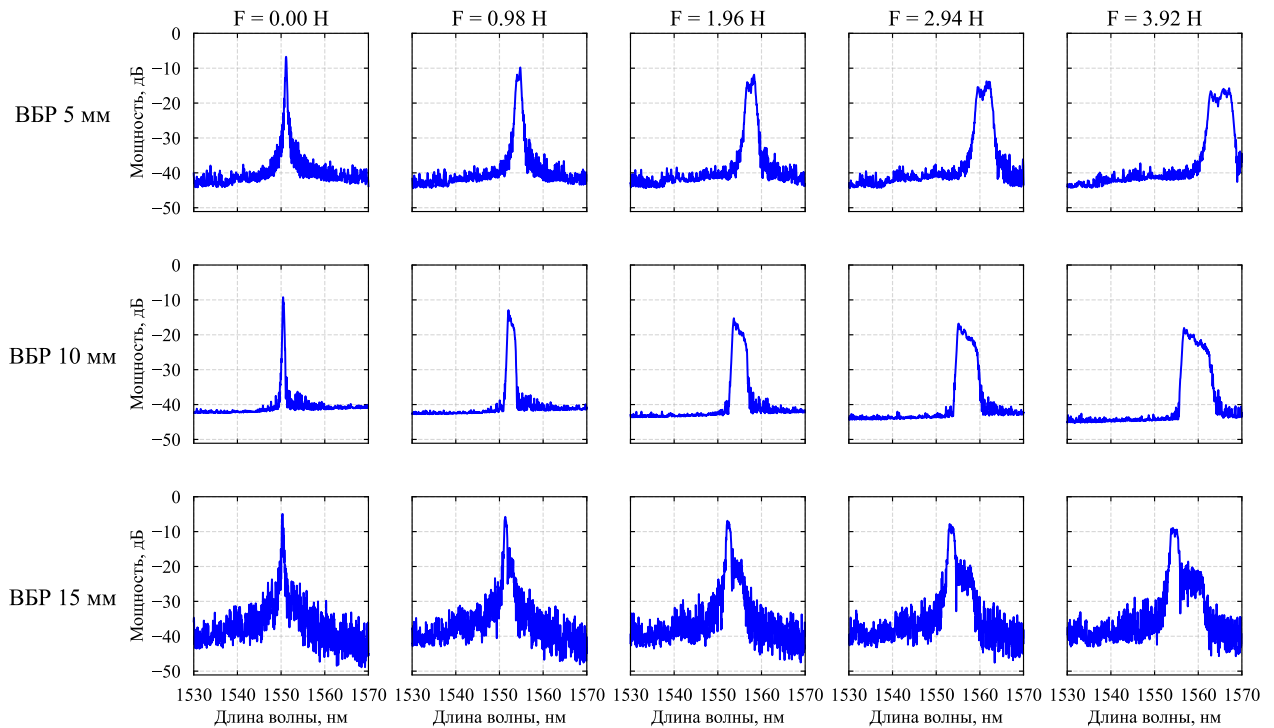


Рисунок 3.34 — Отражённые спектры исследуемых ВБР разной длины при различных уровнях нагрузки

На рисунке 3.35 приведен график распределения деформаций образца, полученный с помощью рефлектометра обратного рассеяния и деформации, полученные с помощью исследуемых точечных ВБР датчиков.

Наличие градиента деформаций вдоль ВБР приводит к изменению формы отражённого спектра — его уширению, вследствие чего определение резонансной длины волны становится затруднительным. Результаты, приведенные на рисунке 3.35, соответствуют определению резонансной длины волны по максимуму отраженного спектра.

В таблице 3.4 приведены значения градиента деформаций, приходящиеся на исследуемые ВБР при различных уровнях нагрузки, действующей на образец. Возможным объяснением более выраженного изменения формы спектра при

нагрузении ВБР длиной 5 и 10 мм по сравнению с ВБР длиной 15 мм может являться различие в технологии записи этих решёток.

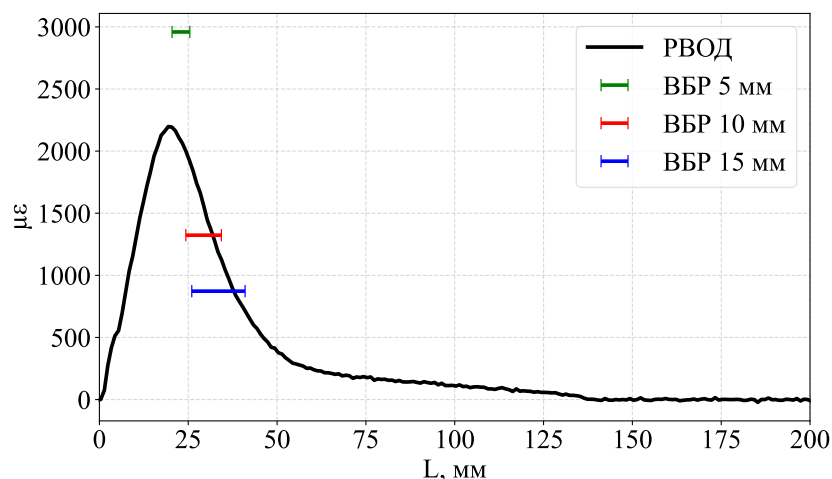


Рисунок 3.35 — Распределение деформаций вдоль образца, полученное с помощью распределённого ВОД и деформации, полученные на основе исследуемых ВБР датчиков

Таблица 3.4 — Градиент деформаций, который приходится на исследуемые ВБР при разных уровнях нагрузки

Длина ВБР	Градиент деформаций (με/мм), $F = 0.98$ Н	Градиент деформаций (με/мм), $F = 1.96$ Н	Градиент деформаций (με/мм), $F = 2.94$ Н	Градиент деформаций (με/мм), $F = 3.92$ Н
ВБР 5 мм	64	130	195	259
ВБР 10 мм	87	174	262	348
ВБР 15 мм	76	153	229	305

На рисунке 3.36 приведены отраженные спектры ВБР длиной 15 мм при нагрузке до 8.44 Н для случаев растяжения (синяя кривая) и сжатия (красная кривая). Отраженные спектры ВБР при растяжении и сжатии практически симметричны.

В таблице 3.5 приведены данные о ширине отражённого пика на полувысоте (FWHM) для исследуемых ВБР при различных нагрузках, а также отношения изменения ширины спектрального пика к величине сдвига резонансной длины

волны, определенной по максимальному значению мощности отраженного спектра.

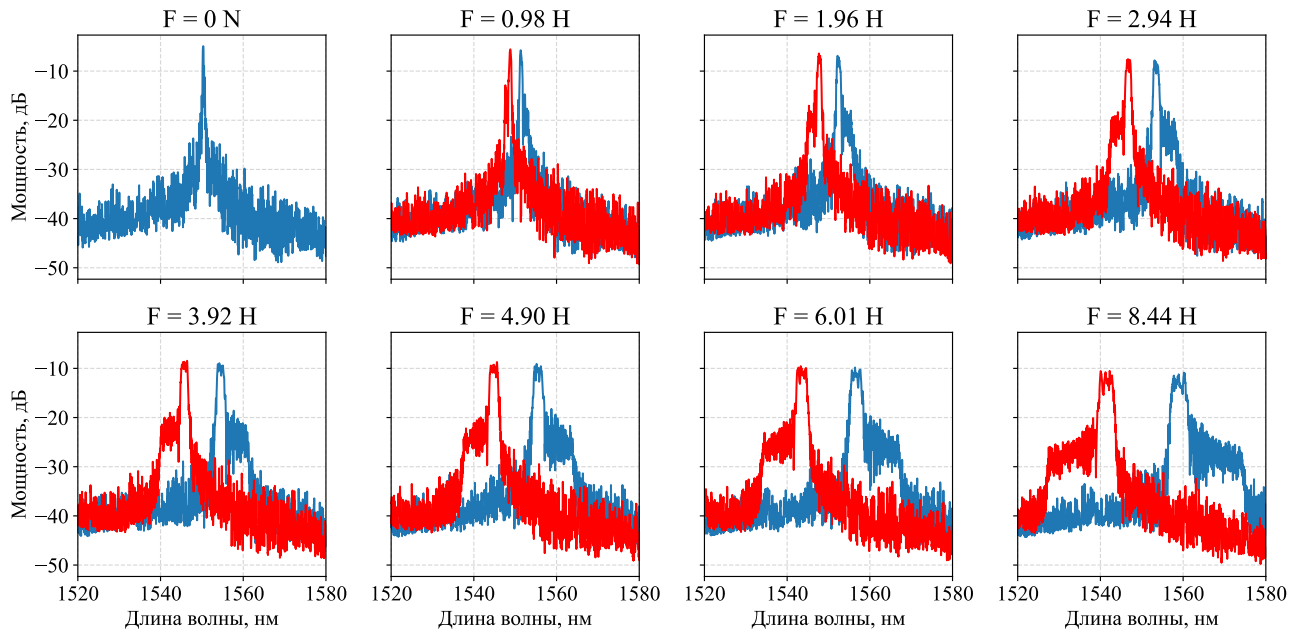


Рисунок 3.36 — Отражённые спектры ВБР длиной 15 мм, записанной с помощью фемтосекундного лазера при различных уровнях растягивающей (голубая линия) и сжимающей (красная линия) нагрузки

Таблица 3.5 — Характеристики отражённого оптического спектра ВБР при градиентном распределении деформаций при разных уровнях нагрузки

F, Н	FWHM, нм	$\Delta(\text{FWHM}) / \Delta\lambda \cdot 100, \%$	FWHM, нм	$\Delta(\text{FWHM}) / \Delta\lambda \cdot 100, \%$	FWHM, нм	$\Delta(\text{FWHM}) / \Delta\lambda \cdot 100, \%$
—	ВБР 5 мм		ВБР 10 мм		ВБР 15 мм	
0	0.26	—	0.33	—	0.26	—
0.98	0.43	4.7	0.83	31.6	0.61	34.5
1.96	0.90	8.9	1.39	33.1	0.87	32.9
2.94	1.50	11.9	2.02	36.3	1.28	37.3
3.92	2.45	13.7	2.73	38.1	1.74	38.1

Полученные в ходе исследования результаты демонстрируют влияние градиента деформаций вдоль длины брэгговской решетки на форму отраженного спектра, проявляющееся в увеличении ширины основного пика отражения ВБР, что может приводить к снижению чувствительности датчика. При характерной для

градиентного распределения деформаций форме отраженного спектра могут иметь место сложности в определении резонансной длины волны, и, следовательно, погрешности в измерении деформаций с помощью ВОД на основе брэгговских решёток. Кроме того, наблюдается снижение мощности отражённого сигнала при увеличении градиента деформаций, что потенциально ведёт к ухудшению отношения сигнал/шум и увеличению погрешности измерений.

## **ГЛАВА 4. ВАРИАНТЫ ПРИЛОЖЕНИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ И РЕГИСТРАЦИИ ДЕФЕКТОВ**

### **4.1. Измерение технологических и остаточных деформаций**

Конструктивные особенности ВОД, позволяющие встраивать их в материалы, дают уникальные возможности для регистрации технологических и остаточных деформаций, которые не могут быть получены другими известными методами и при использовании других типов датчиков. Далее эти возможности проиллюстрированы для различных материалов.

На основе встроенных в материал волоконно-оптических датчиков деформаций реализована методика регистрации истории технологических деформаций, формируемых в процессе изготовления образцов из цементной смеси.

Для исследования эволюции технологических деформаций был создан экспериментальный стенд, представленный на рисунке 4.1а. На рисунке 4.1б приведена геометрия образца из цементной смеси со встроенными ВОД. Формирование и твердение образцов осуществлялось в формах со свободной верхней поверхностью.

На рисунке 4.2 представлены технологические деформации в цементном образце, которые регистрировались на протяжении четырех месяцев при помощи встроенных ВОД на брэгговских решетках [128].

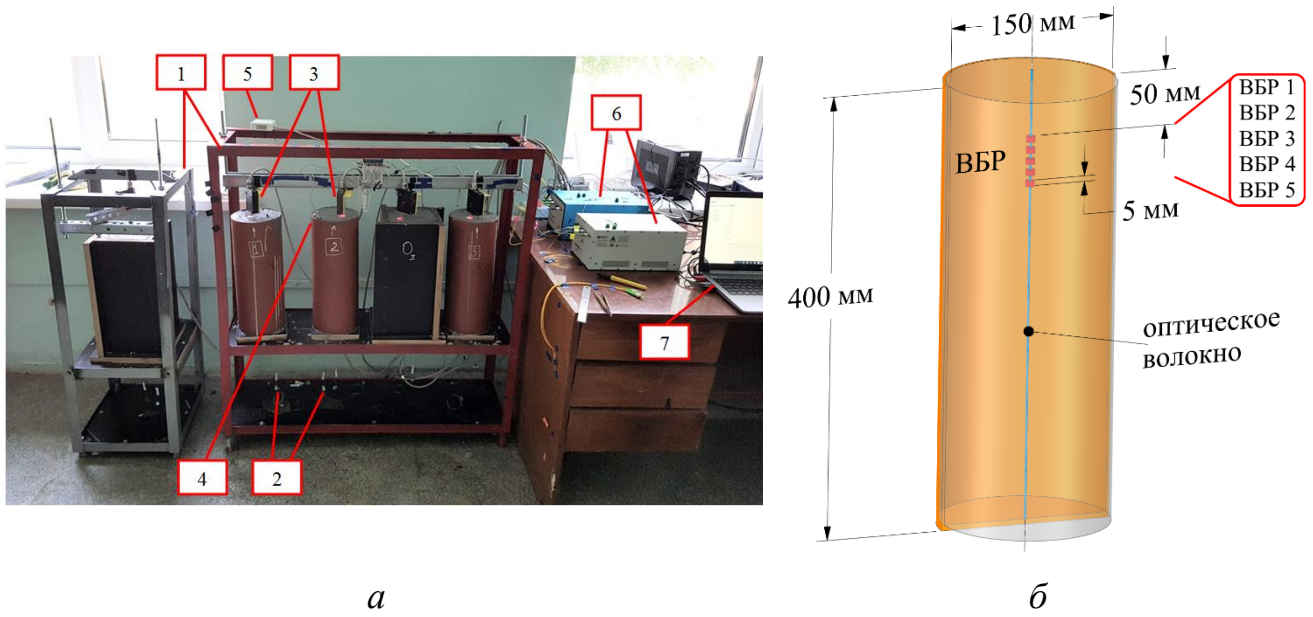


Рисунок 4.1 — Схема экспериментального стенда (а) и схема образца с внедрёнными ВОД (б)

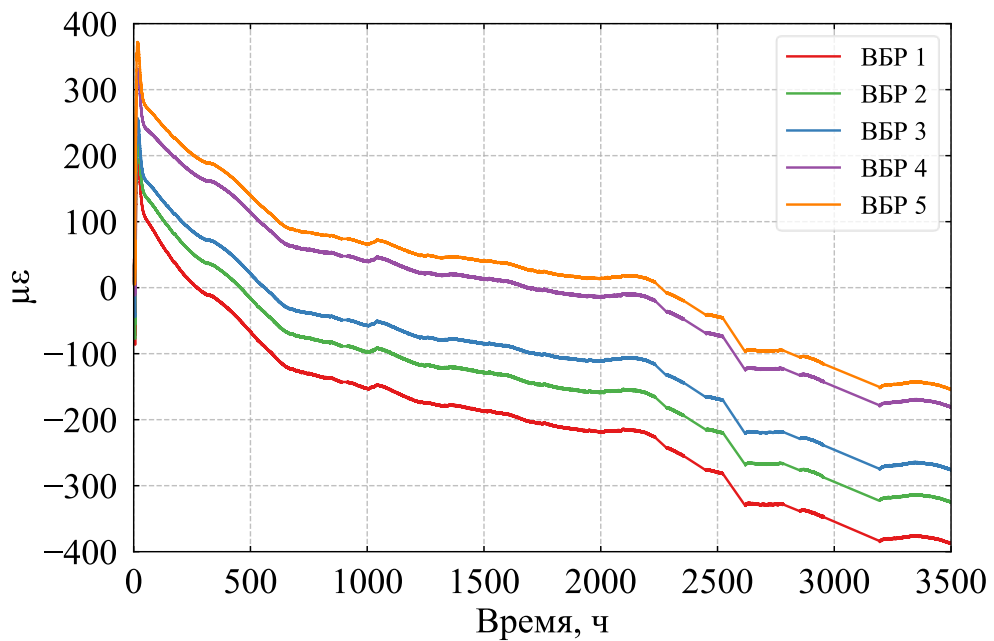


Рисунок 4.2 — Технологические деформации в цементном образце, полученные при помощи ВОД

Результаты измерений демонстрируют увеличение технологических деформаций сжатия на протяжении всего срока проведения эксперимента и неоднородность распределения технологических деформаций по высоте образца.

Экспериментальная демонстрация измерения технологических деформаций, формирующихся в процессе 3D-печати методом послойного наплавления (FDM) с использованием встроенных волоконно-оптических датчиков, приведена на примере образца в форме прямоугольного параллелепипеда, изготовленного методом послойного наплавления из полилактида (PLA).

С целью встраивания ВОД в процессе изготовления образцов в модели предусмотрены технологические сквозные отверстия, учитывающие размеры встраиваемых оптических волокон. Геометрия образцов подобрана таким образом, чтобы обеспечить возможность встраивания как ВОД деформаций, так и температуры. Это, в свою очередь, позволяет фиксировать изменения деформаций и температуры, а также проводить температурную компенсацию и оценивать распределение технологических деформаций по длине и высоте образца. Геометрия образца с размерами технологических отверстий представлена на рисунке 4.3.

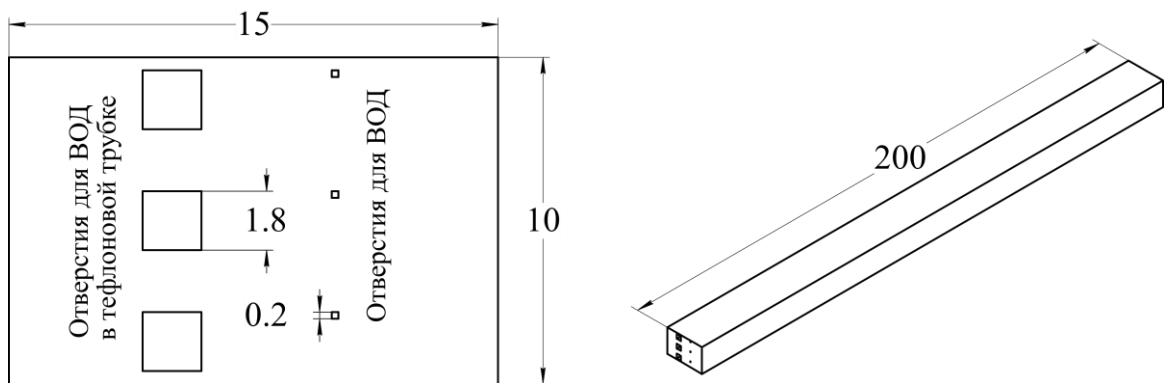


Рисунок 4.3 — Схема образца с внедрёнными ВОД

Распределенное измерение технологических деформаций с использованием ВОД на основе рэлеевского рассеяния в образце из термопластичного полимера в процессе 3D-печати реализовано в несколько этапов:

1. Регистрация деформаций с помощью распределённого ВОД начинается непосредственно перед встраиванием оптического волокна в исследуемый материал.

2. Оптическое волокно фиксируется в двух подготовленных пазах после приостановки печати на заданной высоте. В одном из пазов оптическое волокно фиксируется без дополнительных оболочек, кроме защитной полиимидной оболочки, сохраняющей работоспособность до 300°C. Данный участок оптического волокна воспринимает как механическую деформацию, так и изменение температуры. Во второй паз укладывается оптическое волокно в тефлоновой трубке с внутренним диаметром 0.5 мм при диаметре оптического волокна 0.15 мм. Связь между оптическим волокном и тефлоновой трубкой осуществляется с одного конца трубки, находящегося за пределами образца, с помощью клеевого соединения. Данная конструкция обеспечивает передачу температуры и исключает передачу механических деформаций на данный участок оптического волокна, позволяя впоследствии выполнить температурную компенсацию показаний на первом участке оптического волокна.

3. После встраивания ВОД процесс печати возобновляется до следующей остановки или до окончания процесса изготовления образца.

4. Изготовленный образец со встроенными волоконно-оптическими датчиками выдерживается в камере отключенного 3D-принтера с целью охлаждения до температуры окружающей среды, с непрерывной записью показаний ВОД.

Вид образца на этапе встраивания ВОД представлен на рисунке 4.4.

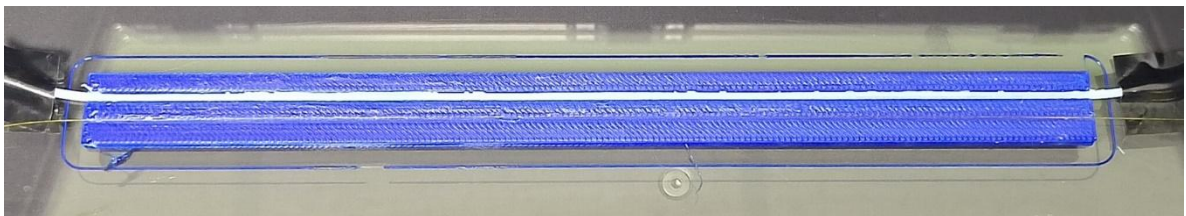


Рисунок 4.4 — Внешний вид образца из PLA на этапе встраивания ВОД

На рисунке 4.5 представлены результаты измерения технологических деформаций в исследуемом образце из PLA. Полученные данные представлены в



виде набора графиков. В центральной части расположена двумерная тепловая карта, отображающая распределение деформаций вдоль длины образца (ось ординат) во времени (ось абсцисс). Цветовая шкала соответствует уровню деформаций. На данном графике двумя пунктирными линиями отмечены срезы распределения деформаций по времени (черная пунктирная линия) и по длине образца (красная пунктирная линия), графики которых расположены снизу и справа от центрального графика, соответственно.

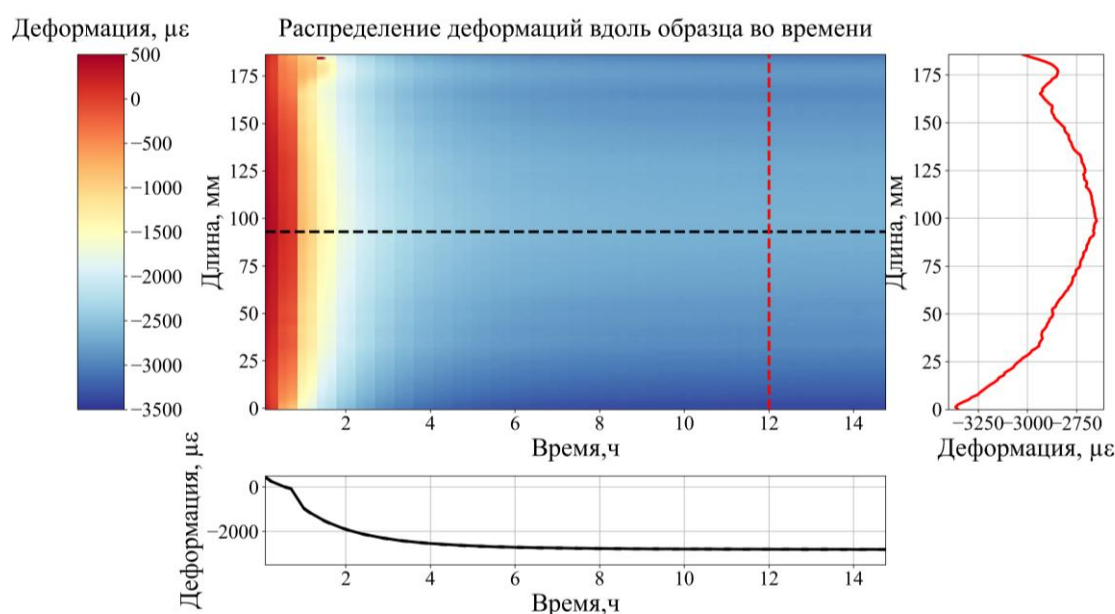


Рисунок 4.5 — Изменение технологических деформаций в образце из PLA по длине образца во времени

Накопление технологических деформаций продолжается в течение ~10 часов после окончания печати. Стоит отметить, что за отсчётное состояние по времени выбран момент окончания печати образца. Распределение остаточных деформаций вдоль длины образца спустя 12 часов после окончания печати демонстрирует наличие градиента деформаций.

На рисунке 4.6 приведены графики изменения деформаций во времени для центрального по длине сечения для трех уровней по высоте образца.

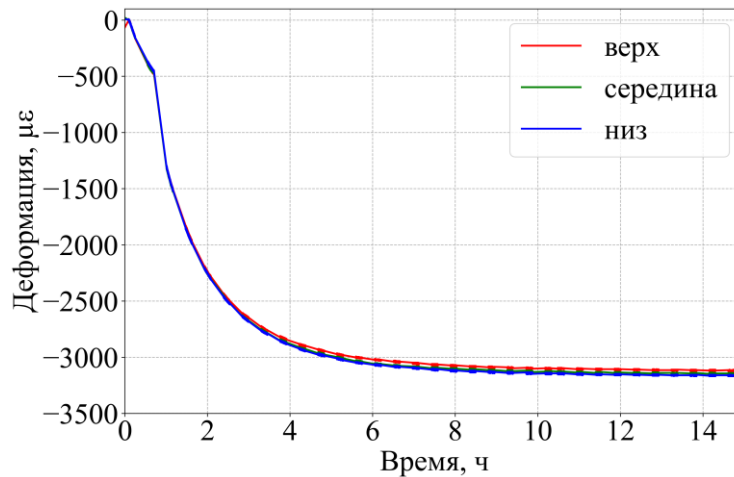


Рисунок 4.6 — Изменение деформаций после окончания печати

Полученные результаты демонстрируют высокий уровень технологических деформаций, формирующихся при 3D-печати методом послойного наплавления, что может приводить к отклонению формы изготавливаемого изделия от заданной геометрии и нарушению его функциональных характеристик.

Измерение технологических деформаций с использованием ВОД, встроенных в ПКМ, было реализовано в процессе изготовления пластины (300×300×5 мм) из препрега методом прямого прессования. В технологическом процессе после сборки пакета из 20 слоев препрега формирование производилось при следующих параметрах: подъем температуры до 120°C со скоростью 3°C/мин; выдержка 0.4 часа при температуре 120°C, подъем давления прессования до 0.3 МПа; подъем температуры до 180°C со скоростью 3°C/мин; выдержка 1.5 часа при температуре 180°C; охлаждение со скоростью 3°C/мин до 55°C; сброс давления.

Во время технологического процесса формирования ПКМ методом прямого прессования непрерывно осуществлялась регистрация технологических деформаций с помощью ВОД, встроенных в ПКМ [129]. Для компенсации температурных деформаций использовались показания ВОД на брэгговской решетке, который располагался свободно на поверхности пластины. Показания этого датчика проверялись дополнительным регистратором температуры.

На рисунке 4.7 представлено изменение технологических деформаций в течение процесса формирования пластины [121].

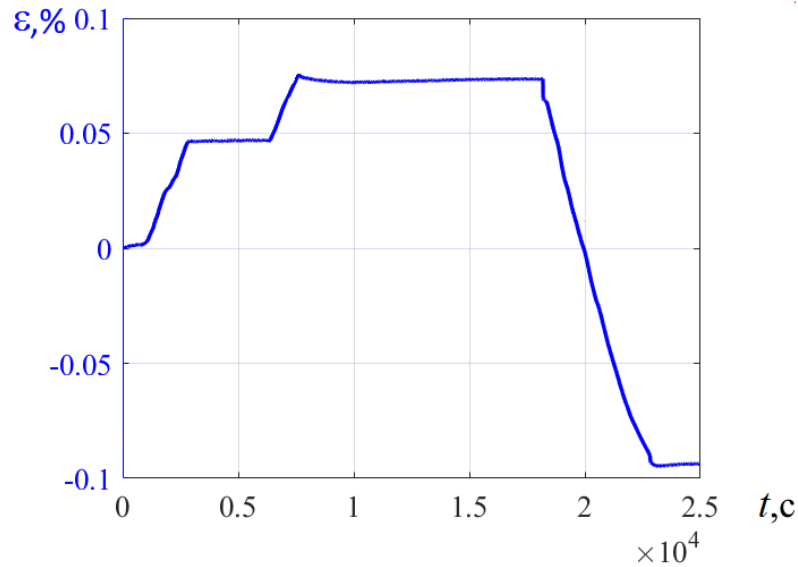


Рисунок 4.7 — Показания ВОД в течение процесса формирования ПКМ

Значения деформаций после завершения процесса формирования ( $t > 2.4 \times 10^4$  секунд) определяют уровень остаточных технологических деформаций. Использование подобной методики получения информации о деформациях и их эволюции в течение технологического процесса позволяет выбирать параметры технологического процесса, обеспечивающие получение бездефектных изделий из ПКМ с заданным уровнем остаточных деформаций.

#### 4.2. Вариант регистрации повреждений с помощью ВОД

Доступность измерения деформаций ВОД в большом числе точек и в различных зонах конструкции открывает, по сравнению с другими типами датчиков, новые возможности для регистрации появления и развития неоднородностей в конструкции — повреждений, дефектов, изменений свойств материалов.

В настоящем подразделе диссертационной работы представлен алгоритм регистрации появления и развития дефектов на основе экспериментальной информации о деформациях в материале, измеряемых ограниченным числом датчиков и результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния [130]. Алгоритм ориентирован на варианты внешних воздействий, подобных в различные моменты времени. Приводятся результаты на различных экспериментальных образцах из полимерных композиционных материалов при использовании волоконно-оптических датчиков деформаций на брэгговских решетках, наклеенных на поверхность образцов или встроенных в материал на технологической стадии его изготовления.

Достаточные для регистрации изменения показаний датчиков деформаций при появлении дефектов происходят при соответствующем расстоянии между датчиками и дефектом. В соответствии с принципом Сен-Венана [131] область изменения деформаций, вызванных дефектом, определяется его характерными размерами. Данный принцип подтвержден практикой и многочисленными аналитическими и численными расчётами напряженно-деформированного состояния. Одним из классических примеров является задача Кирша [132], которая демонстрирует, что изменения напряжений и деформаций в упругой пластине с круглым отверстием имеют место в области определяемой двумя-тремя диаметрами отверстия. Таким образом, в соответствии с принципом Сен-Венана, при отсутствии дополнительной информации о распределении деформаций в материале контролируемого объекта, для регистрации дефекта необходимо иметь пространственную сетку датчиков с размерами её ячейки 2–3 характерных размера ожидаемого или контролируемого дефекта. Практическая реализация такой схемы, как правило, не имеет смысла. В качестве одного из принципов размещения датчиков можно принять, что дефект возникает в зонах концентрации напряжений или деформаций. Такие зоны могут быть определены исходя из инженерной практики или на основе результатов моделирования напряженно-деформированного состояния контролируемого объекта при заданном варианте

пространственного распределения внешних механических и физических воздействий.

Изменение деформации, регистрируемой датчиком, может происходить не только при возникновении дефекта, но и при изменении внешних воздействий. Предлагаемый алгоритм регистрации изменений деформаций, вызванных только дефектами, базируется на двух положениях. Механическое поведение материала контролируемого объекта имеет линейную зависимость от внешних воздействий. Второе положение состоит в том, что при квазистатическом деформировании или вынужденных установившихся колебаниях внешние воздействия в различные моменты времени подобны, то есть отличаются друг от друга постоянным множителем. При выполнении приведённых условий возможно два варианта регистрации дефекта. При известном уровне внешних воздействий информацией о появлении дефекта и его развитии является нарушение линейной зависимости деформаций от внешних воздействий. При отсутствии информации о внешних воздействиях используются относительные величины значений деформаций. В этом варианте имеется совокупность датчиков, определяющих деформации  $\varepsilon_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) в заданном числе  $n$  точек. Для момента времени  $t_m$  ( $m = 1, 2, 3 \dots$ ) можно получить  $n(n-1)/2$  относительных величин:

$$k_{ij}^{t_m} = \frac{\varepsilon_i^{t_m}}{\varepsilon_j^{t_m}}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad j = i+1, \dots, n$$

При появлении и развитии дефекта и расположении датчика  $i = s$  на удалении от дефекта, соответствующем принципу Сен-Венана изменяются соотношения:  $\varepsilon_s^{t_m} / \varepsilon_j^{t_m}$ ,  $j = s+1, s+2, \dots, n$  и  $\varepsilon_i^{t_m} / \varepsilon_s^{t_m}$ ,  $i = 1, 2, \dots, s-1$ . Таким образом изменения в процессе наблюдения величин  $\varepsilon_i^{t_m} / \varepsilon_j^{t_m}$  позволяет сделать заключение о появлении и развитии дефектов, а также о районе его возникновения. Рассматриваемый алгоритм может быть применён также для вариантов, когда из рассмотрения необходимо исключить интервалы внешних воздействий, при которых нарушается линейная зависимость деформаций от нагрузок. Такие варианты могут возникать при эксплуатации конструкций и будут продемонстрированы экспериментально в

настоящей работе. В этом случае при изменении деформаций между двумя моментами времени предлагается рассматривать следующие относительные величины:

$$q_{ij}^{t_m} = \frac{\varepsilon_i^{t_{m+1}} - \varepsilon_i^{t_m}}{\varepsilon_j^{t_{m+1}} - \varepsilon_j^{t_m}}, \quad (4.1)$$

При практической реализации рассматриваемой методики используется ограниченное число датчиков. На основе инженерного опыта или результатов численного моделирования предлагается размещать датчики в зонах концентрации напряжений, где велика вероятность появления дефекта (разрушения) и в зонах без концентрации напряжений. Результаты численного моделирования также используются для получения исходных значений  $\varepsilon_i/\varepsilon_j$  для соответствующего варианта внешних воздействий. Достоверность полученных в численном эксперименте относительных величин  $\varepsilon_i/\varepsilon_j$  оценивается и корректируется экспериментально на начальном этапе мониторинга при отсутствии дефектов (разрушений) в материале контролируемого объекта. Если в процессе мониторинга меняются некоторые из соотношений, то эти изменения, привязанные к определенному датчику, будут свидетельствовать о появлении и развитии дефекта в зоне, соответствующей данному датчику.

В качестве первого экспериментального образца рассматривается прямоугольная пластина из стеклопластика с приведенными ранее механическими характеристиками. Размеры образца 250×50×3 мм. Для измерения деформаций пластины оптическое волокно приклеивается к поверхности пластины цианоакрилатным клеем.

Испытание образцов на одноосное растяжение проводились на универсальной испытательной машине серии Shimadzu AG-X Plus. Растяжение приводилось в упругой зоне с нагрузкой до 20 кН с минутными выдержками при нагрузках 5 кН, 10 кН, 15 кН, 20 кН и последующей разгрузкой. Скорость нагружения 2 мм/мин. На поверхность образца наклеены три линии оптических волокон с брэгговскими решетками для регистрации поперечных деформаций

(датчики 1, 2, 3) и одна линия с тремя датчиками для регистрации продольных деформаций (датчики 4, 5, 6) (Рисунок 4.8). В образцах были сделаны отверстия различных диаметров. В данных экспериментах появление отверстия и увеличение его диаметра имитировало соответственно появление и развитие повреждений.

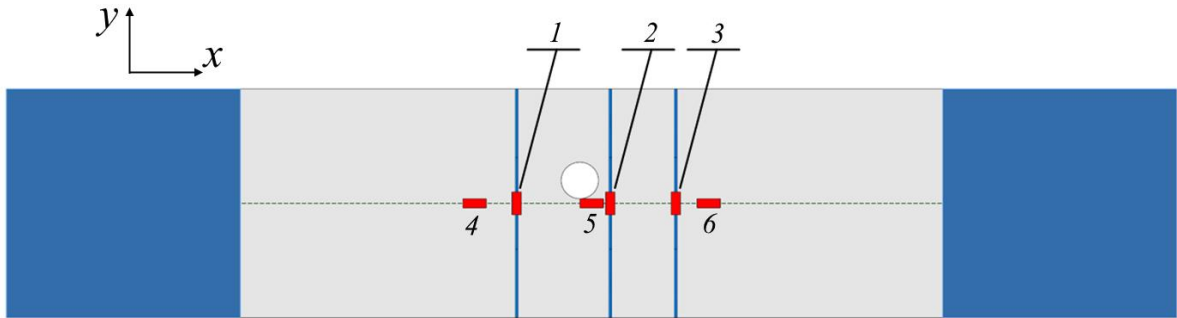


Рисунок 4.8 — Прямоугольные образцы с отверстием

Согласно рассматриваемой методике для представленной сетки датчиков имеют место следующие 15 отношений деформаций:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = k_{12}, \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} = k_{13}, \dots, \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_6} = k_{16}, \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_3} = k_{23}, \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_4} = k_{24}, \dots, \frac{\varepsilon_5}{\varepsilon_6} = k_{56},$$

здесь  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  — деформации  $\varepsilon_y$  измеряемые датчиками 1, 2, 3;

$\varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$  — деформации  $\varepsilon_x$ , измеряемые датчиками 4, 5, 6.

На рисунке 4.9 представлена зависимость некоторых отношений  $k_{ij}$  от диаметра отверстия [133]. Предположение о линейной зависимости деформаций от величины внешней нагрузки подтвердилось результатами экспериментов.

Данные результаты позволяют сделать заключение, что при появлении отверстия, которое имитирует дефект и увеличении его диаметра изменяются константы  $k_{ij}$ , которые определяются значениями деформаций в зоне достаточно близкой к отверстию. В данном случае это константы:  $k_{12}, k_{15}, k_{23}, k_{24}, k_{25}, k_{26}, k_{35}, k_{45}, k_{56}$ . Изменения этих констант свидетельствует о появлении и росте повреждения.

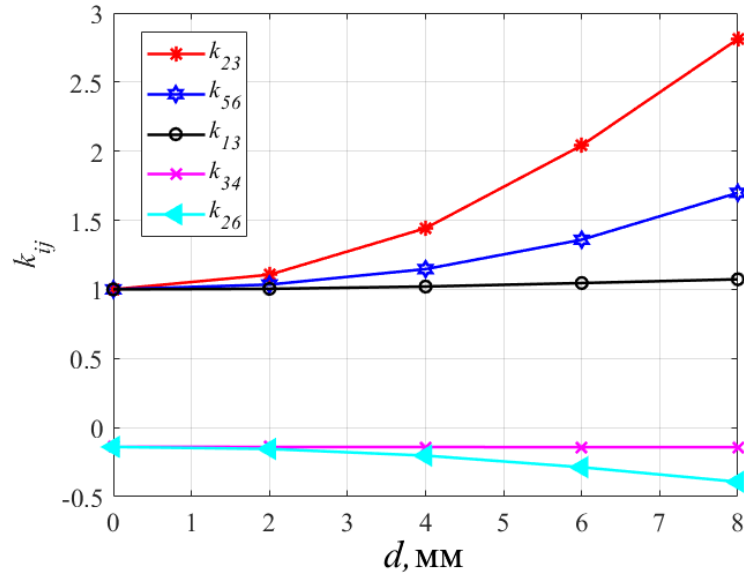


Рисунок 4.9 — Экспериментальные зависимости отношений  $k_{ij}$  от диаметра отверстия

Для вывода о месте появления дефекта следует проанализировать константы, которые остались практически неизменными. В настоящей задаче это константы:  $k_{13}$ ,  $k_{14}$ ,  $k_{46}$ ,  $k_{16}$ ,  $k_{34}$ ,  $k_{36}$ . Эти данные позволяют сделать заключение: в окрестности датчиков 1, 3, 4, 6 дефекты не возникли, а дефект имеет место в окрестности датчиков 2 и 5.

В качестве второго объекта, на котором иллюстрируется методика регистрации дефектов (разрушений) на основе экспериментальных данных о деформациях, рассматривается конструктивно-подобный образец из стеклопластика в форме уголка со схемой нагружения, представленной на рисунке 4.10. На рисунке 4.11 приведены фотографии испытаний при растяжении уголка на испытательной машине. Согласно схеме нагружения, представленной на рисунке 4.10, нижняя часть большой полки уголка закреплена, а к короткой полке уголка прикладывается растягивающее усилие. Образец в форме уголка с заданной схемой нагружения содержит существенный концентратор напряжений, а именно, ребро уголка. В данном эксперименте следует отметить изменения в процессе нагружения граничных условий в зоне болтового соединения. Эти изменения



приводят на начальном этапе нагружения к нелинейной зависимости между деформациями и внешними усилиями. Для этого варианта при анализе деформаций с целью регистрации дефекта следует использовать соотношение (4.1).

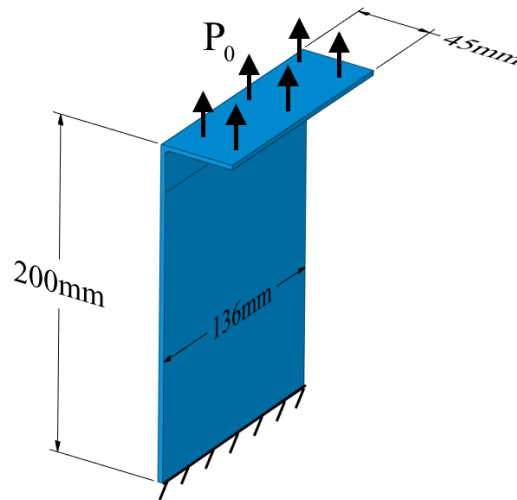


Рисунок 4.10 — Схема эксперимента для образца, имеющего форму уголка



Рисунок 4.11 — Образец в форме уголка при испытании на растяжение

В соответствии с рассматриваемым алгоритмом регистрации дефектов, для определения зон размещения датчиков выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния на основе метода конечных элементов. На рисунке 4.12 приведено распределение деформаций  $\epsilon_y$  на большой полке уголка. В

соответствии с результатами расчета были выбраны места расположения датчиков. Датчики 1, 2 и 5 расположены в зоне с градиентной зависимостью деформаций от концентратора напряжений, а датчики 4 и 5 в зоне однородной деформации, величина которой не зависит от концентратора напряжений.

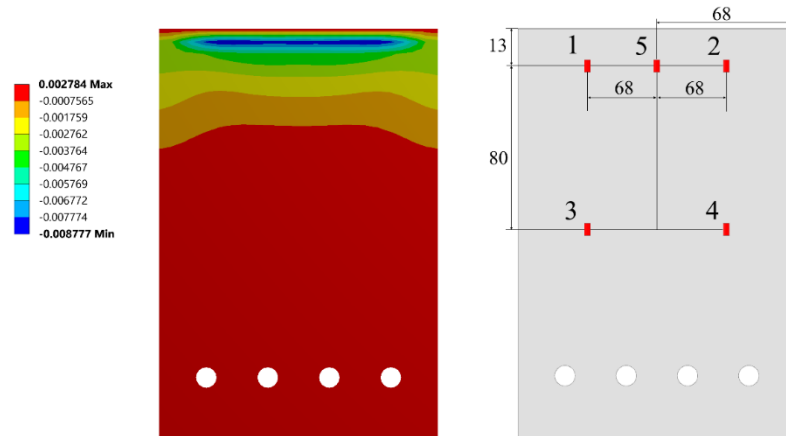


Рисунок 4.12 — Численные результаты распределения деформаций и схема размещения датчиков

Анализ поведения образцов при различных уровнях и ступенчатых режимах изменения нагрузок во времени позволяет сделать следующие выводы. При нагрузках больше 5000 Н в образцах начинается процесс разрушения полимерного композиционного материала в окрестности ребра уголка. Этот процесс проявляется в звуковых эффектах (потрескивание) и изменении цвета материала в окрестности ребра уголка. При уровне ступенчатых нагружений во времени меньше 5000 Н показания датчиков при повторных нагружениях сохраняются, что свидетельствует об отсутствии повреждений и об упругом поведении материала.

На рисунке 4.13 приведены экспериментальные значения деформаций, регистрируемые датчиками 1, 2, 3, 4 при различных значениях нагрузок. Здесь следует отметить, что при нагрузках меньше 1000 Н имеет место нелинейная зависимость между деформациями и приложенной нагрузкой, которая является следствием изменения граничных условий. Приведенные результаты позволяют продемонстрировать два варианта регистрации повреждений. Первый вариант

основан на анализе зависимости между деформациями и внешней нагрузкой. В данном случае отклонение от линейной зависимости для деформации, регистрируемой датчиком 1, является индикатором появления дефектов в окрестности этого датчика. Второй вариант исходит из наличия только значений деформаций, измеряемых в различные моменты времени. Примем, что в данном эксперименте нагрузка 1000 Н соответствует моменту времени  $t_1$ , нагрузка 2000 Н — моменту времени  $t_2$  и т. д. На рисунке 4.14 приведены величины, полученные на основе соотношения (4.1). Данные результаты явно фиксируют изменения отношения, в которое входят показания датчика 1. Эти изменения коррелируют с появлением повреждений в материале между шестым и седьмым измерениями.

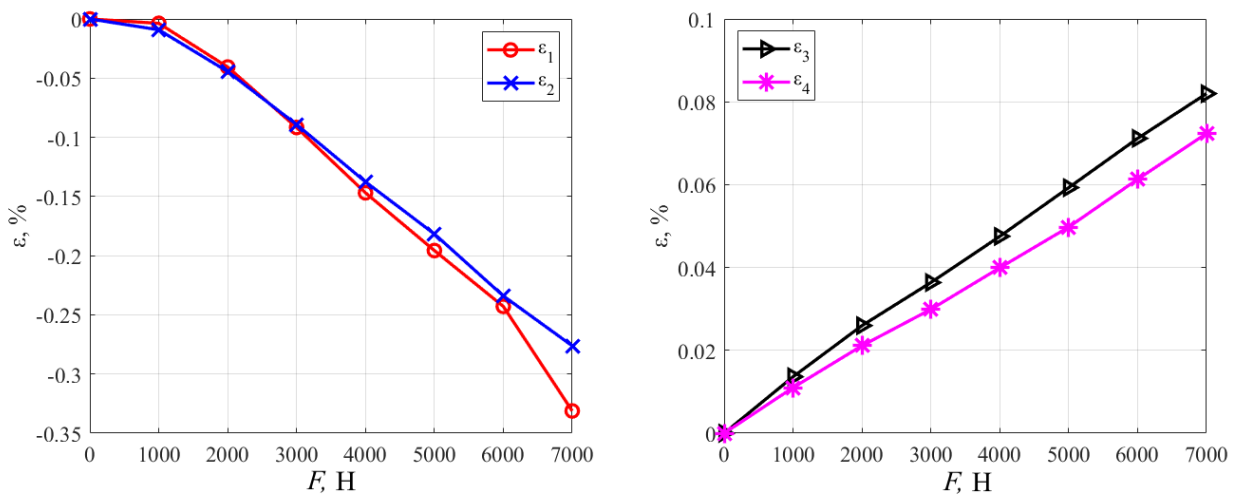


Рисунок 4.13 — Экспериментальные значения деформаций, регистрируемых датчиками 1, 2, 3, 4

Результаты, полученные с учетом показаний датчиков 1 и 2 (Рисунок 4.14 кривые  $q_{13}$  и  $q_{23}$ ) демонстрируют, что появляющиеся дефекты распределяются вдоль ребра уголка неравномерно. Это объясняется тем, что в эксперименте была не обеспечена идеальная симметрия геометрии и условий нагружения относительно среднего сечения.

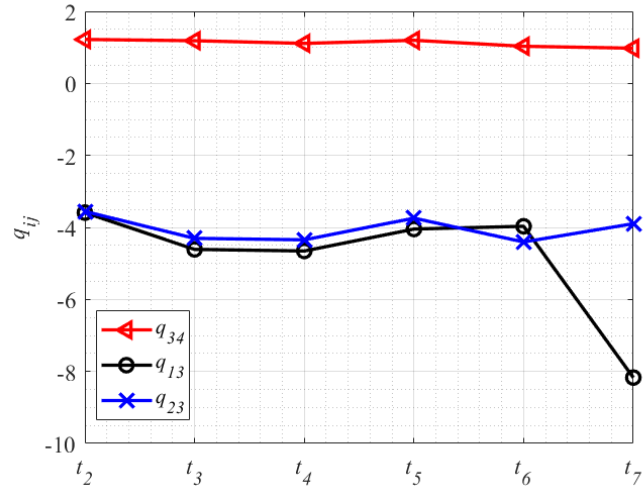


Рисунок 4.14 — Приращения деформаций различных датчиков

Для моделирования экспериментального результата были выполнены численные расчеты для уголка с несимметричным дефектом, согласно расчетной схеме, приведенной на рисунке 4.15. Выделенная красным цветом зона дефекта моделируется заданием в этой зоне существенно меньших по сравнению с исходными модулей упругости материала. Выполненные расчеты позволяют оценить влияние на перераспределение деформаций несимметрии дефекта. Полученные численные и экспериментальные результаты качественно совпадают, а именно большие значения деформаций имеют место в части образца, противоположной относительно расположения дефекта

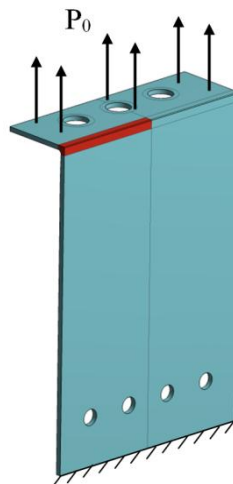


Рисунок 4.15 — Расчетная схема уголка с дефектом

Для апробации рассматриваемого алгоритма регистрации дефектов реализован эксперимент с циклическим нагружением, как одним из распространенных вариантов внешних воздействий, приводящих к разрушению. Экспериментальным образцом является пластина с размерами  $250 \times 50 \times 3$  мм, выполненная из стеклопластика. Пластина имеет на одной из сторон вырез (Рисунок 4.16), который выполняет роль концентратора напряжений. Кинематическая схема нагружения, представленная на рисунке 4.16, обеспечивается сервогидравлической машиной Instron 8801. Циклическое нагружение проводилось с частотой 10 Гц. Схема циклического нагружения представлена на рисунке 4.17. Максимальная величина прикладываемых перемещений  $u_{max} = 1.56$  мм составляет 70% от величины перемещений, при которых по данным с системы регистрации сигналов акустической эмиссии при статическом нагружении произошли первичные изменения в материале. Величина амплитуды относительно среднего значения перемещений  $u_{cp}$  равна 0.2 мм. Оптическое волокно с волоконно-оптическими датчиками деформации на брэгговских решетках длиной 5 мм, расположенными на расстоянии 15 мм друг от друга, встроено в полимерный композиционный материал на стадии изготовления образца по технологии прямого прессования [134].

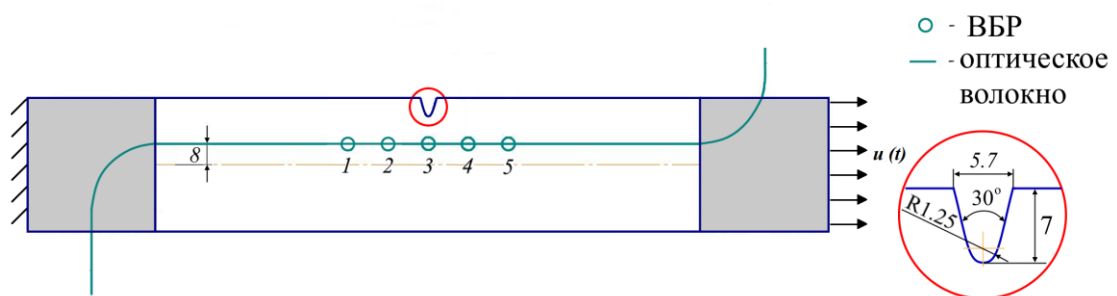


Рисунок 4.16 — Образец для испытаний при циклическом нагружении

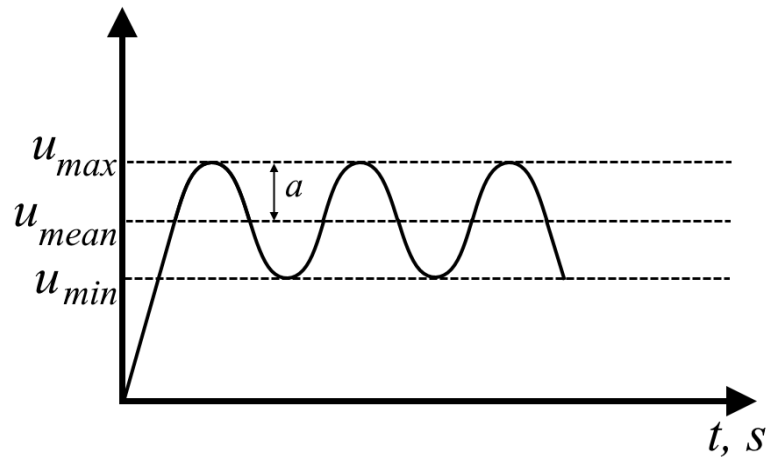


Рисунок 4.17 — Схема циклического нагружения

На рисунке 4.18 представлены зависимости от числа циклов средних при циклическом нагружении осевых деформаций, зарегистрированных датчиком 1 ( $\varepsilon_1$ ), датчиком 2 ( $\varepsilon_2$ ) и датчиком 3 ( $\varepsilon_3$ ). На рисунке 4.19 приведены зависимости от числа циклов ( $N$ ) отношений осредненных показаний датчиков  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_1/\varepsilon_3$ . Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы. До 3000 циклов показания датчика 1, расположенного по сравнению с другими датчиками дальше от зоны концентрации напряжений, практически не изменяются, а после 3000 циклов изменяются незначительно. Это свидетельствует об отсутствии существенных повреждений материала в окрестности датчика 1. Деформации, измеряемые датчиками 2 и 3, которые расположены ближе к концентратору напряжений, начинают изменяться после 2000 циклов. Это также отмечается изменением отношений  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_1/\varepsilon_3$ . При числе циклов больше 3000 циклов величины  $\varepsilon_1/\varepsilon_2$  и  $\varepsilon_1/\varepsilon_3$  начинают резко изменяться, что связано с существенными повреждениями материала. При этом датчики, расположенные ближе к вершине выреза, регистрируют большие повреждения в материале.

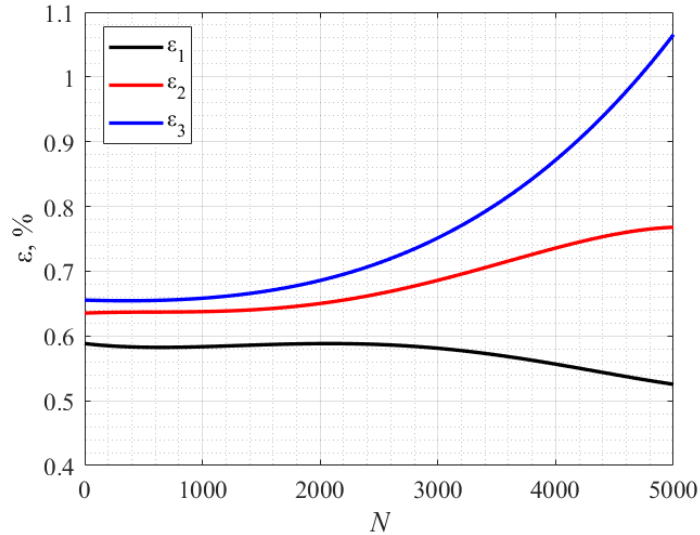


Рисунок 4.18 — Зависимость показаний средних деформаций от числа циклов нагружений

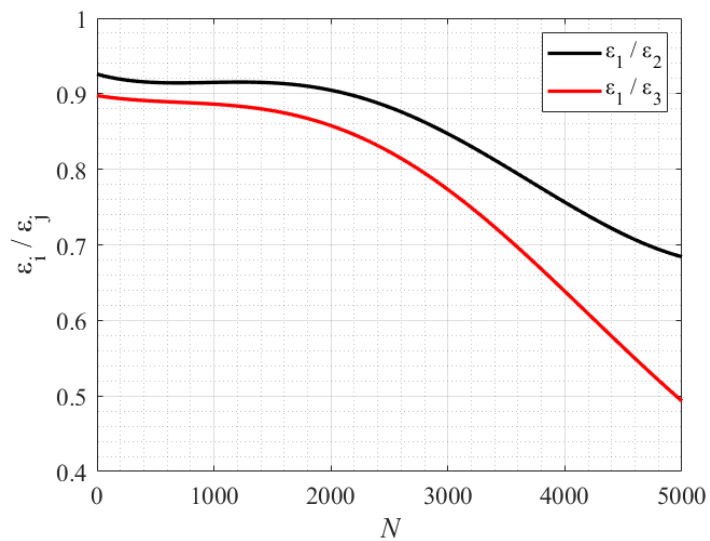


Рисунок 4.19 — Зависимость отношений средних значений деформаций, регистрируемых двумя датчиками, от числа циклов нагружений

Приведённые результаты дополнительно подтверждаются показанными на рисунке 4.20 картинками распределения деформаций после различного числа циклов, полученными с использованием системы оптической регистрации деформаций VIC-3D [135]. Кроме этого, зоны роста деформаций отмечаются

изменением цвета поверхности материала, вызванного повреждениями в связующем полимерного композиционного материала.

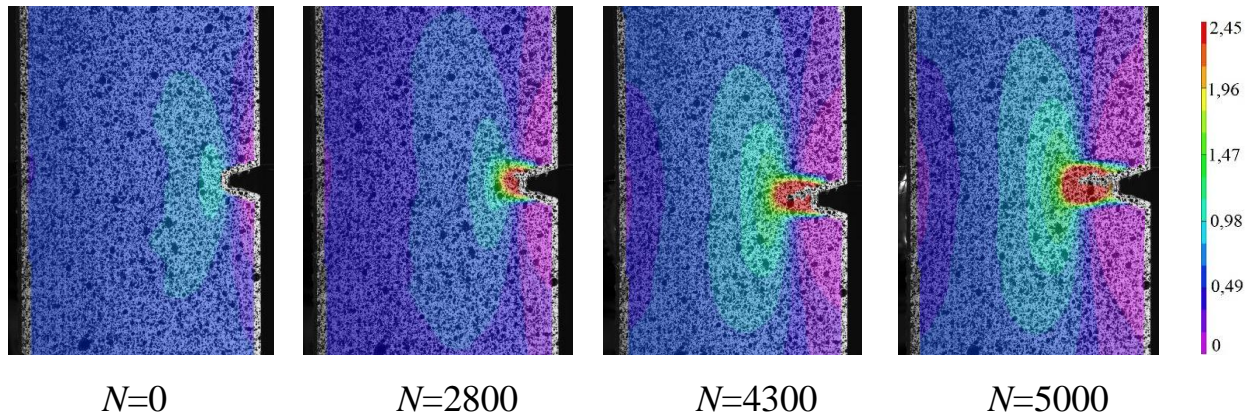


Рисунок 4.20 — Поля продольных деформаций, полученные при использовании системы оптической регистрации деформаций VIC-3D, после различного числа циклов



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### **Итоги выполненного исследования.**

1. Разработан алгоритм, обеспечивающий измерение деформаций распределёнными 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  $-43$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ ) в течение длительного времени.

3. Продемонстрирована возможность измерения деформаций и достоверность результатов измерений точечными и распределёнными 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 напряжённно-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 решётках, встроенными в материал или располагаемыми на его поверхности при использовании допущения об одноосном напряжённном состоянии в зоне датчика.

6. Для тестирования точечных и распределённых 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 распределённых 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.

#### **Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.**

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

- разработка методов температурной компенсации при измерении деформаций с учетом анизотропии свойств материалов;
- анализ особенностей измерения деформаций ВОД при динамических нагрузках.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Hecht J. Laser pioneers. — Rev. ed. — Boston; San Diego; New York: Academic Press, 1992. — 298 p.
2. Kao K.C., Hockham G.A. Dielectric fibre surface waveguides for optical frequencies // Proc. Inst. Electr. Eng. — 1966. — Vol. 113. — No. 7. — P. 1151–1158.
3. Kapron F.P., Keck D.B., Maurer R.D. Radiation losses in glass optical waveguides // Appl. Phys. Lett. — 1970. — Vol. 17. — No. 10. — P. 423–425.
4. Udd E. Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. — New York: Wiley Interscience, 2006. — 476 p.
5. Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication // Appl. Phys. Lett. — 1978. — Vol. 32. — No. 10. — P. 647–649.
6. Meltz G., Morey W.W., Glenn W.H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method // Opt. Lett. — 1989. — Vol. 14. — No. 15. — P. 823.
7. Kashyap R. Fiber Bragg gratings. — 2nd ed. — Burlington, MA: Academic Press, 2010. — 614 p.
8. Measures R.M. Structural monitoring with fiber optic technology. — San Diego, Calif.: Academic, 2001. — 716 p.
9. Варжель С. В. Волоконные брэгговские решетки: учебное пособие. — Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015. — 65 с.
10. Pendão C., Silva I. Optical Fiber Sensors and Sensing Networks: Overview of the Main Principles and Applications // Sensors. — 2022. — Vol. 22. — No. 19. — P. 7554.
11. Soller B.J., Gifford D.K., Wolfe M.S., Froggatt M.E. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies // Opt. Express. — 2005. — Vol. 13. — No. 2. — P. 666.

12. Di Sante R. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications // *Sensors*. — 2015. — Vol. 15. — No. 8. — P. 18666–18713.
13. Davis C., Knowles M., Rajic N., Swanton G. Evaluation of a Distributed Fibre Optic Strain Sensing System for Full Scale Fatigue Testing // *Procedia Struct. Integr.* — 2016. — Vol. 2. — P. 3784–3791.
14. Cheng L., Cigada A., Lang Z.-Q., Zappa E. Calibrating static measurement data from distributed fiber optics by the integration of limited FBG sensors based on the extended kernel regression method // *Meas. Sci. Technol.* — 2019. — Vol. 30. — No. 12. — P. 125102.
15. Chen B., Yang J., Li A., Zhang M., Li J., Wang Z. Strain Measurement Technology and Precision Calibration Experiment Based on Flexible Sensing Fiber // *Sensors*. — 2024. — Vol. 24. — No. 12. — P. 3811.
16. Campanella C.E., Cuccovillo A., Campanella C., Yurt A., Passaro V.M.N. Fibre Bragg Grating Based Strain Sensors: Review of Technology and Applications // *Sensors*. — 2018. — Vol. 18. — No. 9. — P. 3115.
17. Takeda N. Recent Development of Structural Health Monitoring Technologies for Aircraft Composite Structures // *Proc. 26th Int. Congr. Aeronaut. Sci.* — 2008. — P. 1–12.
18. Kablov E.N., Sivakov D.V., Gulyaev I.N., Sorokin K.V., Fedotov M.Yu., Dianov E.M., Vasil'ev S.A., Medvedkov O.I. Application of optical fiber as strain gauges in polymer composite materials // *Polym. Sci. Ser. D.* — 2011. — Vol. 4. — No. 3. — P. 246–251.
19. Li X.X., Ren W.X., Bi K.M. FBG force testing ring for bridge cable force monitoring and temperature compensation // *Sens. Actuators Phys.* — 2015. — Vol. 223. — P. 105–113.
20. García I., Zubia J., Durana G., Aldabaldetrekú G., Illarramendi M.A., Villatoro J. Optical Fiber Sensors for Aircraft Structural Health Monitoring // *Sensors*. — 2015. — Vol. 15. — No. 7. — P. 15494–15519.

21. Rocha H., Semprinoschnig C., Nunes J.P. Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: A review // *Eng. Struct.* — 2021. — Vol. 237. — P. 112231.
22. Güemes A., Fernández López A., Díaz Maroto P., Lozano A., Sierra Perez J. Structural Health Monitoring in Composite Structures by Fiber Optic Sensors // *Sensors.* — 2018. — Vol. 18. — No. 4. — P. 1094.
23. Schenato L. A Review of Distributed Fibre Optic Sensors for Geo Hydrological Applications // *Appl. Sci.* — 2017. — Vol. 7. — No. 9. — P. 896.
24. Zheng Y., Zhu Z.-W., Xiao W., Deng Q.-X. Review of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring // *Opt. Fiber Technol.* — 2020. — Vol. 54. — P. 102127.
25. Li Y., Wang H., Cai W., Li S., Zhang Q. Stability monitoring of surrounding rock mass on a forked tunnel using both strain gauges and FBG sensors // *Measurement.* — 2020. — Vol. 153. — P. 107449.
26. Kashaganova G., Kozbakova A., Kartbayev T., Balbayev G., Togzhanova K., Alimseitova Z., Orazaliyeva S. Research of a Fiber Sensor Based on Fiber Bragg Grating for Road Surface Monitoring // *Electronics.* — 2023. — Vol. 12. — No. 11. — P. 2491.
27. Barrias A., Casas J., Villalba S. A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications // *Sensors.* — 2016. — Vol. 16. — No. 5. — P. 748.
28. Bado M.F., Casas J.R. A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring // *Sensors.* — 2021. — Vol. 21. — No. 5. — P. 1818.
29. Minardo A., Bernini R., Berruti G. M. и др. Innovative Photonic Sensors for Safety and Security, Part I: Fundamentals, Infrastructural and Ground Transportations // *Sensors.* — 2023. — Vol. 23. — No. 5. — P. 2558.
30. Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Turov A.T., Konstantinov Y.A., Lobach I.A. Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State of the Art Review and Perspective // *Sensors.* — 2022. — Vol. 22. — No. 3. — P. 1033.

31. Presti D.L., Santucci F., Massaroni C., Formica D., Setola R., Schena E. A multi point heart rate monitoring using a soft wearable system based on fiber optic technology // *Sci. Rep.* — 2021. — No. 11. — P. 21162.
32. Nedoma J., Fajkus M., Martinek R., Nazeran H. Vital Sign Monitoring and Cardiac Triggering at 1.5 Tesla: A Practical Solution by an MR Ballistocardiography Fiber Optic Sensor // *Sensors.* — 2019. — Vol. 19. — No. 3. — P. 470.
33. De Tommasi F., Lo Presti D., Virgili F., Massaroni C., Schena E., Carassiti M. Soft System Based on Fiber Bragg Grating Sensor for Loss of Resistance Detection during Epidural Procedures: In Silico and In Vivo Assessment // *Sensors.* — 2021. — Vol. 21. — No. 16. — P. 5329.
34. Parent F., Loranger S., Mandal K., Iezzi V.L., Lapointe J., Boisvert S., Baiad M.D., Kadoury S., Kashyap R. Enhancement of accuracy in shape sensing of surgical needles using optical frequency domain reflectometry in optical fibers // *Biomed. Opt. Express.* — 2017. — Vol. 8. — No. 4. — P. 2210–2221.
35. Xu C., Khodaei Z.S. Shape Sensing with Rayleigh Backscattering Fibre Optic Sensor // *Sensors.* — 2020. — Vol. 20. — No. 14. — P. 4040.
36. Floris I., Adam J.M., Calderón P.A., Sales S. Fiber Optic Shape Sensors: A comprehensive review // *Opt. Lasers Eng.* — 2021. — Vol. 139. — P. 106508.
37. Jäckle S., Eixmann T., Schulz Hildebrandt H., Hüttmann G., Pätz T. Fiber optical shape sensing of flexible instruments for endovascular navigation // *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.* — 2019. — Vol. 14. — No. 12. — P. 2137–2145.
38. Amantayeva A., Adilzhanova N., Issatayeva A., Blanc W., Molardi C., Tosi D. Fiber Optic Distributed Sensing Network for Shape Sensing Assisted Epidural Needle Guidance // *Biosensors.* — 2021. — No. 11. — P. 446.
39. Chen X.-Y., Zhang Y.-N., Shen L.-Y., Qian J.-W., Fan J.-Y. Fabrication and shape detection of a catheter using fiber Bragg grating // *Adv. Manuf.* — 2020. — Vol. 8. — No. 1. — P. 107–118.
40. The Boeing 787 Dreamliner: Designing an Aircraft for the Future [Электронный ресурс] // *Journal of Young Investigators.* — 2010. — Режим доступа:

<https://www.jyi.org/2010-august/2010/8/6/the-boeing-787-dreamliner-designing-an-aircraft-for-the-future> (дата обращения: 02.07.2024).

41. Rajan, G., Prusty, B.G., Iniewski, K. Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fiber Optic Methods. — Boca Raton, FL: CRC Press, 2016. — 491 p.

42. Parveez B., Kittur M.I., Badruddin I.A., Kamangar S., Hussien M., Umarfarooq M.A. Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review // Polymers. — 2022. — Vol. 14. — No. 22. — P. 5007.

43. MC-21 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://yakovlev.ru/products/mc-21/> (дата обращения: 02.07.2024).

44. Cutolo A. et al. Innovative Photonic Sensors for Safety and Security, Part II: Aerospace and Submarine Applications // Sensors. — 2023. — Vol. 23. — No. 5. — P. 2417.

45. Iele A., Leone M., Consales M., Persiano G.V., Brindisi A., Ameduri S., Concilio A., Ciminello M., Apicella A., Bocchetto F., Cusano A. Load monitoring of aircraft landing gears using fiber optic sensors // Sens. Actuators Phys. — 2018. — Vol. 281. — P. 31–41.

46. Iadicicco A., Natale D., Palma P.D., Spinaci F., Apicella A., Campopiano S. Strain Monitoring of a Composite Drag Strut in Aircraft Landing Gear by Fiber Bragg Grating Sensors // Sensors. — 2019. — Vol. 19. — No. 10. — P. 2239.

47. Li H., Lian Qing Z., Gaungkai S., Ming Li D., Junfei Q. Deflection monitoring of thin walled wing spar subjected to bending load using multi element FBG sensors // Optik. — 2018. — Vol. 164. — P. 691–700.

48. Kwon H., Park Y., Kim J.-H., Kim C.-G. Embedded fiber Bragg grating sensor-based wing load monitoring system for composite aircraft // Struct. Health Monit. — 2019. — Vol. 18. — No. 4. — P. 1337–1351.

49. Klotz T., Pothier R., Walch D., Colombo T. Prediction of the business jet Global 7500 wing deformed shape using fiber Bragg gratings and neural network // Results Eng. — 2021. — Vol. 9. — P. 100190.

50. Nicolas M., Sullivan R., Richards W. Large Scale Applications Using FBG Sensors: Determination of In Flight Loads and Shape of a Composite Aircraft Wing // *Aerospace*. — 2016. — Vol. 3. — No. 3. — P. 18.
51. Lee J.-R., Ryu C.-Y., Koo B.-Y., Kang S.-G., Hong C.-S., Kim C.-G. In flight health monitoring of a subscale wing using a fiber Bragg grating sensor system // *Smart Mater. Struct.* — 2003. — Vol. 12. — P. 147–155.
52. Ghoshal A., Ayers J., Gurvich M., Urban M., Bordick N. Experimental investigations in embedded sensing of composite components in aerospace vehicles // *Compos. Part B Eng.* — 2015. — Vol. 71. — P. 52–62.
53. Alvarez Montoya J., Carvajal Castrillón A., Sierra Pérez J. In flight and wireless damage detection in a UAV composite wing using fiber optic sensors and strain field pattern recognition // *Mech. Syst. Signal Process.* — 2020. — Vol. 136. — P. 106526.
54. Wada D., Igawa H., Tamayama M., Kasai T., Arizono H., Murayama H. Flight demonstration of aircraft wing monitoring using optical fiber distributed sensing system // *Smart Mater. Struct.* — 2019. — Vol. 28. — No. 5. — P. 055007.
55. Goossens S., Berghmans F., Muñoz K., Jiménez M., Karachalios E., Saenz Castillo D., Geernaert T. A global assessment of barely visible impact damage for CFRP sub components with FBG based sensors // *Compos. Struct.* — 2021. — Vol. 272. — P. 114025.
56. Jang B.-W., Kim C.-G. Real-time detection of low-velocity impact-induced delamination onset in composite laminates for efficient management of structural health // *Compos. Part B Eng.* — 2017. — Vol. 123. — P. 124–135.
57. Panettieri E., Fanteria D., Montemurro M., Froustey C. Low velocity impact tests on carbon/epoxy composite laminates: A benchmark study // *Compos. Part B Eng.* — 2016. — Vol. 107. — P. 9–21.
58. Shardakov I.N., Shestakov A.P., Serovaev G.S., Kosheleva N.A., Epin V.V. The Study of Impact Loading on GFRP Plates Using a Network of Piezoceramic Sensors // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* — 2019. — Vol. 581. — No. 1. — P. 012030.



59. De Luca A., Caputo F., Sharif Khodaei Z., Aliabadi M.H. Damage characterization of composite plates under low velocity impact using ultrasonic guided waves // *Compos. Part B Eng.* — 2018. — Vol. 138. — P. 168–180.
60. Bednarska K., Sobotka P., Woliński T.R., Zakręcka O., Pomianek W., Nocoń A., Lesiak P. Hybrid Fiber Optic Sensor Systems in Structural Health Monitoring in Aircraft Structures: 10 // *Materials.* — 2020. — Vol. 13. — No. 10. — P. 2249.
61. Barazanchy D., Martinez M., Rocha B., Yanishevsky M. A Hybrid Structural Health Monitoring System for the Detection and Localization of Damage in Composite Structures // *J. Sens.* — 2014. — Vol. 2014. — P. 1–10.
62. Gao Z., Xiaojin Z., Yubin F., Hesheng Z. Active monitoring and vibration control of smart structure aircraft based on FBG sensors and PZT actuators // *Aerosp. Sci. Technol.* — 2017. — Vol. 63. — P. 101–109.
63. Yang S.-M., Han J.-H., Lee I. Characteristics of smart composite wing with SMA actuators and optical fiber sensors // *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.* — 2006. — Vol. 23. — No. 3–4. — P. 177–186.
64. Mieloszyk M., Skarbek L., Krawczuk M., Ostachowicz W., Zak A. Application of fibre Bragg grating sensors for structural health monitoring of an adaptive wing // *Smart Mater. Struct.* — 2011. — Vol. 20. — No. 12. — P. 125014.
65. Balać I., Milovančević M., Uskoković P., Aleksić R. Stress field analysis around optical fiber embedded in composite laminae under transverse loading // *FME Trans.* — 2006. — Vol. 34. — P. 53–56.
66. Dasgupta A., Wan Y., Sirkis J.S. Prediction of resin pocket geometry for stress analysis of optical fibers embedded in laminated composites // *Smart Mater. Struct.* — 1992. — Vol. 1. — No. 2. — P. 101–107.
67. Lammens N., Luyckx G., Voet E., Van Paepegem W., Degrieck J. Finite element prediction of resin pocket geometry around embedded optical fiber sensors in prepreg composites // *Compos. Struct.* — 2015. — Vol. 132. — P. 825–832.
68. Shivakumar K., Bhargava A. Failure Mechanics of a Composite Laminate Embedded with a Fiber Optic Sensor // *J. Compos. Mater.* — 2005. — Vol. 39. — No. 9. — P. 777–798.

69. Shivakumar K., Emmanwori L. Mechanics of Failure of Composite Laminates with an Embedded Fiber Optic Sensor // *J. Compos. Mater.* — 2004. — Vol. 38. — No. 8. — P. 669–680.
70. Zhou G., Sim L.M. Damage detection and assessment in fibre reinforced composite structures with embedded fibre optic sensors review // *Smart Mater. Struct.* — 2002. — Vol. 11. — No. 6. — P. 925–939.
71. Nguyen A.T.T., Orifici A.C. Structural assessment of microvascular self healing laminates using progressive damage finite element analysis // *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* — 2012. — Vol. 43. — No. 11. — P. 1886–1894.
72. Al Shawk A., Tanabi H., Sabuncuoglu B. Investigation of stress distributions in the resin rich region and failure behavior in glass fiber composites with micro vascular channels under tensile loading // *Compos. Struct.* — 2018. — Vol. 192. — P. 101–114.
73. Melin L.G., Levin K., Nilsson S., Palmer S.J.P., Rae P. A study of the displacement field around embedded fibre optic sensors // *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* — 1999. — Vol. 30. — No. 11. — P. 1267–1275.
74. Lammens N., Luyckx G., Voet E., Van Paepegem W., Degrieck J. Optimization of coating diameter of fiber optic sensors embedded in composite structures under arbitrary loading conditions // *Smart Mater. Struct.* — 2015. — Vol. 24. — No. 11. — P. 115003.
75. Hadzic R., John S., Herszberg I. Structural integrity analysis of embedded optical fibres in composite structures // *Compos. Struct.* — 1999. — Vol. 47. — No. 1–4. — P. 759–765.
76. Silva J.M.A., Devezas T.C., Silva A.P., Ferreira J.A.M. Mechanical Characterization of Composites with Embedded Optical Fibers // *J. Compos. Mater.* — 2005. — Vol. 39. — No. 14. — P. 1261–1281.
77. Luyckx G., Voet E., De Waele W., Degrieck J. Multi axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor: I. Parametric study // *Smart Mater. Struct.* — 2010. — Vol. 19. — No. 10. — P. 105017.
78. Yan M., Tan X., Mahjoubi S., Bao Y. Strain transfer effect on measurements with distributed fiber optic sensors // *Autom. Constr.* — 2022. — Vol. 139. — P. 104262.

79. Luyckx G., Voet E., Lammens N., Degrieck J. Strain Measurements of Composite Laminates with Embedded Fibre Bragg Gratings: Criticism and Opportunities for Research // *Sensors*. — 2011. — Vol. 11. — P. 384–408.

80. Majumder M., Gangopadhyay T.K., Chakraborty A.K., Dasgupta K., Bhattacharya D.K. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring – Present status and applications // *Sens. Actuators Phys.* — 2008. — Vol. 147. — No. 1. — P. 150–164.

81. Fan Y., Kahrizi M. Characterization of a FBG strain gage array embedded in composite structure // *Sens. Actuators Phys.* — 2005. — Vol. 121. — No. 2. — P. 297–305.

82. Kharshiduzzaman M., Gianneo A., Bernasconi A. Experimental analysis of the response of fiber Bragg grating sensors under non uniform strain field in a twill woven composite // *J. Compos. Mater.* — 2019. — Vol. 53. — No. 7. — P. 893–908.

83. Kang D.H., Park S.O., Hong C.S., Kim C.G. The signal characteristics of reflected spectra of fiber Bragg grating sensors with strain gradients and grating lengths // *NDT E Int.* — 2005. — Vol. 38. — No. 8. — P. 712–718.

84. Luyckx G., Voet E., Lammens N., De Waele W., Degrieck J. Residual strain induced birefringent FBGs for multi axial strain monitoring of CFRP composite laminates // *NDT E Int.* — 2013. — Vol. 54. — P. 142–150.

85. Udd, E. Review of multi-parameter fiber grating sensors. // *Proceedings of SPIE* — Vol. 6770, 2007. — P. 677002.

86. Voet E., Luyckx G., De Waele W., Degrieck J. Multi axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor: II. Experimental validation // *Smart Mater. Struct.* — 2010. — Vol. 19. — No. 10. — P. 105018.

87. Sonnenfeld C. et al. Microstructured optical fiber Bragg grating as an internal three dimensional strain sensor for composite laminates // *Smart Mater. Struct.* — 2015. — Vol. 24. — No. 5. — P. 055003.

88. Sonnenfeld C., Sulejmani S., Geernaert T., Eve S., Lammens N., Luyckx G., Voet E., Degrieck J., Urbanczyk W., Mergo P., Becker M., Bartelt H., Berghmans F., Thienpont H. Microstructured optical fiber sensors embedded in a laminate composite

for smart material applications // *Sensors*. — 2011. — Vol. 11. — No. 3. — P. 2566–2579.

89. Li Y., Wen C., Sun Y., Feng Y., Zhang H. Capillary encapsulating of fiber Bragg grating and the associated sensing model // *Opt. Commun.* — 2014. — Vol. 333. — P. 92–98.

90. Lammens N., Luyckx G., Degrieck J., De Waele W. Experimental determination of the multi axial strain transfer from CFRP laminates to embedded Bragg sensor // *Smart Struct. Mater. 5th ECCOMAS Themat. Conf. Proc.* — 2011. — P. 482–485.

91. Hwang G.-S., Huang D.-W., Ma C.-C. Numerical Study on Strain Measurements Using the Improved Bonding Fiber Bragg Grating // *IEEE Sens. J.* — 2010. — Vol. 10. — No. 5. — P. 1012–1018.

92. Lamberti A., Vanlanduit S., De Pauw B., Berghmans F. Influence of Fiber Bragg Grating Spectrum Degradation on the Performance of Sensor Interrogation Algorithms // *Sensors*. — 2014. — Vol. 14. — No. 12. — P. 24258–24277.

93. Di Sante R., Donati L., Troiani E., Proli P. Evaluation of bending strain measurements in a composite sailboat bowsprit with embedded fibre Bragg gratings // *Measurement*. — 2014. — Vol. 54. — P. 106–117.

94. Zhang W., Zhang M., Wang X., Zhao Y., Jin B., Dai W. The Analysis of FBG Central Wavelength Variation with Crack Propagation Based on a Self Adaptive Multi Peak Detection Algorithm // *Sensors*. — 2019. — Vol. 19. — No. 5. — P. 1056.

95. Daggumati S., Van Paepegem W., Degrieck J., Xu J., Lomov S.V., Verpoest I. Local damage in a 5 harness satin weave composite under static tension: Part II – Meso FE modelling // *Compos. Sci. Technol.* — 2010. — Vol. 70. — No. 13. — P. 1934–1941.

96. Huang S., Ohn M.M., Measures R.M. Phase based Bragg intragrating distributed strain sensor // *Appl. Opt.* — 1996. — Vol. 35. — No. 7. — P. 1135.

97. Peters K., Studer M., Botsis J., Iocco A., Limberger H., Salathé R. Embedded optical fiber Bragg grating sensor in a nonuniform strain field: Measurements and simulations // *Exp. Mech.* — 2001. — Vol. 41. — No. 1. — P. 19–28.

98. Luo L., Mei Y., Battista N., Kechavarzi C., Soga K. Repeatability precision error analysis of the distributed fiber optic strain monitoring // *Struct. Control Health Monit.* — 2021. — Vol. 28. — No. 8. — P. e2768.
99. Bado M., Casas J., Barrias A. Performance of Rayleigh Based Distributed Optical Fiber Sensors Bonded to Reinforcing Bars in Bending // *Sensors.* — 2018. — Vol. 18. — No. 9. — P. 3125.
100. Barrias A., Casas J., Villalba S. Embedded Distributed Optical Fiber Sensors in Reinforced Concrete Structures—A Case Study // *Sensors.* — 2018. — Vol. 18. — No. 4. — P. 980.
101. Wagreich R.B., Atia W.A., Singh H., Sirkis J.S. Effects of diametric load on fibre Bragg gratings fabricated in low birefringent fibre // *Electron. Lett.* — 1996. — Vol. 32. — No. 13. — P. 1223.
102. Gafsi R., El Sherif M.A. Analysis of Induced Birefringence Effects on Fiber Bragg Gratings // *Opt. Fiber Technol.* — 2000. — Vol. 6. — No. 3. — P. 299–323.
103. Grassia L., Iannone M., Califano A., D'Amore A. Strain based method for monitoring the health state of composite structures // *Compos. Part B Eng.* — 2019. — Vol. 176. — P. 107253.
104. Mohammed N.A., Ali T.A., Aly M.H. Performance optimization of apodized FBG based temperature sensors in single and quasi distributed DWDM systems with new and different apodization profiles // *AIP Adv.* — 2013. — Vol. 3. — No. 12. — P. 122125.
105. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. — Москва: ЛЕСАРPart, 2005. — 150 с.
106. Соллер Б.Дж., Гиффорд Д.К., Вольф М.С., Фрогатт М.Э. Оптическая рефлектометрия высокого разрешения // *Фотоника.* — 2019. — Т. 13. — № 5. — С. 452–462.
107. Lu P., Lalam N., Badar M., Liu B., Chorpening B.T., Buric M.P., Ohodnicki P.R. Distributed optical fiber sensing: Review and perspective // *Appl. Phys. Rev.* — 2019. — Vol. 6. — No. 4. — P. 041302.

108. Optical Backscatter Reflectometer 4600. User Guide. Version 6. — Blacksburg, VA: Luna Technologies Inc., 2013. — 230 p.
109. Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G. Strain registration in the gradient zone by two types of fiber optic sensors // *Procedia Struct. Integr.* — 2023. — Vol. 50. — P. 184–191.
110. Froggatt M., Moore J. High spatial resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter // *Appl. Opt.* — 1998. — Vol. 37. — No. 10. — P. 1735.
111. 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. — P. 868.
112. Harris F.J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform // *Proc. IEEE.* — 1978. — Vol. 66. — No. 1. — P. 51–83.
113. 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.
114. Kosheleva N.A., Serovaev G.S., Gusev G.N. Registration of evolution of process induced strains in cement mixtures by embedded fiber Bragg grating sensors // *Procedia Struct. Integr.* — 2020. — Vol. 28. — P. 1883–1891.
115. Matveenko V.P., Kosheleva N.A., Serovaev G.S. Strain measurements by FBG based sensors embedded in various materials manufactured by different technological processes // *Procedia Struct. Integr.* — 2022. — Vol. 37. — P. 508–516.
116. Lammens N., Luyckx G., Van Paeppegem W., Degrieck J. Finite element prediction of resin pocket geometries around arbitrary inclusions in composites: Case study for an embedded optical fiber interrogator // *Compos. Struct.* — 2016. — Vol. 146. — P. 95–107.

117. Serovaev G., Kosheleva N. The study of internal structure of woven glass and carbon fiber reinforced composite materials with embedded fiber optic sensors // *Frat. Ed Integrità Strutt.* — 2020. — Vol. 14. — No. 51. — P. 225–235.

118. 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 // *Compos. Struct.* — 2020. — Vol. 239. — P. 111844.

119. Serovaev G., Matveenko V., Kosheleva N., Fedorov A. Numerical modeling of the capillary in the Bragg grating area, ensuring uniaxial stress state of embedded fiber optic strain sensor // *Procedia Struct. Integr.* — 2019. — Vol. 17. — P. 371–378.

120. Kosheleva N., Matveenko V., Serovaev G., Fedorov A. 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 // *Frat. Ed Integrità Strutt.* — 2019. — Vol. 13. — No. 49. — P. 177–189.

121. 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. — P. e2118.

122. 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. — P. e3142.

123. 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. — P. 5050.

124. 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 // *Известия Российской Академии Наук Механика Твердого Тела.* — 2016. — № 5. — С. 42–51.

125. Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G., Fedorov A. Measurement of Gradient Strain Fields with Fiber Optic Sensors // *Sensors*. — 2022. — Vol. 23. — No. 1. — P. 410.

126. Kreger S.T., Gifford D.K., Froggatt M.E., Soller B.J., Wolfe M.S. High resolution distributed strain or temperature measurements in single- and multi-mode fiber using swept-wavelength interferometry // *Optical Fiber Sensors: Proc. of the 17th International Conference on Optical Fiber Sensors, 23–27 Oct. 2006, Washington, D.C., USA*. — Washington, D.C.: OSA, 2006. — P. ThE42.

127. Matveenko V.P., Serovaev G.S., Kosheleva N.A., Galkina E.B. Investigation of fiber Bragg grating's spectrum response to strain gradient // *Procedia Struct. Integr.* — 2024. — Vol. 54. — P. 218–224.

128. Kosheleva N., Serovaev G., Gusev G. Process-induced strain measurement by fiber optic sensors in a cylindrical concrete sample. // *AIP Conference Proceedings*. — 2020. — Vol. 2216. — P. 040011.

129. 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 // *Известия Российской Академии Наук Механика Твёрдого Тела*. — 2021. — № 6. — С. 3–15.

130. Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G. Damage detection in materials based on strain measurements // *Acta Mech.* — 2021. — Vol. 232. — No. 5. — P. 1841–1851.

131. Тимошенко С.П., Гудьер J.N. Theory of elasticity. — 3rd ed. [Nachdr.]. — Auckland: McGraw Hill, 2004. — 608 p.

132. Лурье А.И. Теория упругости. — Москва: Наука, 1970. — 940 с.

133. Matveenko V., Kosheleva N., Serovaev G. Damage detection algorithm based on using surface mounted fiber optic sensors on Bragg gratings // *Procedia Struct. Integr.* — 2019. — Vol. 18. — P. 12–19.

134. Matveenko V.P., Kosheleva N.A., Shardakov I.N., Voronkov A.A. Temperature and strain registration by fibre optic strain sensor in the polymer



composite materials manufacturing // Int. J. Smart Nano Mater. — 2018. — Vol. 9. — No. 2. — P. 99–110.

135. 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.